

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Ibn Khaldoun –Tiaret-

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie

Département de Nutrition et Technologie Agro-Alimentaire

Master : Agriculture de précision



Polycopié intitulé :

Le système mondial de navigation par satellite GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEM (GNSS)

Spécialité : Agriculture de précision (1^{ère} année Master)



C'est ça le GNSS



Préparé par

Dr. OTMANE Abdelkader

2024-2025

Avant - propos

Ce cours est structuré en quatre chapitres. L'on a préféré commencer par un chapitre introductif et descriptif de la mesure de localisation.

Le chapitre II : vise le principe de fonctionnement des dispositifs GNSS. Cette partie du cours met en évidence les développements mathématiques, les notions relatives aux orbites, aux signaux et aux mesures GNSS, ainsi que les erreurs associées.

Le chapitre III : aborde l'utilisation des GNSS pour le positionnement, (Positionnement absolu ou ponctuel ; Positionnement relatif ou différentiel).

Le chapitre IV : présente Les principaux GNSS internationaux (GPS, GLONASS, GALILIEO et COMPASS / BEIDOU)

Ce cours permettra à l'étudiant de comprendre le principe de fonctionnement du GNSS ainsi que ses différents dispositifs.

Table des matières	
Avant-propos	
Sommaire	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction	1

CHAPITRE I : GENERALITES - MESURE DE LA LOCALISATION

1. Généralités	3
1.1. Distinction entre Géodésie, topométrie et topographie	3
1.2. Définitions et notions de base :	3
1.3. Géoïde et ellipsoïde	5
1.4. Ellipsoïdes	6
1.4.1. Ellipsoïdes globaux	7
1.4.2. Ellipsoïdes locaux	7
2. Système géodésiques (Datum).....	7
2.1. Datum horizontal	7
2.2. Datum vertical (Altitudes)	8
2.3. Exemples de Datums	9
2.4. Relation entre Datums	10
3. Système de Coordonnées Géographiques.....	12
3.1. Les coordonnées cartésiennes géocentriques ECEF (Earth-Centred, Earth-Fixed) ..	13
3.2. Grille mondiale	13
4. Projections cartographiques.....	14
4.1. L'objectif de la projection cartographique	15
4.2. Les types de projection	16
4.3. Exemples de projection	17
4.3.1. Transverse Mercator projection (Conforme) :	17
5. La mesure de la localisation	19

CHAPITRE II : PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DES DISPOSITIFS GNSS

1. Introduction	20
2. Historique des systèmes de localisation satellitaires	20
3. Définition GNSS.....	21

4.	Principe de fonctionnement des dispositifs GNSS	21
5.	Notions sur les orbites	24
5.1.	Les trois lois de Kepler (Kovalevsky, 1972)	25
5.1.1.	Loi des orbites	25
5.1.2.	Loi des aires	25
5.1.3.	Loi des périodes	25
5.2.	Les paramètres Képlérien	25
6.	Échelle du temps.....	26
7.	Signaux et mesures	28
7.1.	Construction des signaux.....	28
7.1.1.	Codes pseudo-aléatoires.....	28
7.1.2.	Les ondes porteuses	29
7.1.3.	Message de navigation	29
7.1.4.	Séparation des signaux.....	30
7.2.	Mesure de code	30
7.3.	Mesure de phase	32
7.3.1.	Résolution des ambiguïtés de phase	33
7.4.	Combinaison linéaire des observations	35
8.	Erreurs sur les mesures GNSS.....	36
8.1.	Erreurs liées aux satellites	36
8.1.1.	Orbite et horloges des satellites	36
8.1.2.	Effets relativistes.....	37
8.1.3.	Centre de phase des satellites.....	38
8.2.	Erreurs liées à la propagation	39
8.2.1.	L'ionosphère	40
8.2.2.	La troposphère	41
8.3.	Erreurs liées à la station.....	42
8.3.1.	Le trajet multiple.....	42
8.3.2.	Les masques	43
8.3.3.	Le centre de phase de l'antenne.....	44
8.3.4.	Phase wind up	45
8.4.	Déformation de l'écorce terrestre.....	46

8.4.1. Marée terrestre	46
8.4.2. Surcharge océanique	46
8.5. Synthèse des différents postes d'erreur	47

CHAPITRE III : UTILISATION DU GNSS POUR LE POSITIONNEMENT

1. Introduction	48
2. Positionnement absolu	48
2.1. Positionnement absolu sur le code.....	48
2.2. Positionnement Ponctuel Précis.....	50
3. Positionnement différentiel.....	50
3.1. Positionnement différentiel par mesure de code.....	51
3.1.1. Positionnement temps différé.....	51
3.1.2. Positionnement temps quasi-réel	51
3.2. Positionnement différentiel par mesure de phase	52
3.2.1. Positionnement en temps différé.....	54
3.2.2. Positionnement temps réel	55

CHAPITRE IV : LES PRINCIPAUX GNSS

1. Le système GPS.....	58
1.1. Architecture du système GPS	58
1.1.1. Secteur spatial	59
1.1.2. Secteur contrôle	59
1.1.3. Secteur utilisateur.....	60
1.2. Services du système GPS	60
1.2.1. Le service SPS	60
1.2.2. Le service PPS	60
1.3. Modernisation du système GPS.....	61
1.4. Signaux GPS.....	62
1.4.1. Ondes porteuses	62
1.4.2. Code	63
1.4.3. Message de navigation	64
1.5. Référentiel spatio-temporel	65
1.5.1. Système de référence	65
1.5.2. Le temps GPS	65

2.	Le système Russe GLONASS	66
2.1.	Architecture du système GLONASS	66
2.1.1.	Segment spatial	66
2.1.2.	Segment de contrôle.....	67
2.1.3.	Secteur utilisateur GLONASS	67
2.2.	Modernisation du système GLONASS.....	67
3.	Le système Européen Galileo	68
3.1.	Architecture du système Galileo.....	69
3.1.1.	Segment spatial	69
3.1.2.	Segment contrôle	69
3.1.3.	Segment utilisateur.....	69
3.2.	Les services Galileo	69
3.2.1.	Service ouvert	70
3.2.2.	Service commercial.....	70
3.2.3.	Services de sauvetage et de protection civile.....	70
3.2.4.	Service public réglementé.....	70
4.	Le système chinois Compass /Beidou	70
4.1.	Architecture du système Compass.....	71
4.1.1.	Secteur spatial	71
4.1.2.	Secteur contrôle	71
4.1.3.	Secteur utilisateur BeiDou	71
4.2.	Les services BeiDou	71
4.2.1.	Service public.....	71
4.2.2.	Service réservé	72
5.	Interopérabilité entre les systèmes.....	72
6.	Mise à jour des données pour refléter les avancées récentes des systèmes GNSS.....	74
	Références bibliographiques	75

Liste des figures

CHAPITRE I : GENERALITES - MESURE DE LA LOCALISATION	
Figure I 1. Les différentes formes utilisées pour la représentation de la terre	3
Figure I 2. Forme de la terre.....	4
Figure I 3. Géoïde et ellipsoïde	5
Figure I 4. Schéma simplifié du Géoïde et ellipsoïde	6
Figure I 5. Ellipsoïdes local et global.....	7
Figure I 6. Système géodésique.....	8
Figure I 7. Datum vertical	9
Figure I 8. La projection d'un même point pour différents Datums	11
Figure I 9. Système géodésique mondial (WGS84).....	11
Figure I 10. Système de coordonnées géographiques	12
Figure I 11. Repère du système ECEF	13
Figure I 12. Système de référence géographique mondial	14
Figure I 13. Projection cartographique.....	14
Figure I 14. Le principe de projection (X et Y sont exprimés en mètre par rapport à l'origine)	15
Figure I 15. Les types de projections	17
Figure I 16. Les fuseaux UTM couvrant le territoire Algérien	18
Figure I 17. Paramètres nécessaires pour la détermination du système de coordonnées	19
CHAPITRE II : PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DES DISPOSITIFS GNSS	
Figure II 1. Phase d'opérationnalité des différents GNSS existants.....	21
Figure II 2. Position par rapport à un satellite.....	22
Figure II 3. Précision de la position avec deux satellites	22
Figure II 4. Position exacte du récepteur avec quatre satellites	22
Figure II 5. Principe pour calculer la distance entre le satellite et le récepteur.....	23
Figure II 6. Les paramètres Képlérien.....	26
Figure II 7. Echelle du temps. Le temps de référence est la TAI.....	27
Figure II 8. Allure du code émis par un satellite GNSS.....	28
Figure II 9. Modulation du signal par la phase à l'aide du code.....	29
Figure II 10. Mesure du code	31
Figure II 11. Corrélacion des codes reçus et générés par un récepteur.....	31
Figure II 12. Ambiguïté sur la mesure de code	32

Figure II 13. Mesure de phase	33
Figure II 14. Conservation de l'ambiguïté de phase lors du suivi de signal en provenance d'un satellite	34
Figure II 15. Suivi d'un satellite avec conservation de l'ambiguïté entière	34
Figure II 16. Modèle d'antenne émettrice : Centre des masses, repère local, position du centre de phase et variation du centre de phase	39
Figure II 17. Troposphère et ionosphère	40
Figure II 18. Evolution du retard troposphérique avec l'élévation du satellite au-dessus de l'horizon.....	42
Figure II 19. Trajet multiple.....	43
Figure II 20. Modèle d'antenne ARP, PCO et PCV	44
Figure II 21. Polarisation circulaire droite	45

CHAPITRE III : UTILISATION DU GNSS POUR LE POSITIONNEMENT

Figure III 1. Positionnement absolu et relatif.....	48
Figure III 2. Interprétation géométrique des facteurs de dilution de précision	49
Figure III 3. Position DGNSS : LADGNSS (à gauche) et WADGNSS (à droite)	52
Figure III 4. Simple différence entre des récepteurs i et j	52
Figure III 5. Double différence entre des récepteurs i et j et des satellites k et l	53
Figure III 6. Triple différence entre récepteurs i et j, des satellites k et l, à des époques t_n et t_m	53
Figure III 7. Positionnement RTK.....	55
Figure III 8. Les différentes méthodes de NRTK. Les étapes suivant les flèches vides sont réalisées au niveau des serveurs ; Les étapes suivant les flèches pleines au niveau du récepteur mobile.....	57

CHAPITRE IV : LES PRINCIPAUX GNSS

Figure IV 1. Importance du système GPS suivant les domaines d'utilisation.....	58
Figure IV 2. Les différentes stations pour le secteur contrôle (http://www.faa.gov).....	59
Figure IV 3. Principe de fonctionnement pour le secteur contrôle	60
Figure IV 4. Distribution des canaux GNSS	73

Liste des Tableaux

CHAPITRE I : GENERALITES - MESURE DE LA LOCALISATION

Tableau I 1. Les principaux ellipsoïdes.....	6
Tableau I 2. Exemples de Datums.....	10

CHAPITRE II : PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DES DISPOSITIFS GNSS

Tableau II 1. Synthèse des différentes erreurs	47
--	----

CHAPITRE III : UTILISATION DU GNSS POUR LE POSITIONNEMENT

Tableau III 1. Différentes stratégies de positionnement différentiel par GNSS	51
---	----

CHAPITRE IV : LES PRINCIPAUX GNSS

Tableau IV 1. Différentes générations des satellites GPS.....	62
Tableau IV 2. Les différentes fréquences du système GPS	63
Tableau IV 3. Les différents codes du système GPS utilisables fin 2010.....	64
Tableau IV 4. Différentes générations des satellites GLONAS	68
Tableau IV 5. Les fréquences des signaux Galileo	69
Tableau IV 6. Comparaison entre les systèmes GNSS	73

Introduction

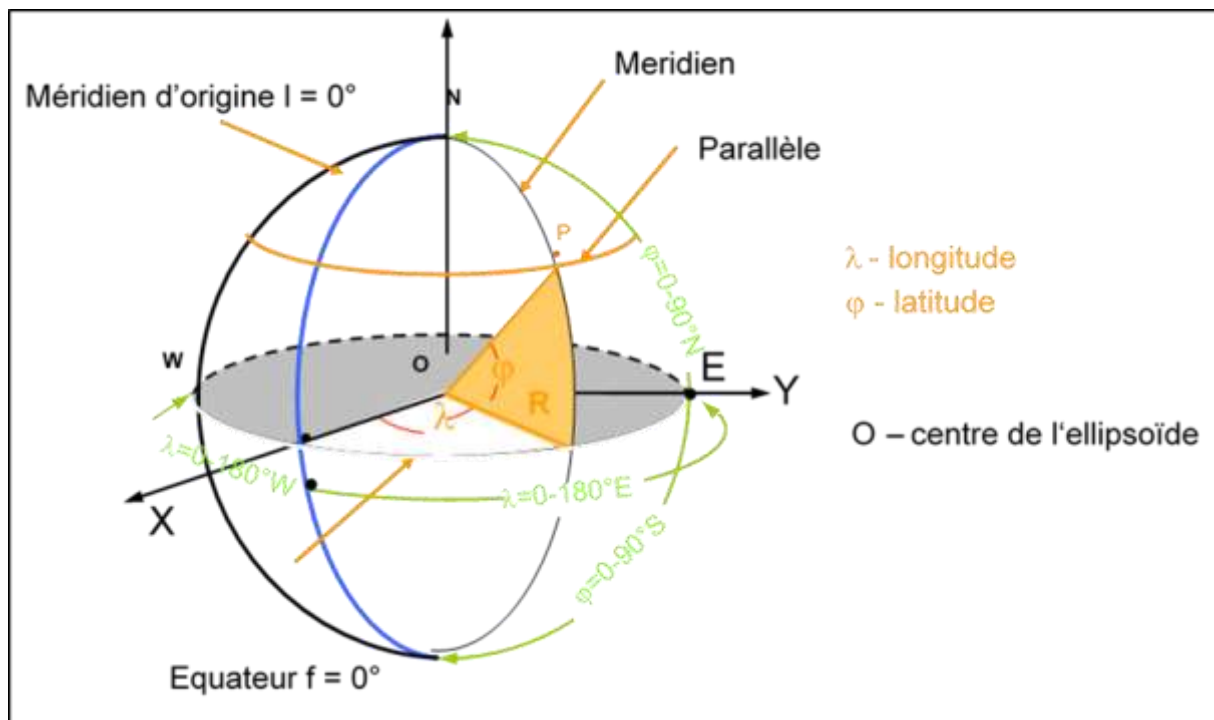
Depuis l'aube de la civilisation, l'une des plus grandes questions posées par l'homme est « comment trouver un chemin ou un endroit ». Au début l'homme a regardé le ciel pour chercher des signes porteurs qui lui aident à trouver son emplacement ou bien à trouver la route vers sa destination. Certains hommes sont devenus des experts pour déchiffrer le mystère des étoiles et ils développèrent des règles pour se localiser en fonction de leur emplacement. Après cette première génération qui utilise des ressources naturelles pour se localiser, la première appareil artificiel utilisée pour les mêmes raisons est la boussole. Selon les chinois, elle a été découverte et utilisée dans les guerres pendant le brouillard durant la préhistoire. Dans l'ère de la civilisation islamique, Mariam Al-Ijliya, la fondatrice des sciences dédiées à la localisation, a développé et fabriqué l'astrolabe, un instrument astronomique et de navigation. Pendant le 10^{ème} siècle, cet instrument a été utilisé pour déterminer la position du soleil et des planètes et ont été à leur tour utilisés dans les domaines de l'astronomie, l'astrologie et l'horoscope. Les musulmans l'ont utilisé pour trouver la Qibla, déterminer les temps des prières et les jours de départ du Ramadan et de l'Aïd (*Langley et al., 2017*).

Dans notre ère, exactement après 1957 après le lancement du premier satellite Spoutnik, qui a été un important progrès technologique. Les scientifiques dans le monde ont essayé de savoir si le décalage Doppler dans le signal diffusé par un satellite pourrait être utilisé comme un observable pour déterminer la distance entre le satellite et un récepteur. Cette idée a donné naissance à une nouvelle génération de satellites utilisés dans la navigation appelée GNSS (Global Navigation Satellite System). Le système mondial de navigation par satellite est le terme standard utilisé pour définir les systèmes qui utilisent les satellites pour la navigation « **navsat** ». Un tel système permet aux récepteurs électroniques de déterminer leur emplacement sur la terre : Longitude, latitude et altitude, avec une précision de quelques mètres en utilisant les temps de transmission des **signaux radio** le long d'une ligne entre un récepteur et **plusieurs satellites**. Les systèmes peuvent également fournir la vitesse et des informations sur le temps. L'historique des systèmes de navigation par satellite commence dans **les années 70** lorsque le premier système qui est le système GPS est développé. L'évolution dans cette catégorie des services donne la naissance à d'autres systèmes à l'image du système Russe GLONASS, Européen Galileo et chinois BeiDou. Le GNSS devient une technologie indispensable dans la société d'aujourd'hui associée avec l'Internet et les communications mobiles. En effet, ces systèmes permettent de développer plusieurs applications que nous utilisons dans une gamme de services tels que la navigation, le positionnement, la sécurité publique et la surveillance, les enquêtes géographiques, la cartographie, sans oublier les informations météorologiques et

atmosphériques se basant sur l'utilisation des [satellites avec orbite terrestre basse \(LEO\)](#) (*Polischuk et al., 2002; Kumar et al., 2021*).

Le système GNSS a connu plusieurs développements en plus des progrès dans les techniques de traitement des signaux manipulés dans les récepteurs, ce qui améliore la précision au cours de la dernière décennie. Le principal progrès est l'utilisation des récepteurs logiciels au lieu des anciens récepteurs qui sont des appareils électroniques basés sur des circuits pour la réalisation des traitements des signaux reçus. Cette nouvelle génération des récepteurs GNSS complètement orientée logiciel est basée sur l'utilisation de ce que nous appelons les techniques **SDR : Software Define Radio**. Un des principaux avantages d'un récepteur software est la flexibilité de la conception qui permet de reconfigurer le logiciel pour utiliser un autre signal ou bien même un autre algorithme. L'autre avantage est la possibilité d'utiliser différents systèmes GNSS pour donner une solution plus précise. La première mise en œuvre complète d'un récepteur du système de positionnement global (GPS) par cette technologie a été décrite par *Akos (1997)*.

Généralités : Mesure de la localisation



A la fin de ce chapitre l'étudiant sera capable de :

- Connaître la forme de la terre ;
- Définir le système géodésiques (DATUM) ;
- Déterminer les coordonnées géographiques (Le système de référence géographique) ;
- Maîtriser la projection cartographique.

1. Généralités

1.1. Distinction entre Géodésie, topométrie et topographie

La topographie est l'art de représenter les détails artificiels ou naturels de la surface terrestre

La topométrie est l'art de la mesure qui assigne aux détails en question une place dans l'espace.

La topométrie n'est qu'un moyen pour arriver à la rédaction de la topographie. Elle est donc utilisée pour le positionnement X, Y et Z dans tous les domaines.

La représentation topographique est le plus souvent réalisée par projection orthogonale sur un plan horizontal ou vertical.

Lorsque les questions fondamentales liées à la forme de la terre sont prises en compte, on parle de **géodésie (topométrie selon les dimensions de site)**

Géodésie : La science qui étudie la forme de la terre et la mesure des dimensions de la terre ainsi que sa représentation sous forme de plans, de cartes et des profils. Quatre modèles de représentation existent : Le plan, la sphère, l'ellipsoïde et le **Géoïde (Brezinski, 2005)**.

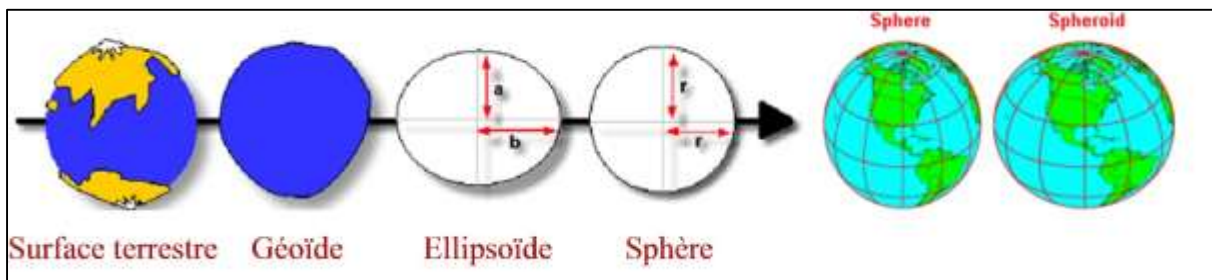


Figure I 1. Les différentes formes utilisées pour la représentation de la terre

1.2. Définitions et notions de base :

Surface terrestre : interface entre la géosphère et l'atmosphère, de forme et d'altitude irrégulières (Brezinski, 2005).

Géoïde : surface réelle d'altitude 0, c'est-à-dire une "surface équipotentielle du champ de pesanteur" (Denègre and Salgé, 1996). Les surfaces sur lesquelles le potentiel de pesanteur est constant sont appelées surfaces équipotentielles. La surface moyenne des océans est une surface équipotentielle. Ainsi le géoïde correspond à la surface moyenne des océans. En fait, cette surface est difficilement accessible. Même sur les océans, où la houle, les marées peuvent être moyennées, les différences de température, de salinité, les vents, peuvent modifier le niveau moyen. Sous les continents, le géoïde n'est défini que d'une façon indirecte.

Ellipsoïde ou sphéroïde : surface mathématique constituée par sphère de révolution aplatie aux pôles. L'ellipsoïde de révolution ("sphère aplatie aux pôles") est un modèle mathématique que l'on définit pour qu'il soit le plus près possible du géoïde. Il existe de nombreux modèles d'ellipsoïdes.

Point fondamental : c'est le point de tangence du géoïde et de l'ellipsoïde utilisé par un pays en particulier. C'est le point géodésique auquel on attribue des coordonnées et qui est le point de départ et la base de la géodésie d'un pays (Brezinski, 2005).

Déviaton de la verticale : c'est l'écart angulaire en un point entre la normale de l'ellipsoïde et la verticale physique (ou normale du géoïde). Cette dernière est la direction du fil à plomb.

Le méridien : on appelle méridien, les lignes d'intersection de la surface de l'ellipsoïde par les plans passant par l'axe de rotation (PP'). Le méridien de référence ou d'origine est un plan imaginaire constitué par une ellipse passant par Greenwich (Angleterre).

Le parallèle : on appelle parallèle, les lignes d'intersection de la surface de l'ellipsoïde par des plans perpendiculaires à l'axe de rotation. Le parallèle dont le plan passe par le centre de l'ellipsoïde s'appelle : l'équateur.

Altitude absolue : on appelle altitude absolue d'un point si son altitude est comptée par rapport au niveau zéro (Géoïde) ; par convention, sur terre ce niveau est le plus souvent le niveau de la mer. En Algérie, les altitudes absolues ont été calculées à partir du niveau zéro de la mer mesurais au port de "Goulette" en Tunisie (Denègre and Salgé, 1996; Otmane et al. 2015).

Altitude relative : on appelle altitude relative d'un point si son altitude est comptée à partir d'une surface d'un niveau fictive.

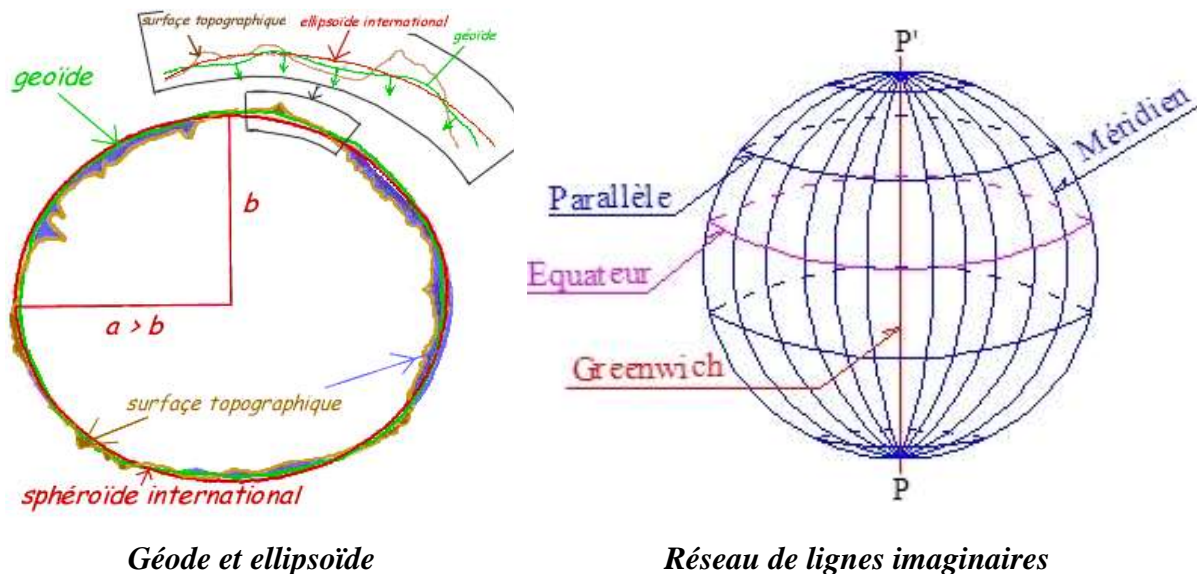


Figure I 2. Forme de la terre

1.3.Géoïde et ellipsoïde

Le calcul de la position avec précision est le problème majeur pour les systèmes de localisation. Cette limitation de performance est causée par plusieurs phénomènes, le principal problème concerne *la forme de la terre*, qui n'est pas une sphère parfaite.

La forme générale de la terre est donnée par la surface physique constituée par l'ensemble des mers, océans et montagnes (continents). Le géoïde étant une surface physique, **il est impossible de l'utiliser par les calculs mathématiques, c'est pourquoi que nous sommes obligés de choisir une autre référence (doit être une surface géométrique) qui se rapproche le plus possible de la surface de ce géoïde, c'est l'ellipsoïde de révolution terrestre (Li and Götze, 2001).**

Un point quelconque est repéré par rapport à l'ellipsoïde en utilisant la verticale et les coordonnées sphériques (longitude, latitude, altitude ; Degrés, minutes, secondes ; Degrés décimaux ; Grades). Mais la surface équipotentielle pour la gravité (le géoïde) ne coïncide pas avec l'ellipsoïde de révolution : la verticale n'est pas normale à l'ellipsoïde, mais au géoïde (Fig. I 3).

La position absolue de l'ellipsoïde de référence est déterminée en fonction de la verticale passant par le point fondamental. **La forme de l'ellipsoïde est choisie de manière à correspondre localement à la forme de la Terre.**

En général, le centre de l'ellipsoïde ainsi défini ne coïncide pas avec le centre des masses de la Terre.

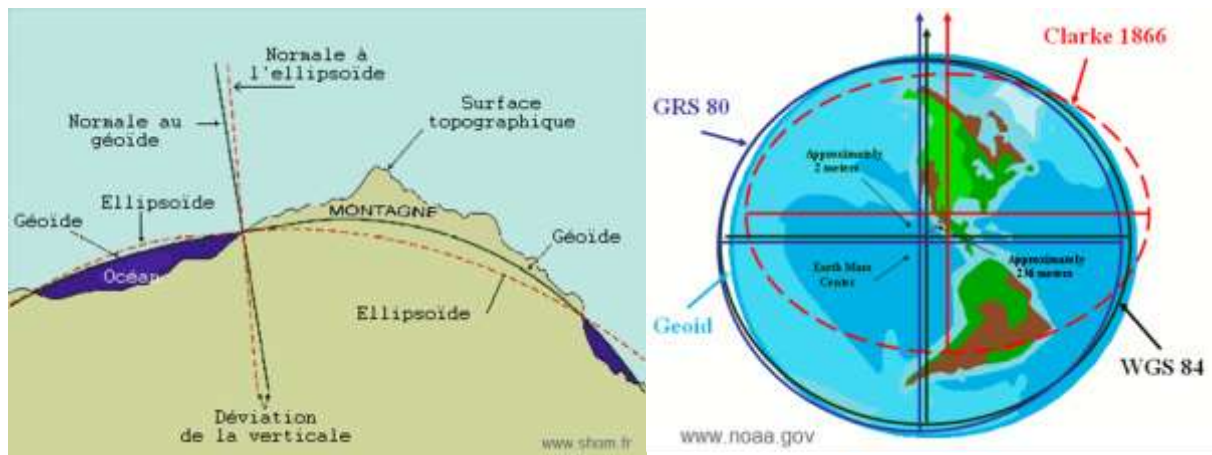


Figure I 3. Géoïde et ellipsoïde

1.4. Ellipsoïdes

L'ellipsoïde de révolution est un modèle mathématique de la Terre produit par la rotation d'une ellipse autour de son petit axe (Brezinski, 2005). Ce modèle est utilisé pour exprimer des coordonnées géographiques et effectuer des calculs de positionnement et de distance. La forme et les dimensions d'un ellipsoïde sont définies par deux paramètres, les longueurs du demi-petit axe « b » et du demi-grand axe « a ».

La forme d'un ellipsoïde de référence peut être également définie par son aplatissement :

$$f = \frac{a-b}{a} \tag{I. 1}$$

Ou son excentricité :

$$e = \sqrt{\frac{a^2-b^2}{a^2}} = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}} \tag{I. 2}$$

Un autre paramètre parfois utilisé pour caractériser l'ellipsoïde de référence est la seconde excentricité e', qui est défini comme suit :

$$e' = \sqrt{\frac{a^2-b^2}{b^2}} \tag{I. 3}$$

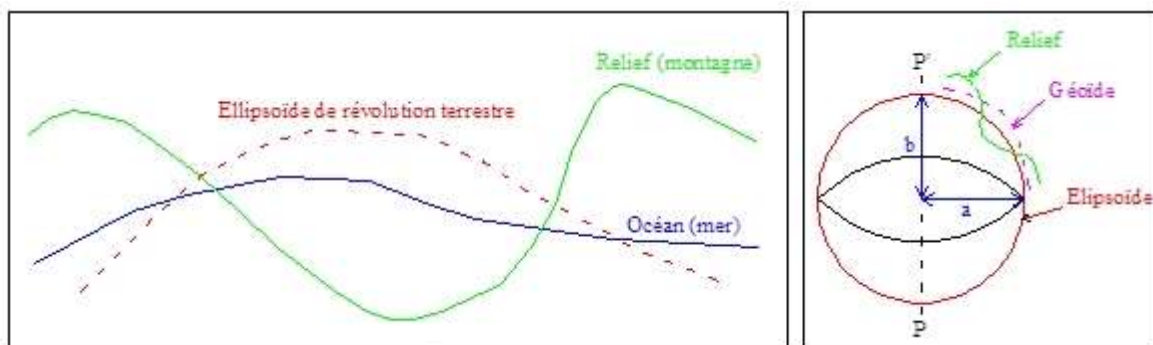


Figure I 4. Schéma simplifié du Géοide et ellipsoïde

Actuellement et à partir des satellites, les mesures donnent : a = 6 378,160 km ; b = 6 356,775 km ; α = 1/298,25 (ce sont les éléments de l'ellipsoïde international).

Tableau I 1. Les principaux ellipsoïdes (Donnay, 2012)

Name	Equatorial axis (m)	Polar axis (m)	Inverse flattening,
Airy 1830	6 377 563.4	6 356 256.9	299.324 975 3
Clarke 1866	6 378 206.4	6 356 583.8	294.978 698 2
Bessel 1841	6 377 397.155	6 356 078.965	299.152 843 4
International 1924	6 378 388	6 356 911.9	297
Krasovsky 1940	6 378 245	6 356 863	298.299 738 1
GRS 1980	6 378 137	6 356 752.3141	298.257 222 101
WGS 1984	6 378160	6 356,775	298.257 223 563
Sphere (6371 km)	6 371 000	6 371 000	

1.4.1. Ellipsoïdes globaux

Les ellipsoïdes globaux modélisent l'ensemble du géoïde avec une précision moyenne (par exemple, IAG GRS 1980 ou WGS84). Ils sont utilisés pour des cartographies couvrant l'ensemble (ou une grande partie) de la surface terrestre. L'avènement des satellites a permis de mesurer la position du centre des masses et la forme du géoïde avec de plus en plus de précision. Il en résulte la définition de nouveaux **Datums**, globaux. Le centre de l'ellipsoïde coïncide avec le centre des masses de la Terre (WGS 65, WGS 72, WGS 84).

1.4.2. Ellipsoïdes locaux

Les ellipsoïdes **locaux** modélisent précisément une zone géographique particulière et ne peuvent pas être utilisés en dehors de cette zone (Clarke 1880 IGN (NTF)) (Fig. 4). Ils sont définis de manière à "épouser" au mieux la forme du géoïde sur une zone restreinte de la surface terrestre (une région ou un pays). La forme de l'ellipsoïde est choisie de manière à correspondre localement à la forme du géoïde (mesures terrestres).

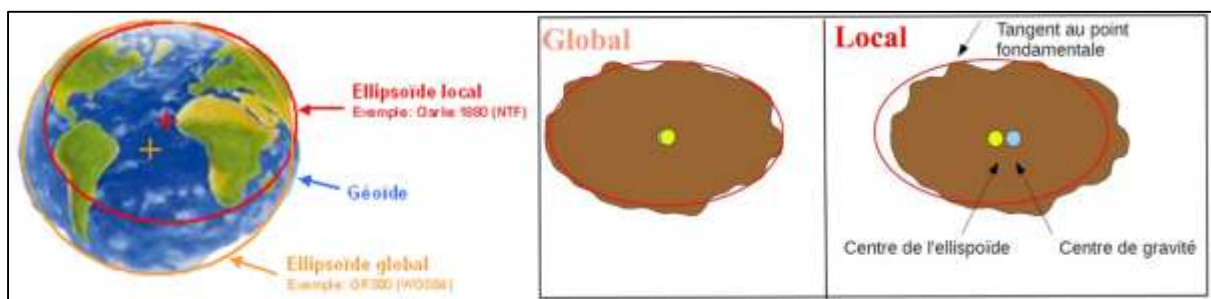


Figure 15. Ellipsoïdes local et global (Donnay, 2012)

2. Système géodésiques (Datum)

2.1. Datum horizontal

La position d'un point à la surface de la terre et sur sa carte représentative, est obtenue en faisant référence à un **système géodésique** donné, encore appelé "**Datum**" par les anglo-saxons (Fig. 6). Ce système géodésique repose sur la définition de deux types de références (*Papo and Perelmuter, 1988*) :

- Une surface moyenne représentant une surface terrestre moyenne idéale, le sphéroïde ou **ellipsoïde de référence** pour le pays, le continent ou même la terre entière.
- Des références pour les **coordonnées géographiques, horizontales** (parallèles et méridiens (l'équateur et le méridien de greenwich) et **verticale** (niveau de référence : la hauteur d'eau moyenne de la mer à un endroit donné).

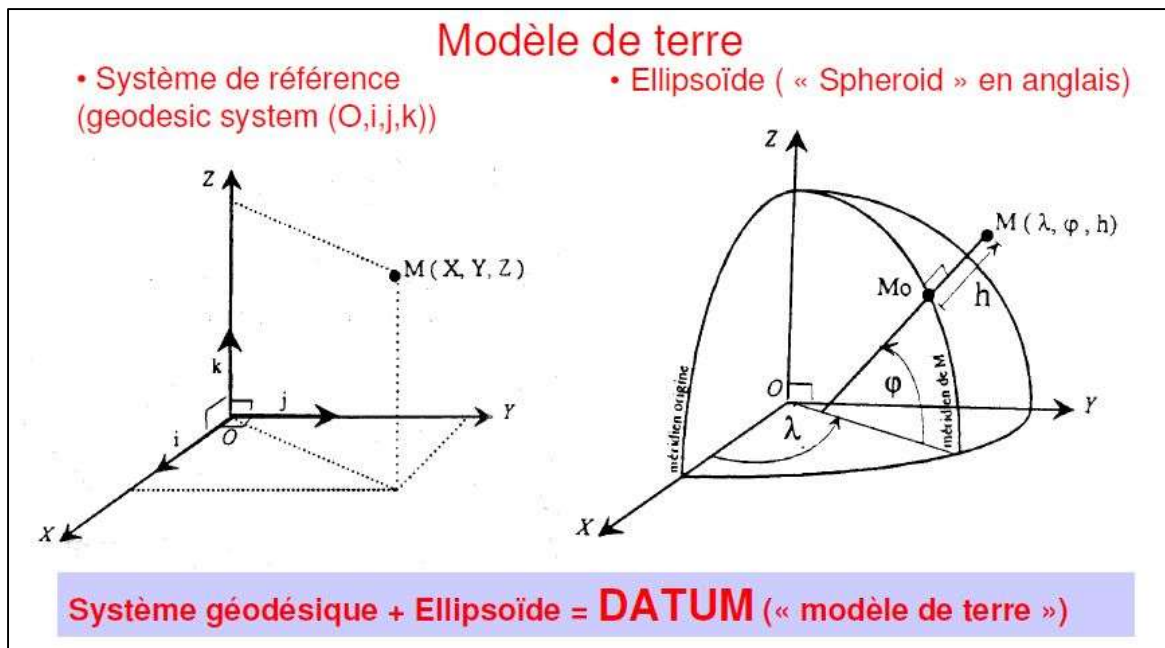


Figure I 6. Système géodésique

Alors, pour un système de référence géographique (Datum), il faut :

- **Origine** (position par rapport au centre de la Terre) et orientation des axes (axes des pôles et méridien d'origine).
- Un point fondamental à la surface de la terre et l'azimut du nord et le méridien d'origine. + Ellipsoïde décrit par son demi-grand axe et aplatissement.

Pour un système de référence global, on précise l'origine du centre et l'ellipsoïde qui approxime au mieux le géoïde à l'échelle globale. Par contre, pour un système de référence local, on précise le point fondamental ou l'ellipsoïde est proche du géoïde en ce point.

2.2.Datum vertical (Altitudes)

Contrairement au Datum horizontal qui indique le système de référence pour les mesures de localisation de la longitude et de la latitude après projection sur l'ellipsoïde, on parle de Datum vertical ou de **référentiel altimétrique** pour la mesure de **la hauteur du point**, avant projection sur l'ellipsoïde.

La définition de l'origine se réfère habituellement au niveau moyen de la mer pour un point, origine du Datum vertical. Le niveau moyen est souvent calculé à partir de la moyenne du niveau de la mer et des vagues sur de nombreuses années. Il est alors local (exemple : Marseille). L'altitude peut être définie :

- Par rapport au **géoïde** (équipotentielle proche du niveau moyen des mers) : **Altitude ortho-métrique**.
- Par rapport à l'**ellipsoïde** de référence (altitude GPS par exemple) : **Altitude ellipsoïdale**.

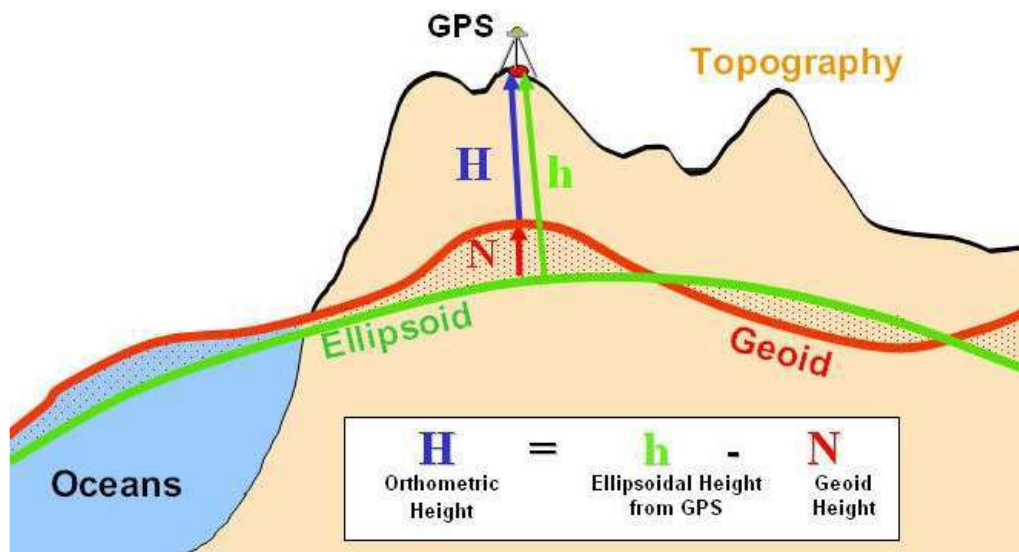


Figure I 7. Datum vertical

L'altitude du géoïde par rapport à l'ellipsoïde peut varier de plus de 100m environ à l'échelle du globe. Pour une altitude précise :

- Il faut savoir de laquelle on parle.
- Il faut connaître le géoïde ou l'ellipsoïde.

2.3.Exemples de Datums

Les Datums RGF 1993, ETRS89 et WGS84 sont compatibles pour l'essentiel des applications (Tabl. I 2). En effet, ETRS89 est fixé en Europe, et est recommandé pour les applications de précision métrique en Europe. ETRS89 dérive par rapport à WGS84.

Tableau I 2. Exemples de Datums (Lambeck, 1971)

Nouvelle triangulation de la France (NTF)	Officiel jusqu'en décembre 2000 ; la plupart des cartes de l'IGN sont toujours dans ce système, basé sur l'ellipsoïde Clarke 1880 IGN. Le point fondamental est au Panthéon à Paris. L'Ellipsoïde Clarke 1880 IGN (Ellipsoïde associé au système NTF) est défini par les constantes suivantes (valeurs exactes) : demi grand axe ($a=6378249.2\text{m}$) et demi petit axe ($b=6356515.0\text{m}$)
Réseau géodésique français (RGF) 1993	France, basé sur l'ellipsoïde IAG-GRS80. Officiel depuis 2000. L'Ellipsoïde IAG GRS 80 (Ellipsoïde associé au système RGF93) est défini par les constantes suivantes (valeurs exactes) : demi grand axe ($a=6378137.0\text{m}$) et aplatissement ($f=1/298.257222101$)
European Datum (ED) 50	Système européen, basé sur l'ellipsoïde Hayford 1909. Anciennement utilisé en Europe, est défini par les constantes suivantes (valeurs exactes) : demi grand axe ($a=6378388.0\text{m}$) et aplatissement ($f=1/297$)
ETRS89 : basé sur IAG-GRS80	Officiel en Europe.
World Geodetic System (WGS84)	Système mondial (pas de point fondamental), mis au point par le Département de la Défense des États-Unis et utilisé par le GPS, basé sur l'ellipsoïde WGS84. Peu Précis. Une version précise existe : ITRS

2.4.Relation entre Datums

Les latitudes et longitudes sont différentes dans tous les systèmes (Datums), plusieurs centaines de mètres quand on a parlé des anciens systèmes (comme NTF). De plus ces systèmes bougent les uns par rapport aux autres à cause de la dérive des continents et le fait que certains ont un point local.

Alors, quand on donne ou reçoit des *latitudes, longitudes, il faut toujours préciser ou connaître le système de référence*. Une position exprimée en longitude-latitude-altitude se réfère à un système géodésique ou Datum. Pour être comparées, les positions doivent être toutes **exprimées dans le même système géodésique**. La grande majorité des SIG impose un Datum unique pour l'ensemble du jeu de données (Lambeck, 1971).

En effet, les différences entre coordonnées d'un même point exprimées dans **deux datums différents** peuvent être de **l'ordre de plusieurs centaines de mètres, après projection** (Fig. 8).

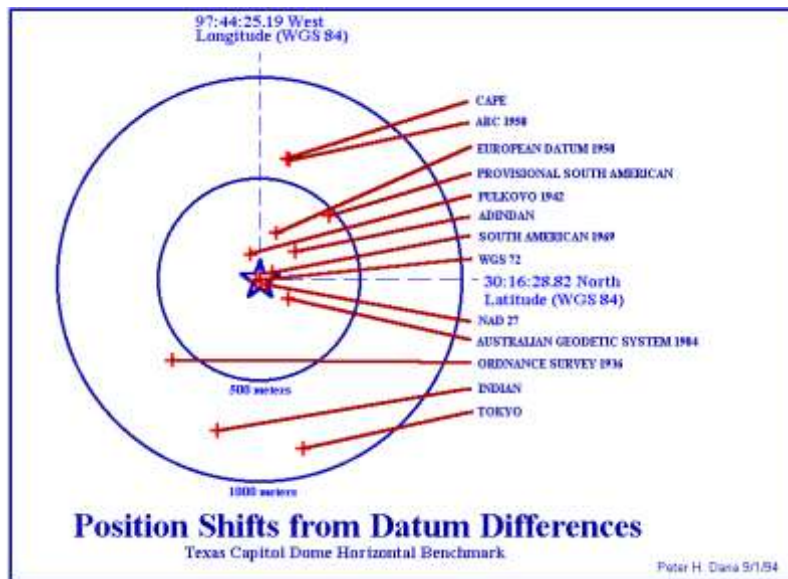


Figure I 8. La projection d'un même point pour différents Datums

Des opérations mathématiques sont disponibles pour passer d'un Datum à un autre, si l'on connaît la position relative des deux ellipsoïdes de références. En pratique, on utilise souvent le Datum global WGS84 comme référence pour passer d'un Datum à un autre. Les différences sont en général de l'ordre d'une centaine de mètres (Lambeck, 1971).

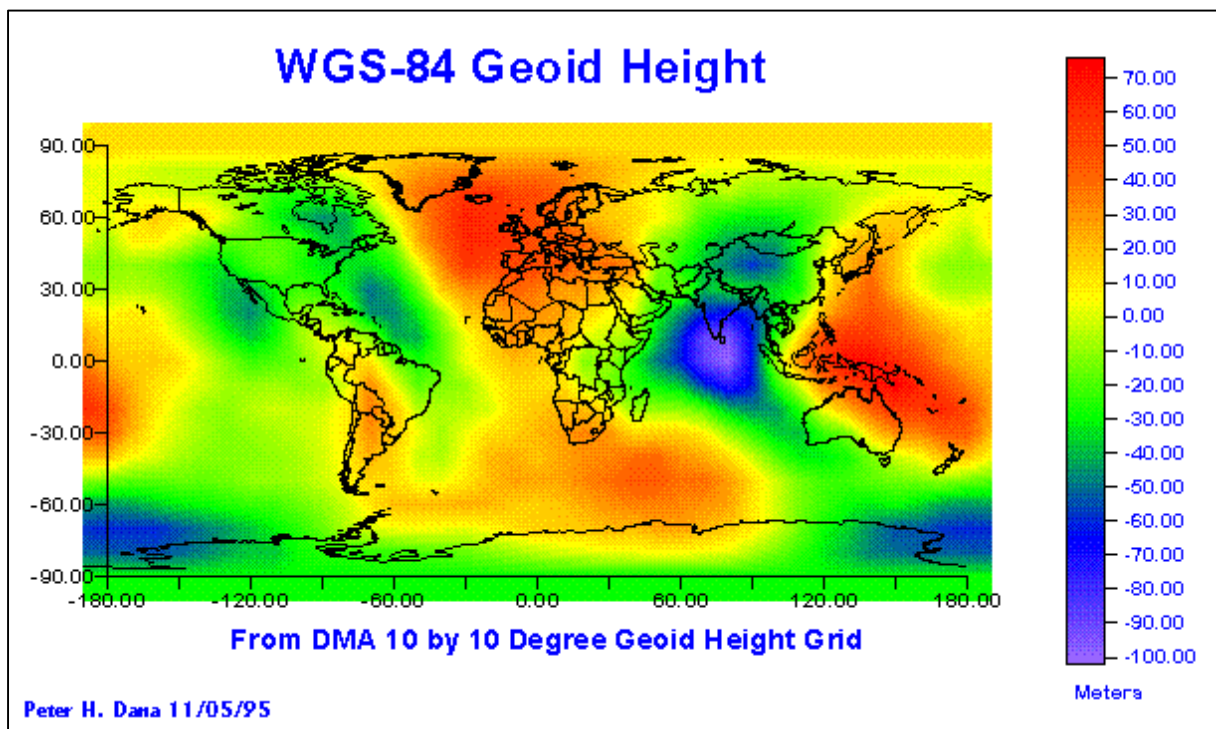


Figure I 9. Système géodésique mondial (WGS84)

Pourquoi changer de système (Datum)? Rattachement à un même système légal de coordonnées ; favoriser les échanges de données ; Système mondial (WGS84) ; Compatibilité avec les systèmes spatiaux (GPS, Galileo...).

3. Système de Coordonnées Géographiques

Le système de coordonnées géographiques qui sert de référence pour la localisation de tout point de la surface du globe est constitué par un réseau de lignes orthogonales, il s'agit des parallèles et des méridiens.

Tout point "M" de la surface du globe peut être projeté sur l'ellipsoïde en un point P et défini par l'intersection d'un méridien et d'un parallèle. On dit, donc, le point "M" est défini par deux coordonnées dites géographiques (longitude et sa latitude) (Fig. I 10) :

- La **longitude** : c'est l'angle (λ) formé par le méridien du point "M" et le méridien origine (méridien international de Greenwich) (Fig. 12) ;
- La **latitude** : c'est l'angle (φ) que fait la verticale du point "M" avec le plan de l'équateur (Denègre & Salgé 1996).

De plus, on détermine deux altitudes :

- L'altitude H au-dessus du niveau de la mer (au-dessus du géoïde)
- L'altitude h qui est la distance à l'ellipsoïde

DATUM + Origine + Unités = **Système de coordonnées géographiques**
(Geographic Coordinate System (« GCS »))

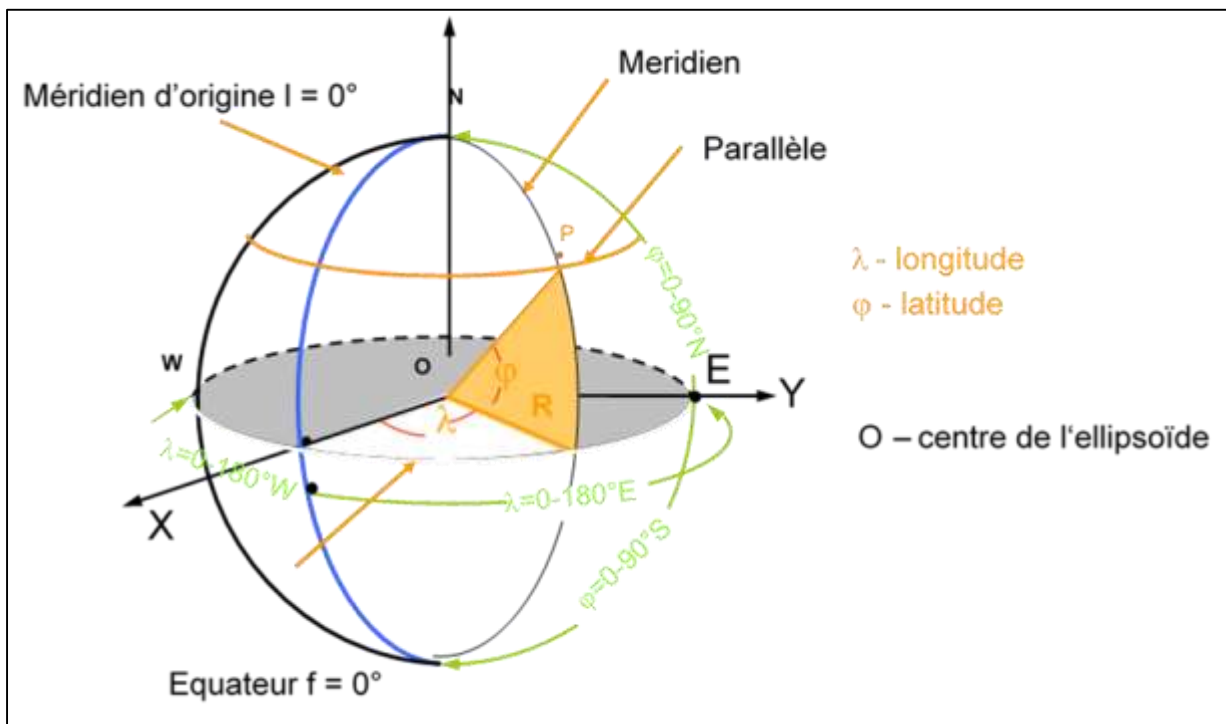


Figure I 10. Système de coordonnées géographiques (Donnay, 2005)

3.1. Les coordonnées cartésiennes géocentriques ECEF (Earth-Centred, Earth-Fixed)

Contrairement aux coordonnées géographiques qui sont définies en mesures angulaires (φ et λ) par rapport à un ellipsoïde, les coordonnées cartésiennes géocentriques sont définies dans un repère orthonormé comportant 3 axes (X, Y, Z) dépend de l'origine. L'origine de ce repère (0, 0, 0) c'est le centre de la terre ; l'axe Z est orienté vers le pôle et il est perpendiculaire avec le plan équatorial ; l'axe X est donné par l'intersection de l'équateur terrestre et le méridien de Greenwich ; l'axe Y est perpendiculaire avec l'axe X et le plan X-Y coïncide avec le plan équatorial de la Terre.

Ces coordonnées sont utilisées dans les calculs de géodésie spatiale et les calculs de changement de systèmes de référence

Le repère d'une projection est toujours cartésien (orthonormé). L'unité est toujours le mètre (Fig. I 11).

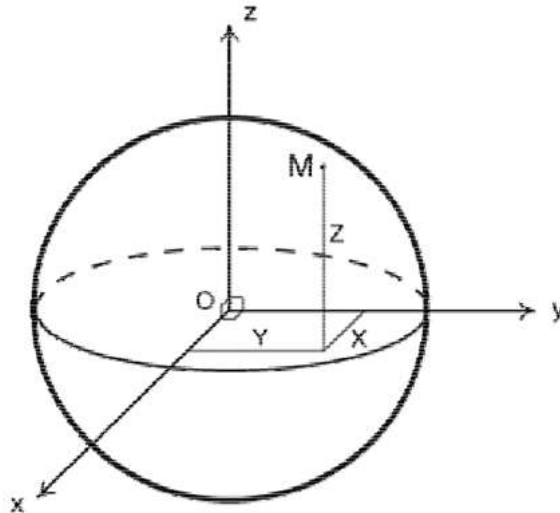


Figure I 11. Repère du système ECEF

3.2. Grille mondiale

Il y a 360° pour faire le tour de la terre, un degré est divisé en 60 minutes divisées en centièmes ou millièmes (autrefois en 60 secondes). Par définition, 1 minute à l'équateur = 1852 mètres. On compte 180° Est vers l'est et 180° Ouest vers l'ouest à partir du méridien de Greenwich. Les parallèles vont de 0° (équateur) à 90° nord vers le pôle nord et 90° sud vers le pôle sud (Fig. I 12).

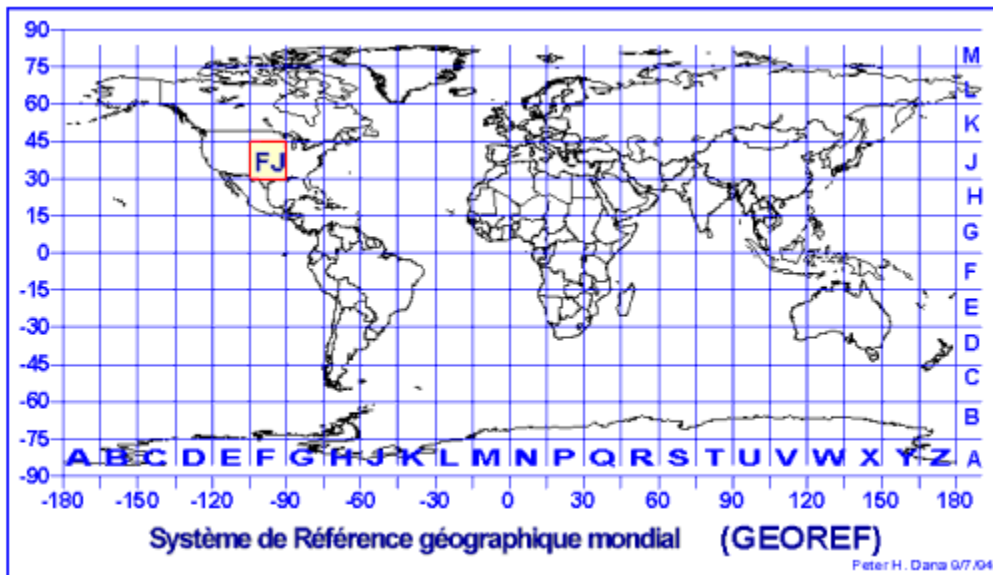


Figure I 12. Système de référence géographique mondial

4. Projections cartographiques

Une projection est une opération mathématique qui permet **de représenter une surface curviligne sur une surface plane**. Permet de représenter la sphère ou l'ellipsoïde sur une surface qui peut être un plan ou déroulable en un plan (cylindre, cône, ...) (Fig. I 13 et I 14).

Mathématiquement : transformation (longitude, latitude) \rightarrow (x, y)

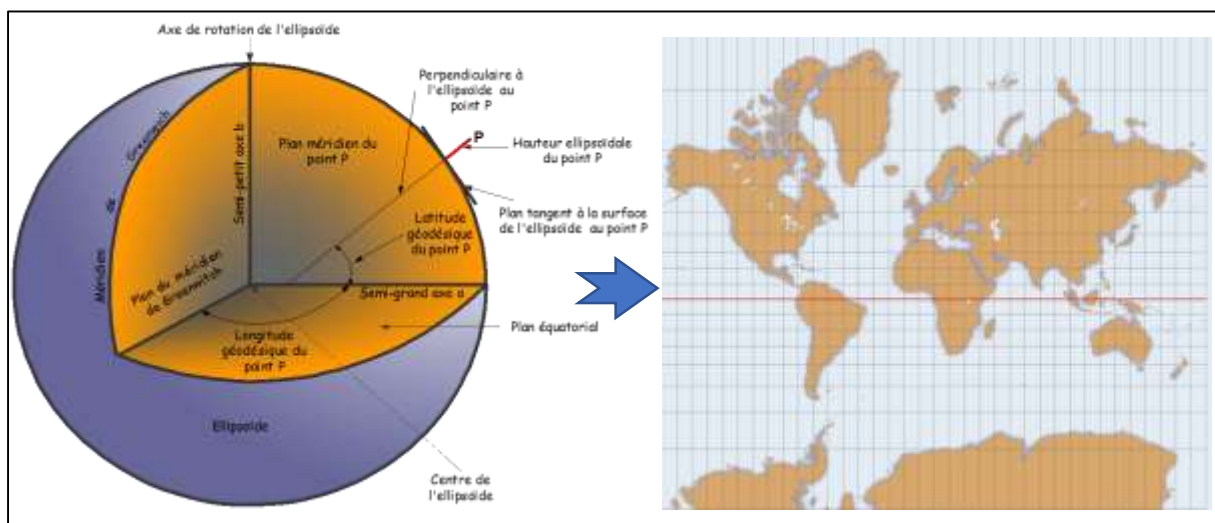


Figure I 13. Projection cartographique (Donnay, 2012)

La projection peut entraîner une altération linéaire correspond à la différence entre la distance curviligne (tenant compte de la rotondité de la terre) et la distance projetée. Par contre, des propriétés géométriques bidimensionnelles peuvent être conservées (Louchet, 2014) :

- Le rapport des **surfaces** (projections **équivalentes**)
- **L'angle** entre deux droites (projections **conformes**)

Impossible de projeter une surface courbe sur un plan sans la déformer, sauf pour une portion dont les plus grandes dimensions ne dépassent guère quelques kilomètres. La géodésie est la science qui a pour but de transformer la surface courbe de l'ellipsoïde en surface plane. A noter aussi que les déformations ne sont pas constantes par rapport à l'origine choisie : certaines projections ne sont utilisées que pour représenter une partie limitée de l'ellipsoïde.

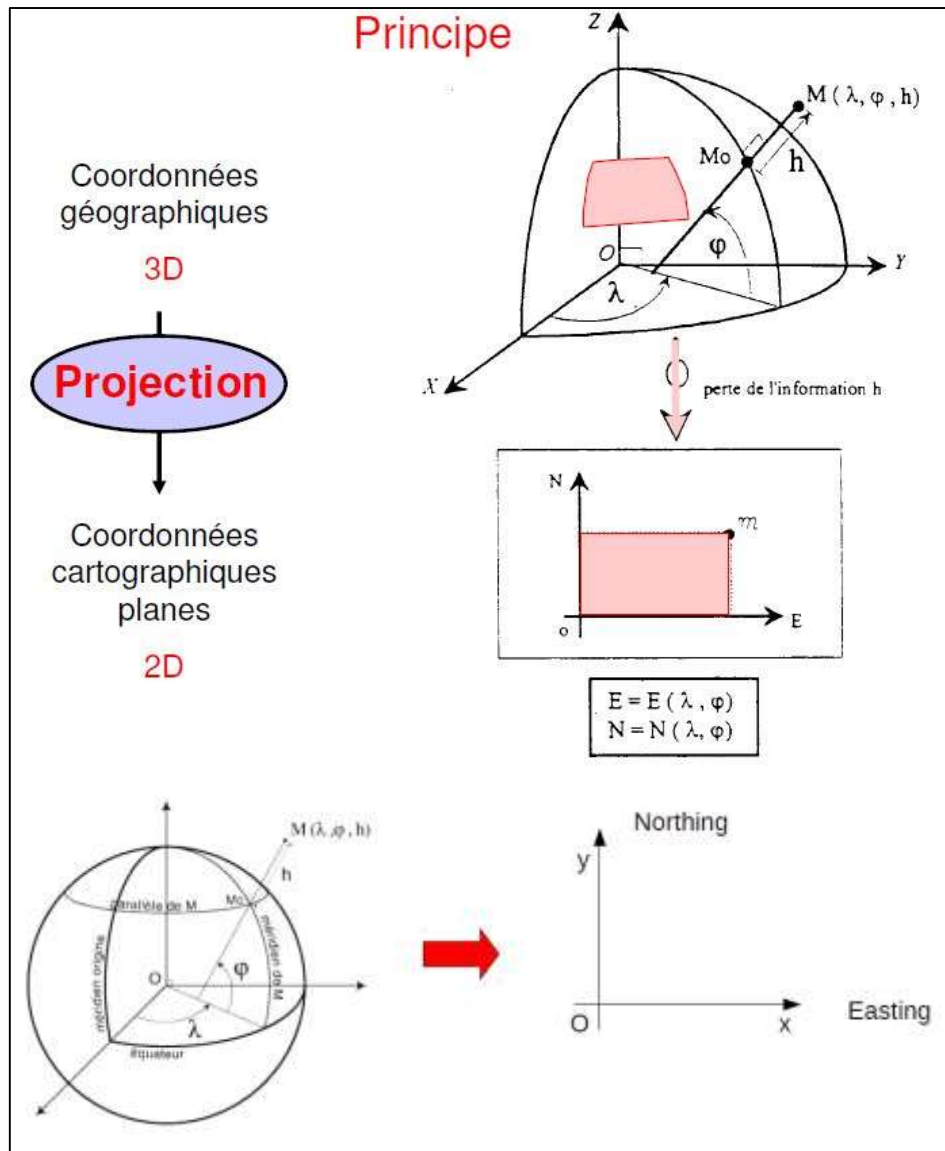


Figure I 14. Le principe de projection (X et Y sont exprimés en mètre par rapport à l'origine)

4.1.L'objectif de la projection cartographique

L'objectif des projections cartographiques est d'obtenir une représentation plane du modèle ellipsoïdal de la surface de la terre. Pour ce faire, il est possible de définir le type et les paramètres d'une projection dans le but de **minimiser certaines déformations**. Pour cela, on utilise plusieurs transformations :

- Soit de **conserver les surfaces**, c'est la projection **équivalente** : Cartes donnant une représentation exacte du monde, à petite échelle.
- Soit de conserver localement les **angles**, c'est la projection **conformes** : donc les caps à suivre en navigation...
- Soit de conserver les **distances** à partir d'un point donné, c'est la projection **équidistante** (Projection aphyllactique ne sont ni conformes, ni équivalents mais peuvent être équidistants), c'est-à-dire conserver les distances sur les méridiens.

Remarque : *Une projection ne peut pas être à la fois conforme et équivalente.*

Le choix d'une projection correspond aux objectifs de la carte : Mesurer des distances entre les objets ; Mesurer des angles entre des directions ; Maintenir les rapports de surface entre les objets

Le calcul de projection utilise la forme de l'ellipsoïde, mais pas sa position absolue. Le Datum n'intervient donc dans le calcul de projection que pour les paramètres de l'ellipsoïde. L'origine du repère de projection est souvent fixée par la définition d'un méridien et/ou d'un parallèle. Beaucoup de projections affectent une valeur non nulle au point d'origine pour éviter d'avoir des coordonnées projetées négatives (Otmane et al. 2024).

4.2. Les types de projection

Il existe un grand nombre de types de projection. Il faut donc choisir la meilleure en fonction de l'application :

- **En fonction de l'étendue de la carte.** Plus l'étendue est grande, plus les déformations sont importantes. Mais souvent, on attend des cartes *de faible étendue d'être très précises.*
- **En fonction du type de traitement / d'affichage** : en statistique : conservation des aires, en navigation : conservation des angles, ...
- **En fonction de la région** (ex : polaire ou non)

Les projections peuvent être classées selon la surface sur laquelle on fait la projection (Fig. I 15) : Les projections cylindriques ; Les projections coniques ; Les projections azimutales (sur un plan) ; Les projections uniques (toutes les autres), il n'y a pas nécessaire de surface d'ailleurs. Chacune peut être en plus : normal, transverse, oblique.

Remarque : Cette classification ne donne pas suffisamment d'information pour caractériser complètement un type de projection.

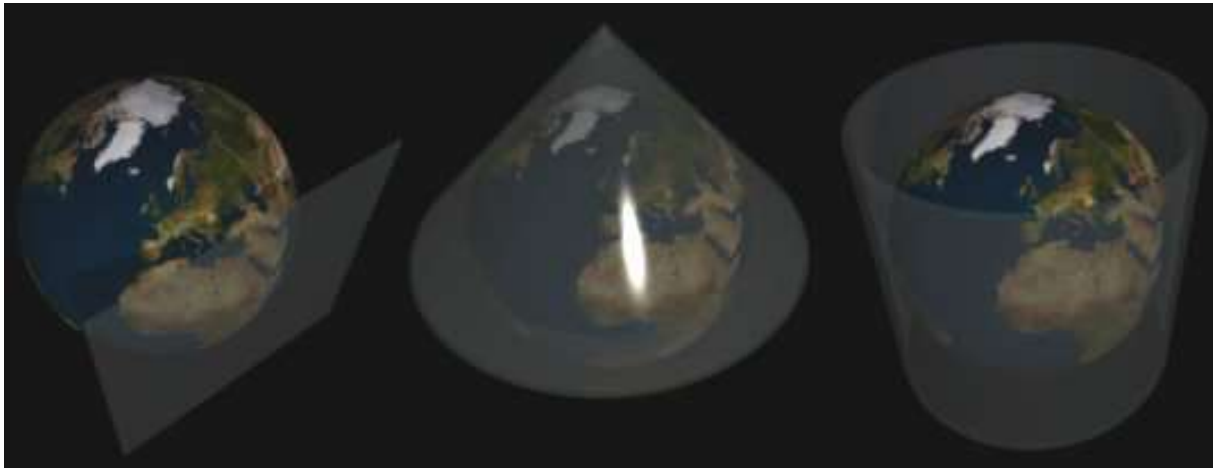


Figure I 15. Les types de projections

4.3.Exemples de projection

4.3.1. Transverse Mercator projection (Conforme) :

Projection à la base du système Universal Transverse Mercator (UTM), parmi ses avantages. :

- Un type de projection adaptée aux cartes à haute échelle (fine résolution) : Transverse Mercator ;
- Les paramètres de la projection (centre) sont variables sur le globe pour chaque zones “prédéfinies”.

Il y a 20 bandes de latitude (entre 84°N – 80°S) et 60 bandes en longitude (1200 Zones). La plupart des zones sont régulières. Quelques exceptions. UTM découpe le globe en zones de 6 degrés en longitude (360/6 = 60 zones pour l’ensemble de la Terre). A chaque zone correspond un méridien central qui fixe l’origine en x de la projection. La valeur à l’origine (sur le méridien central) est de 500 000 (Langley, 1998).

UTM est *Universal* car la projection peut être utilisée pour toutes les longitudes et toutes les latitudes, sauf près des pôles.

Une coordonnée UTM s’exprime par : Numéro de la zone – North ou South ou la lettre de la zone et les coordonnées x et y. Chaque hémisphère utilise son propre système de coordonnées en y : de 0 à 10 000 000 dans l’hémisphère sud, et de 0 à 10 000 000 dans l’hémisphère nord.

Le territoire Algérien est situé sur 4 fuseaux : (Fig. I 16)

- UTM Nord, fuseau 29 : entre 12 degrés Ouest et 6 degrés Ouest ;
- UTM Nord, fuseau 30 : entre 6 degrés Ouest et 0 degrés Greenwich ;
- UTM Nord, fuseau 31 : entre 0 degrés et 6 degrés Est Greenwich ;
- UTM Nord, fuseau 32 : entre 6 degrés Est et 12 degrés Est Greenwich.

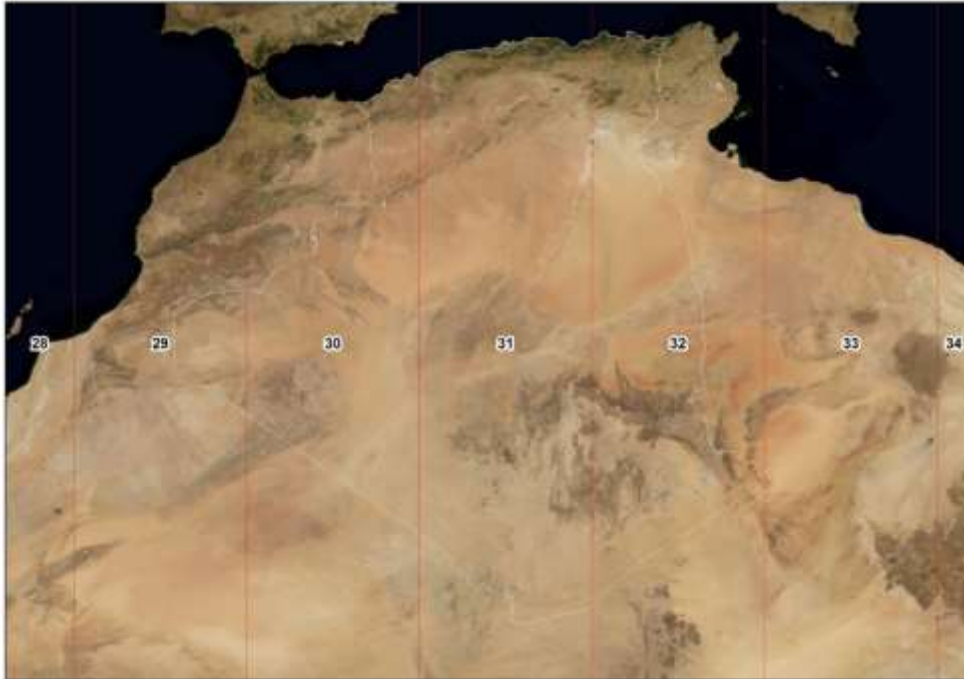


Figure I 16. Les fuseaux UTM couvrant le territoire Algérien

Le Systèmes de coordonnées en Algérie

Plusieurs séries de cartes de l'IGN et de l'INCT sur l'Algérie, à différentes échelles :

- Projection Lambert à petit champ ;
- Voirol 1875 / Nord et Sud Algérie (ancienne) ;
- Voirol 1879/ Nord et Sud Algérie (ancienne) ;
- Système de référence géodésique Voirol 1875 et 1960, l'ellipsoïde associé étant Clarke 1880 IGN ;
- Lambert Nord Algérie ou Lambert Sud Algérie ;
- Système de référence géodésique Nord Sahara 1959, auquel est associé l'ellipsoïde Clarke 1880 Anglais ;
- UTM Nord Sahara 1959 zones 29 à 32 N ;
- WGS 84 ;
- UTM WGS 84 Zones 29 à 32 N.

5. La mesure de la localisation

Alors à la fin de ce chapitre on peut conclure que la représentation d'une position sur Terre devra résoudre deux problèmes distincts (Fig. I 17). :

- **La géodésie (Datum)** : Connaître et mesurer *la forme de la Terre* pour localiser un point à sa surface avec le moins de paramètres possibles ;
- **Les projections cartographiques** : Représenter une surface curviligne sur une surface plane.

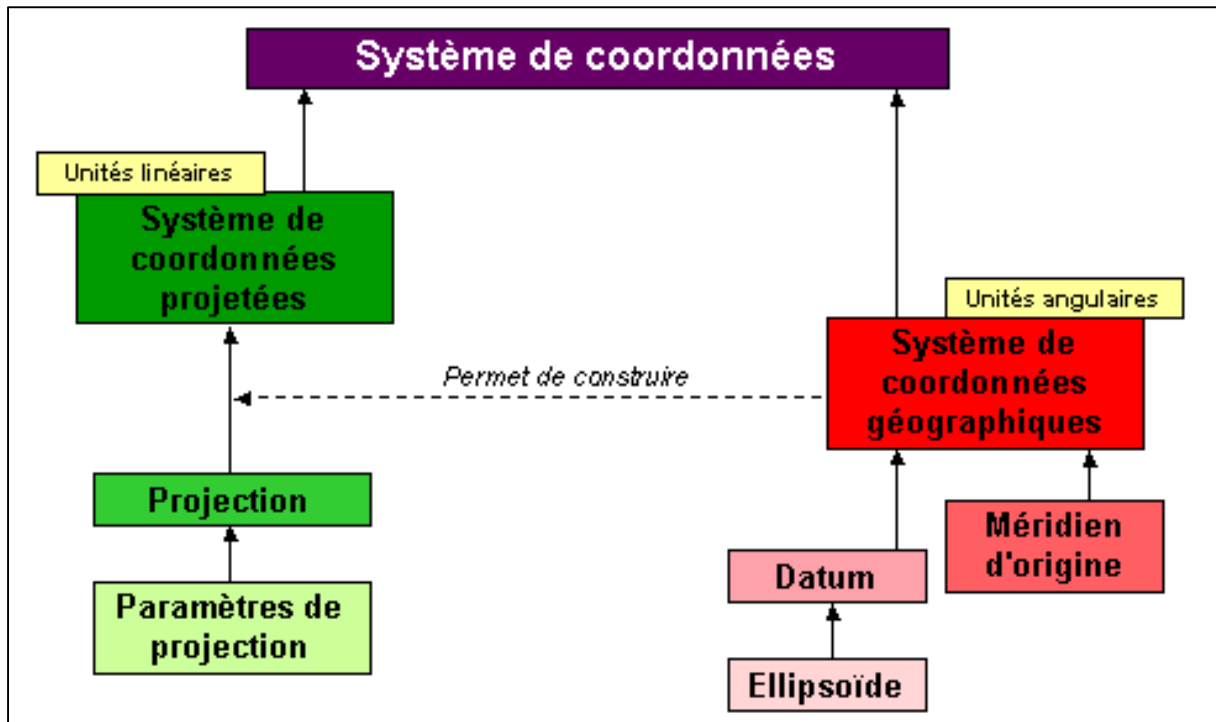
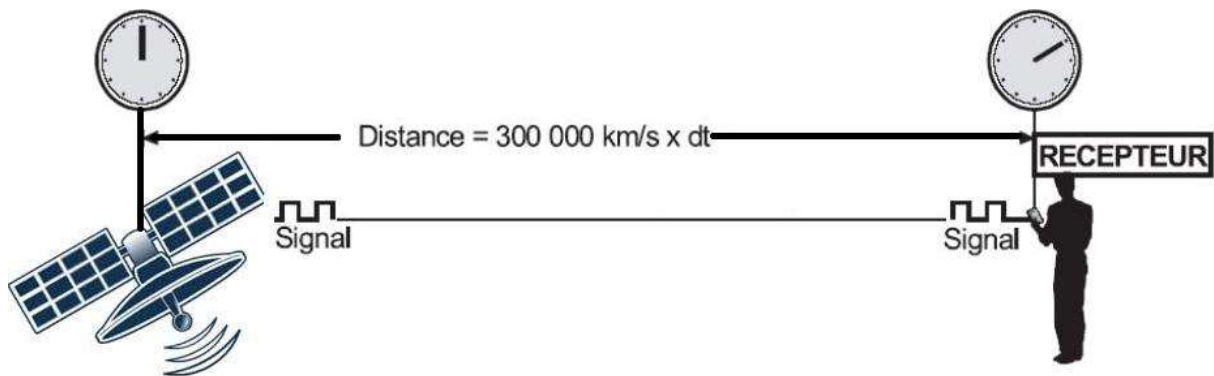


Figure I 17. Paramètres nécessaires pour la détermination du système de coordonnées

Les projections et Datums sont liés : le Datum indique l'ellipsoïde à utiliser pour la projection. Il est interdit de projeter des objets en utilisant un ellipsoïde différent de celui du Datum.

- Des cartes de même projection mais de **Datums différents** ne coïncident pas (*déplacement de quelques dizaines à quelques centaines de mètres*) ;
- Des cartes de même Datums mais de **projections différentes** ne coïncident pas (*déplacement de centaines à dizaines de milliers de mètres*).

Systèmes de localisation satellitaires : Principe de fonctionnement des dispositifs GNSS



Ce chapitre vise à doter les étudiants des connaissances et compétences pour les rendre capable à :

- *Connaitre la définition et l'historique du GNSS ;*
- *Comprendre le principe de fonctionnement des dispositifs GNSS ;*
- *Déterminer les notions de base sur les orbites, échelle de temps et signaux ;*
- *Maitriser les erreurs liées aux mesures GNSS.*

1. Introduction

La navigation par satellite est une technologie largement utilisée et indispensable dans notre vie quotidienne. Le nombre d'applications qui utilisent ce type de système augmente chaque jour à cause des larges domaines qui nécessitent ce service, que ce soit pour la navigation, le positionnement, la sécurité publique, la surveillance, les recherches géographiques, la cartographie et l'information météorologique et atmosphérique. Les systèmes qui offrent ce service sont connus sous le nom de GNSS (Global Navigation Satellite System) systèmes globaux de navigation par satellite. Il s'agit de l'ensemble des systèmes qui utilisent une constellation de satellites pour offrir la possibilité à un nombre illimité de récepteurs le calcul de la position exacte en trois dimensions : latitude, longitude et altitude. Le système de positionnement le plus connu et le plus utilisé actuellement dans le monde est le système américain **GPS** (Global Positioning System) d'autres systèmes sont développés comme le système Russe **GLONASS**, le système Européen **Galileo** et le système chinois **Beidou**.

L'objectif de ce chapitre est de présenter un aperçu global sur le système de localisation par satellite ainsi que son principe de fonctionnement.

2. Historique des systèmes de localisation satellitaires

Au début des années 60 plusieurs organisations Américaines à l'image du département de la défense DOD, le ministère du transport et la NASA (National Aeronautics and Space Administration), ont décidé de développer un système de localisation par satellite capable de déterminer la position des utilisateurs en trois dimensions. Le premier système proposé est le system 621B qui se compose d'une constellation de 15 à 20 satellites qui tournent dans des orbites avec des inclinaisons de 0° , 30° et 60° , ces satellites transmettent en permanence des signaux codés par des codes pseudo aléatoire. En 1973 le programme GPS a été approuvé par le département de la défense et le premier satellite a été lancé en 1978. En Aout 1993, 24 satellites sont mis en orbite. Dans la même période exactement en 1970 l'Agence fédérale spatiale russe et le ministère de la Défense ont commencé le développement de leur propre système de navigation par satellite nommé GLONASS. Pour ce dernier, le premier satellite a été lancé en 1984 et le système est devenu pleinement opérationnel avec une constellation complète de 24 satellites en 1996. La chine a décidé de développer son propre système en 1983, le système a achevé sa constellation globale en 2020 et fournit des services de navigation et de positionnement à l'échelle mondiale. L'Union européenne (UE) et de l'Agence spatiale européenne (ESA) (European Space Agency) commence le développement d'un système de localisation par satellite nommé Galileo en 2002, deux premiers satellites pour ce système, GIOVE-A et GIOVE-B, ont été lancés en 2005 et 2008.

3. Définition GNSS

On appelle GNSS (Global Navigation Satellite System, pour système global de positionnement par satellite) les systèmes de positionnement basé sur des signaux émis de satellites en orbite autour de la Terre et fournissant une ouverture mondiale. Jusqu'en 2007, seul GPS conçu, développé et entretenu par le Département de la Défense des États-Unis - constituait un GNSS opérationnel. Depuis, Glonass (URSS puis Russie) est arrivé lui aussi en phase opérationnelle. Deux autres systèmes sont actuellement pleinement opérationnels : Galileo (Union Européenne) et le Chinois Compass / Beidou (Fig. II 1) (Hofmann-Wellenhof et al., 2007).

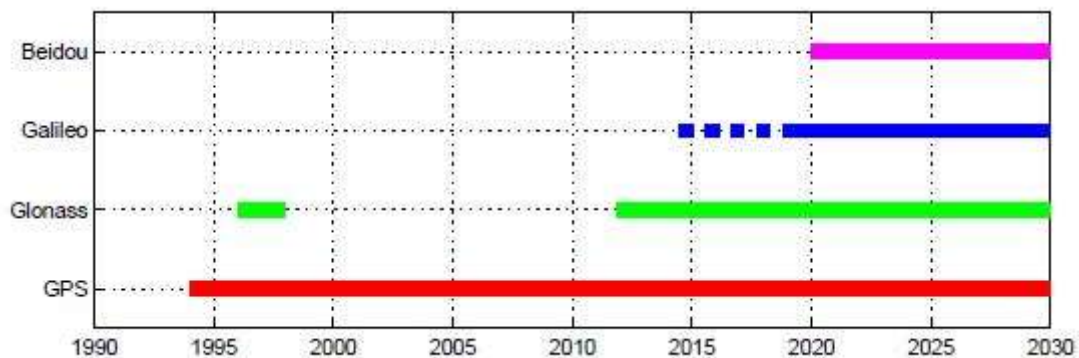


Figure II 1. Phase d'opérationnalité des différents GNSS existants

L'objectif d'un système global de positionnement par satellite est de **fournir** à un récepteur sa **position, sa vitesse de déplacement et l'heure**. Ce positionnement est réalisé de manière rapide, avec une précision d'une dizaine de mètres, n'importe quand, n'importe où sur la Terre, quelle que soit la météo et à un faible coût.

Les utilisations de ces systèmes sont principalement la navigation (piétonne, maritime, aérienne, et routière), la topométrie et la géodésie, la synchronisation du temps, la géophysique.

4. Principe de fonctionnement des dispositifs GNSS

A l'aide de la distance entre le récepteur et plusieurs satellites, **quatre au minimum**, de positions connues, les systèmes de localisation par satellite GNSS peuvent calculer la position de l'utilisateur en utilisant la méthode de **triangulation**. En effet, *connaissant la position du satellite ainsi que la pseudo-distance entre ce satellite et le récepteur*, la position sera l'un des points de la sphère centrée par le satellite, et qui a un rayon égal à la distance entre le satellite et le récepteur (Jin, 2012) (fig. II 2).

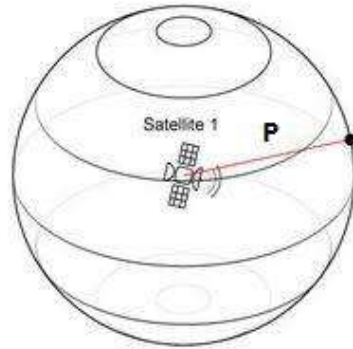


Figure II 2. Position par rapport à un satellite

Si en ajoutant un deuxième satellite avec une position et une distance connue par rapport au récepteur GNSS, ce deuxième satellite donne une nouvelle sphère et l'intersection des deux sphères qui forme un ellipsoïde représente l'ensemble des positions que peut avoir le récepteur (fig. II 3).

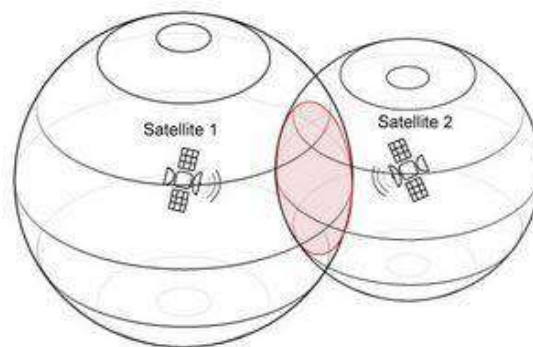


Figure II 3. Précision de la position avec deux satellites

Pour que les récepteurs puissent se localiser, il faut un minimum de quatre satellites, et l'intersection entre les quatre sphères donne un point qui représente la position exacte du récepteur (fig. II 4).

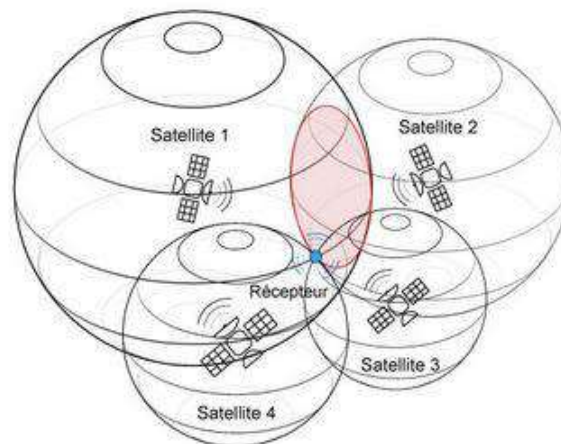


Figure II 4. Position exacte du récepteur avec quatre satellites

Toute la démonstration précédente repose sur l'hypothèse que le récepteur GNSS doit savoir deux paramètres importants pour pouvoir calculer sa position. Il doit connaître la position exacte des satellites et à quelle distance il se trouve par rapport à chacun d'eux. Il est facile de simplifier les choses. Connaissant la vitesse de propagation des ondes qui est égale à la vitesse de la lumière 3.10^8 m/s et le temps de propagation de cette onde entre le satellite et le récepteur, il est possible de calculer la distance par une multiplication entre le temps et la vitesse. Le satellite transmet un signal au temps t_t et le récepteur reçoit ce signal au temps t_r , le récepteur doit analyser l'écart temporel entre ces deux temps pour estimer le temps de propagation du signal. La distance entre eux sera exprimée par (II.1) dont le principe est schématisé par la figure II 5 (Langley et al., 2017).

$$P = C * (t_r - t_t) \quad (\text{II. 1})$$

Avec « c » est la vitesse de la lumière.

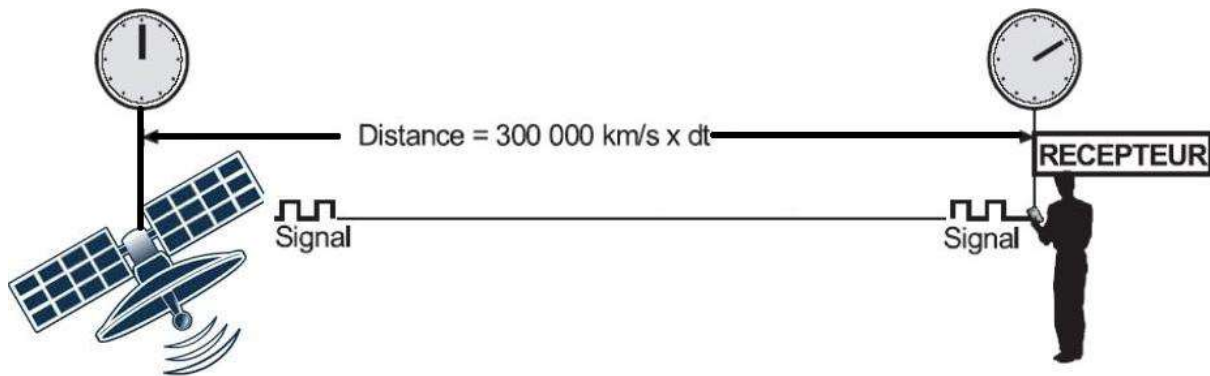


Figure II 5. Principe pour calculer la distance entre le satellite et le récepteur

La position est calculée à partir des données transmises par chacun et par rapport à la référence ECEF (Earth Centered, Earth Fixed). **L'équation fondamentale pour mesurer la distance entre le satellite et le récepteur est l'équation d'une sphère** qui est donné par :

$$P_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} \quad (\text{II. 2})$$

P_i : est la distance entre le i^{em} satellite et le récepteur ;

(X, Y, Z) : coordonnées du récepteur ;

(X_i , Y_i , Z_i) : coordonnées du i^{em} satellite.

Dans cette équation il y a trois inconnues (X, Y, Z) qui sont les coordonnées du récepteur, donc pour calculer ces coordonnées, nous avons besoin de trois équations au minimum. D'un point de vue pratique, il est difficile d'obtenir le temps de propagation exact relatif à un satellite ou bien au récepteur, particulièrement avec une multitude de phénomènes qui influencent sur le signal et qui vont le retarder. L'ajout d'une quatrième inconnue qui représente les bruits est nécessaire dans l'équation de navigation, cette équation devient :

$$P_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} + b \quad (\text{II. 3})$$

La méthode la plus utilisée pour résoudre cette équation est celle dite par linéarisation. La dérivation de cette équation donne :

$$\delta P_i = \frac{(x_i - x)\delta x + (y_i - y)\delta y + (z_i - z)\delta z}{\sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2}} + \delta b \quad (\text{II. 4})$$

$$\delta P_i = \frac{(x_i - x)\delta x + (y_i - y)\delta y + (z_i - z)\delta z}{P_i - b} + \delta b \quad (\text{II. 5})$$

Avec δx , δy , δz et δb sont les inconnues, l'équation ci-dessus devient une équation linéaire et peut être écrite sous la forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} \delta P_1 \\ \delta P_2 \\ \delta P_3 \\ \delta P_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} & 1 \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} & 1 \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} & 1 \\ \alpha_{41} & \alpha_{42} & \alpha_{43} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta x \\ \delta y \\ \delta z \\ \delta b \end{bmatrix} \quad (\text{II. 6})$$

Avec :

$$\alpha_{i1} = \frac{x_i - x}{P_i - b} \quad (\text{II. 7})$$

$$\alpha_{i2} = \frac{y_i - y}{P_i - b} \quad (\text{II. 8})$$

$$\alpha_{i3} = \frac{z_i - z}{P_i - b} \quad (\text{II. 9})$$

La solution de cette équation est exprimée par (Hofmann-Wellenhof et al., 2007) :

$$\begin{bmatrix} \delta x \\ \delta y \\ \delta z \\ \delta b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} & 1 \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} & 1 \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} & 1 \\ \alpha_{41} & \alpha_{42} & \alpha_{43} & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \delta P_1 \\ \delta P_2 \\ \delta P_3 \\ \delta P_4 \end{bmatrix} \quad (\text{II. 10})$$

5. Notions sur les orbites

Pour calculer la position des récepteurs GNSS nous avons besoin de connaître [la position de chaque satellite en temps réel](#), cette position est estimée à l'aide des informations des orbites. Une orbite c'est l'ensemble des points parcourus par un satellite autour de la terre, une orbite résulte en cause des forces exercées sur le satellite. La plus grande force qui influence sur les satellites est le champ gravitationnel de la terre et selon les lois de Newton cette force est donnée par (Capderou, 2002) :

$$F = \frac{k^2 m.M}{r^2} \quad (\text{II. 11})$$

Ou M est la masse de la terre, m représentent la masse du satellite, k est la constante universelle de gravitation, r est la distance entre le satellite et la terre, Cette force peut aussi être écrite comme

$$F = m.a \quad (\text{II. 12})$$

Où « \mathbf{a} » désigne l'accélération du satellite et elle est égale à :

$$\mathbf{a} = \frac{k^2 M}{r^2} \quad (\text{II. 13})$$

$$\mu = k^2 \cdot M \quad (\text{II. 14})$$

μ : est la constante gravitationnelle de la terre qui est égale à $3986005 \cdot 10^8 \text{ m}^3\text{s}^{-2}$

Le mouvement d'un satellite est décrit par les trois lois de Kepler. Elles ont été historiquement utilisées pour décrire le mouvement des planètes autour du Soleil, mais elles s'appliquent également à un satellite en orbite autour d'une planète.

5.1. Les trois lois de Kepler (Kovalevsky, 1972)

5.1.1. Loi des orbites

Les satellites décrivent autour de la terre des ellipses dont la terre est l'un de ses foyers. La distance terre-satellite n'est pas constante ; la position la plus proche de la terre est le périhélie et la plus éloignée l'aphélie.

5.1.2. Loi des aires

Le satellite se déplace d'autant plus vite qu'il est proche de la terre ; inversement, le satellite va de moins en moins vite s'il s'éloigne de la terre, le satellite balaie toujours des aires égales dans un intervalle de temps constant.

5.1.3. Loi des périodes

Le quotient du carré de la période de révolution \mathbf{T} par le cube du demi-grand axe orbital \mathbf{a} est une constante.

$$\frac{T^2}{a_s^3} = \frac{4\pi^2}{\mu} = \frac{4\pi^2}{G M} \quad (\text{II. 15})$$

5.2. Les paramètres Képlérien

Six éléments définis par Kepler sont utilisés pour déterminer la position des satellites dans l'espace : La trajectoire d'un satellite qui est une ellipse est définie par son demi grand axe « \mathbf{a} », demi petit axe « \mathbf{b} » et l'excentricité « \mathbf{e} » ; Les autres éléments képlériens sont l'inclinaison i qui varie entre 0° et 180° est définie comme l'angle entre le plan orbital et le plan équatorial ; La longitude du nœud ascendant Ω c'est l'angle entre l'axe qui résulte par l'intersection entre le plan orbital et le plan équatorial et le nœud ascendant celui ou le satellite passe de l'hémisphère sud à l'hémisphère nord ; L'argument du périastre ω c'est l'angle formé par la ligne des nœuds et la direction du périastre dans le plan orbital ; Le dernier élément c'est l'anomalie moyenne \mathbf{M} , ce paramètre indique la position du satellite est le seul qui varie dans le temps par rapport aux autres éléments, ce paramètre peut être calculé par :

$$M = E - e \sin E \quad (\text{II. 16})$$

Ou E est l'anomalie excentrique du satellite

$$E = 2 \arctan \left[\sqrt{\frac{1-e}{1+e}} \tan \left(\frac{1}{2} v \right) \right] \quad (\text{II. 17})$$

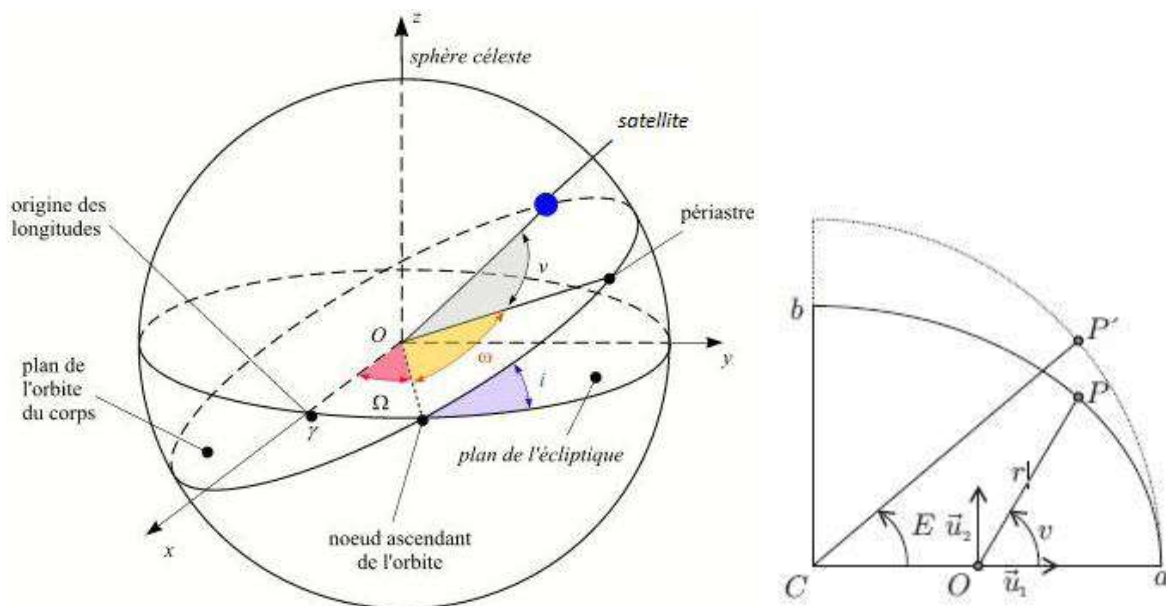


Figure II 6. Les paramètres Képlérien (Kovalevsky, 1972)

6. Échelle du temps

Pour calculer le temps mis par l'onde pour aller du satellite au récepteur, on compare les temps d'émission et de réception du signal. Or, les 2 horloges ne sont pas synchronisées ; il est de plus impossible physiquement de synchroniser parfaitement ces 2 horloges. On définit ainsi une échelle de temps indépendante pour synchroniser les 2 horloges, l'échelle de temps GNSS. C'est dans ce référentiel temporel que sont émis les signaux et que le récepteur se synchronise. *Chaque GNSS définit donc précisément dans ses spécifications son échelle de temps.*

Pour définir l'échelle de temps GNSS, rappelons les différentes échelles de temps d'usage :

- **Le temps universel UT1** : est l'échelle de temps basée sur la durée séparant deux midis solaires. Il a des instabilités à court terme au niveau de 10^{-8} . La durée du jour augmente lentement (de 0,002 s/siècle). UT1 est déduit des observations VLBI, avec une contribution des méthodes satellitaires dont les GNSS (Capitaine, 1996) ;
- **Le temps atomique international, noté TAI** : est l'échelle de temps continue résultant de l'analyse par le Bureau International des Poids et Mesure (BIPM) de la donnée de 200 horloges atomiques réparties dans des laboratoires internationaux. Le TAI est basé sur la seconde (unité de mesure du temps) définie 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. C'est l'échelle de temps de référence. L'origine du TAI a été définie telle que **UT1-TAI soit égal à 0 le**

premier janvier 1958 à minuit. Les instabilités du TAI sont plus petites de six ordres de grandeurs que celles de UT1 (Guinot, 1986) ;

- **Le temps universel coordonné, ou UTC :** est l'échelle de temps utilisée pour coordonner les activités scientifiques et techniques mondiales. C'est un compromis entre le TAI et le temps UT1. **UTC diffère du TAI par un nombre entier de secondes**, de telle sorte que **$UT1 - UTC$ reste inférieur en valeur absolue à 0,9 s**. La décision d'introduire un saut de seconde dans UTC pour respecter cette condition incombe à l'IERS (International Earth Rotation Service). **Cette introduction est effectuée obligatoirement un 1er janvier ou 1er juillet lorsque $|UTC - UT1| > 0.9$ s** (éventuellement par anticipation). Le temps UTC est l'échelle de temps diffusée par les signaux horaires et utilisée comme base des temps légaux (Arias and Guinot, 2006).

Les variations de la durée du jour (différences entre la durée effective et la durée moyenne, 86400 s) sont dues aux marées zonales (inférieures à 2,5 ms en valeur absolue), aux marées océaniques (inférieures à 0,03 ms en valeur absolue), à la circulation atmosphérique, à des effets internes.

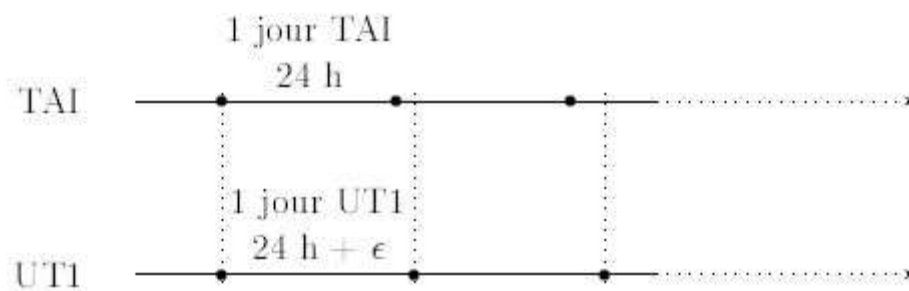


Figure II 7. Echelle du temps. Le temps de référence est la TAI

En raison du ralentissement de la rotation de la Terre, le temps UT1 accumule quotidiennement un léger excès de la durée du jour par rapport au temps TAI. Dès que l'accumulation de cet excès approche un nombre entier de secondes, le temps UTC est incrémenté : ceci permet d'être à la fois cohérent avec le temps UT1, lié à la rotation de la Terre, et facilement relié au temps de référence, le TAI.

Depuis le 1er juillet 2012 à 00 : 00 (dernier ajout d'une seconde intercalaire), la condition $|UTC - UT1| < 0.9$ s induit $UTC = TAI - 35$ s

7. Signaux et mesures

7.1. Construction des signaux

7.1.1. Codes pseudo-aléatoires

Le défi du GNSS réside dans la mesure précise du temps de propagation d'un signal émis entre le satellite émetteur et récepteur. La mesure de ce temps de propagation repose sur une idée simple. Si le récepteur et le satellite génèrent au même instant une impulsion, au niveau du récepteur on observe 2 impulsions (*Dounia and Salli, 2022*) :

- Une première impulsion générée par le récepteur ;
- Une seconde, reçue environ **70 ms** plus tard, provenant du satellite et retardée par son parcours des **20 000 km séparant satellite et récepteur**.

En pratique, au lieu de transmettre une impulsion, les satellites GNSS et le récepteur utilisent un **code pseudo-aléatoire** qui sera moins sujet à erreurs. L'étude au niveau du récepteur de la corrélation du code émis par le satellite et de celui, identique, généré par le récepteur permet une estimation du temps de propagation.

Ces codes sont dits pseudo aléatoire car ils présentent des propriétés statistiques semblables à celles d'un signal aléatoire. Ce sont des séquences d'impulsions ou de bits (0/1) longues et complexes présentant de nombreux avantages :

- Le patron complexe des codes permet d'éviter la synchronisation accidentelle du récepteur avec **le bruit de fond** (bruit gaussien) : il y a en effet une très faible probabilité que le bruit de fond ait la même signature que le code pseudo aléatoire, en particulier si la séquence est suffisamment longue.
- Les codes **longs** permettent d'utiliser le principe de la théorie de l'information pour extraire l'information transmise bien qu'elle soit reçue en dessous du seuil du bruit : Cela permet d'éviter en particulier les antennes à gain qui sont encombrantes ou des amplificateurs à faible bruit onéreux.

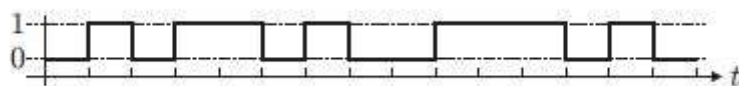


Figure II 8. Allure du code émis par un satellite GNSS

La longueur d'onde d'un code est donnée par la distance parcourue par le signal durant 1 bit.

7.1.2. Les ondes porteuses

Les signaux de type code ne peuvent être directement diffusés par les satellites car ils ne répondent pas aux lois de propagations électromagnétiques. Pour être transmis du satellite à la Terre ils doivent être portés par des ondes sinusoïdales : *les ondes porteuses*. La transmission de l'information (code) par l'onde porteuse se fait par *modulation* du signal.

En GNSS, on parle de *modulation du signal par la phase* : la modulation consiste à augmenter la phase de 180° à chaque changement de parité du code transporté (Fig. II 9).

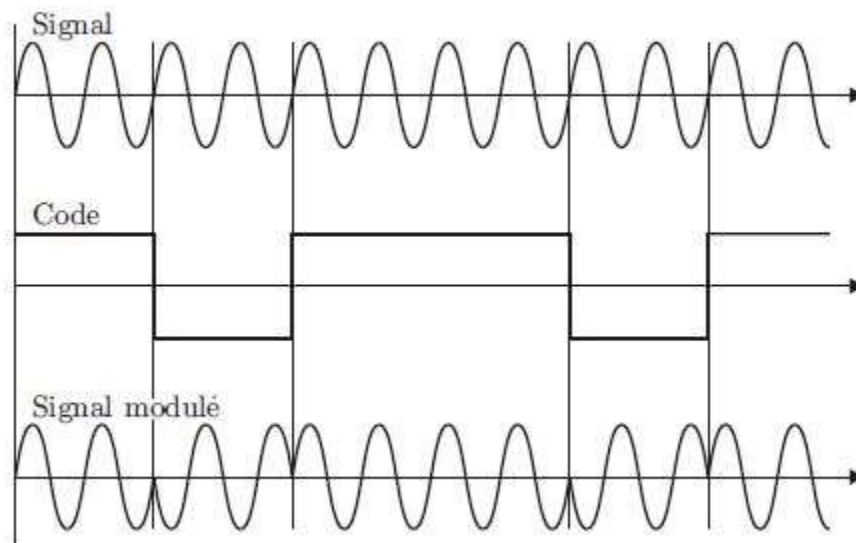


Figure II 9. Modulation du signal par la phase à l'aide du code

Une fréquence porteuse peut également être modulée par plusieurs codes. Un code peut être modulé sur une ou plusieurs fréquences porteuses. Nous verrons par la suite qu'il peut être intéressant de disposer de plusieurs ondes porteuses, la combinaison des observations faites sur ces différentes ondes permettant de s'affranchir d'erreurs systématiques (effet de l'ionosphère).

7.1.3. Message de navigation

En plus d'être modulé par la phase à l'aide du code, les signaux GNSS sont également modulés à l'aide du message de navigation. Contrairement au code, *le message de navigation contient de réelles informations qui sont exploitées par le récepteur, avec entre autres* :

- La position des satellites (éphémérides) et des informations le concernant (état du satellite) ;
- Les éléments permettant l'obtention de la date de l'émission du signal, dans l'échelle du temps du satellite ;
- La correction d'horloge satellite à appliquer pour s'affranchir de sa dérive par rapport au temps du GNSS (O'Driscoll, 2018) ;

- Des informations plus générales : modèle paramétrique global de l'ionosphère (pour la correction de son effet), almanach de tous les satellites (santé, position approchée).

7.1.4. Séparation des signaux

L'architecture des signaux doit éviter les interférences entre les signaux émis par des satellites différents. Le récepteur peut ainsi déterminer rapidement l'origine d'un signal reçu. Plusieurs méthodes coexistent pour la séparation des signaux (*Kumar et al., 2021*) :

- *La méthode CDMA (Code Division multi access) : Chaque satellite émet un code qui lui est spécifique et qui est **de corrélation nulle avec le code émis par les autres satellites**. Le récepteur connaît chacun des codes existants et détermine dès la réception de quel satellite provient le signal mesuré ;*
- *La méthode FDMA (Frequency Division Multi Access) : Chaque satellite émet des signaux sur des fréquences qui lui sont spécifiques. Le récepteur peut alors déterminer l'origine du signal reçu à partir de sa fréquence ;*
- *La méthode TDMA (Time Division Multi Access) : Les satellites émettent des signaux à des instants différents. En fonction de la date de réception, le récepteur peut déterminer le satellite à l'origine du signal qu'il mesure.*

7.2. Mesure de code

Le satellite émet une onde, modulée par un code pseudo-aléatoire, généré par un algorithme connu et lié à son horloge. Le récepteur connaît ce code, il en génère une réplique liée à sa propre horloge. Il reçoit alors le code provenant du satellite avec un retard Δt venant du temps mis par l'onde pour parcourir la distance entre le satellite et le récepteur. Le récepteur mesure donc ce retard ou décalage Δt , égal à la différence entre l'instant de réception (horloge récepteur) et l'instant d'émission (horloge émetteur). Les horloges récepteur et émetteur (satellite) n'étant pas synchronisées, l'écart de temps Δt est entaché d'une erreur δt qu'il est nécessaire d'estimer (Fig. II 10).

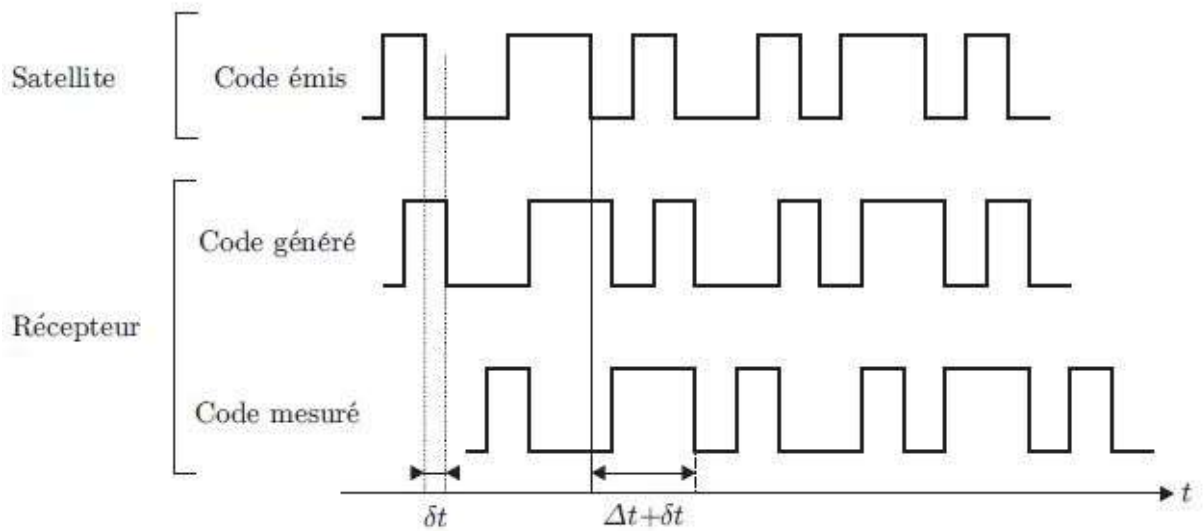


Figure II 10. Mesure du code (Dounia and Salli, 2022)

Le décalage temporel entre les codes reçus et générés par le récepteur (durée de propagation et décalage d'horloge) est estimé via une **boucle de code (DLL pour Delay Lock Loop)**. Cette boucle consiste à décaler les deux codes l'un par rapport à l'autre jusqu'à l'obtention d'un pic de corrélation maximal. La valeur du décalage obtenue pour ce pic de corrélation correspond au décalage temporel recherché.

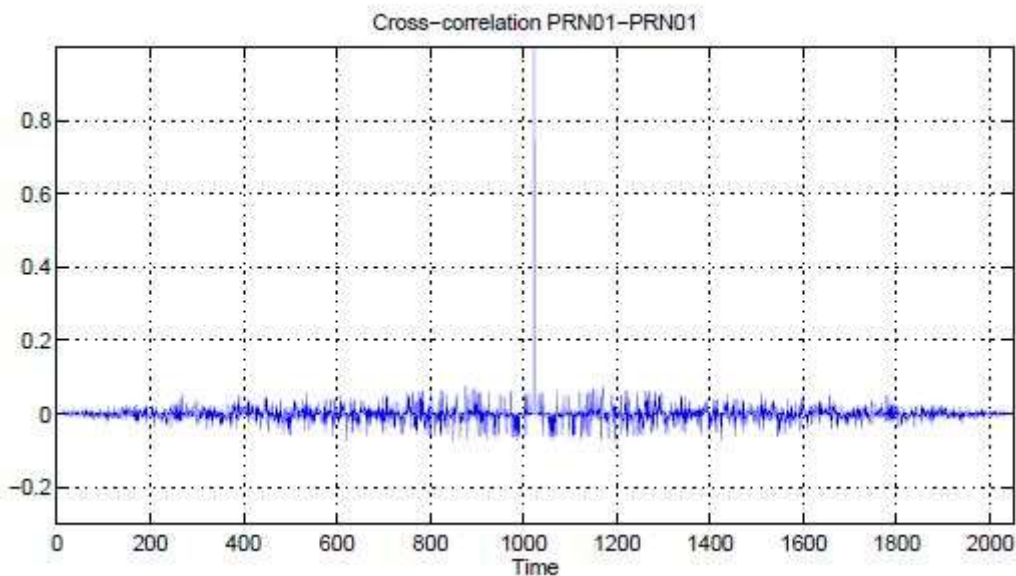


Figure II 11. Corrélation des codes reçus et générés par un récepteur

En général, **la longueur d'une séquence de code est inférieure à la distance séparant satellite et récepteur**. Ainsi, pour un positionnement standard avec GPS (mesure de C/A code), **la longueur du code standard émis est de l'ordre de 1 ms**, soit la durée nécessaire à l'onde pour parcourir environ **300 km** : les observations brutes **ne peuvent théoriquement donner des distances qu'entre 0 et 300 km**. Les satellites GNSS étant situés à environ 20 000 km du sol, l'observation

doit donc être corrigée : la mesure de distance est un multiple de 300 km auquel on ajoute l'observation brute. *On parle d'ambiguïté entière sur la mesure de code.*

Cette ambiguïté est cependant facile à lever mathématiquement du fait de la longueur d'un cycle (300 km) :

- On récupère la date d'émission du message pour chaque satellite ;
- On sait que le signal met entre 65 et 83 ms à se propager entre le satellite et la station. On suppose alors que l'ambiguïté du premier signal mesuré est de 65 ms. Le temps de trajet des autres satellites est alors compté à partir de ce premier satellite ;
- Le décalage entre le temps réel d'arrivée du premier signal et le temps supposé (65 ms) est alors estimé précisément lors de l'inversion des observations.

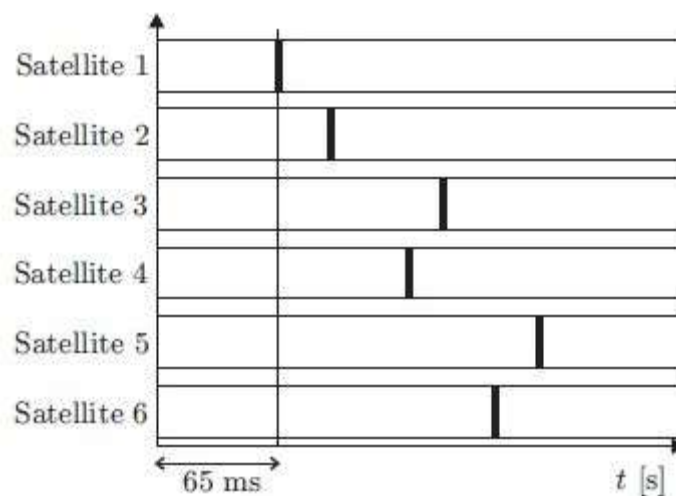


Figure II 12. Ambiguïté sur la mesure de code

Pour lever cette ambiguïté, les signaux sont calés sur celui du premier satellite, fixé à une valeur arbitraire. L'écart entre cette valeur arbitraire et la valeur effective est alors estimée lors de l'analyse.

7.3.Mesure de phase

Une autre technique que la mesure de code utilisable pour le positionnement par GNSS repose sur la mesure du déphasage entre les signaux reçus et générés par le récepteur. Cette mesure peut se faire sur les différentes porteuses utilisées par le GNSS. Bien sûr, *les horloges récepteur et émetteur (satellite) n'étant pas synchronisées, le déphasage mesuré est entaché d'une erreur de synchronisation qu'il est toujours nécessaire d'estimer.*

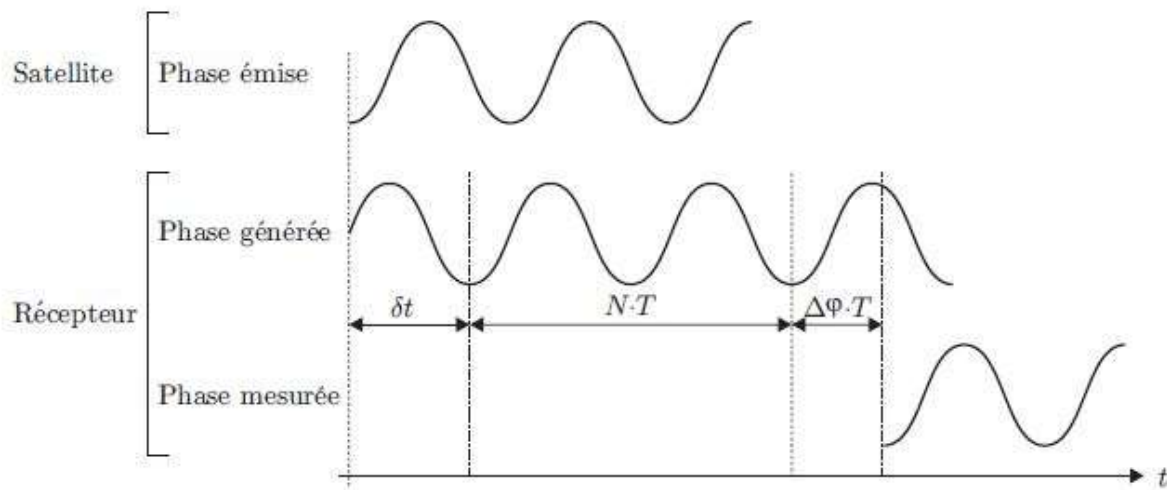


Figure II 13. Mesure de phase

Le signal émis par le satellite est reçu à $t = t_0$ par le récepteur ; N un nombre entier de cycles ; T la période du signal ; $\Delta\phi$ la partie fractionnaire de cycle mesurée.

En effet, seule la partie fractionnaire de la durée de propagation du signal entre le satellite et le récepteur comptée en nombre de cycles peut être mesurée par les récepteurs : le nombre entier de cycles écoulés depuis le début de la mesure est inconnu : on parle **d'ambiguïté de la mesure de phase**. On définit alors **l'ambiguïté entière** comme étant le nombre entier de cycles écoulés au début de la mesure.

Le déphasage entre les signaux reçus et générés par le récepteur est estimé via **une boucle de phase** (PLL pour Phase Lock Loop). Cette boucle consiste à décaler les deux signaux l'un par rapport à l'autre jusqu'à l'obtention d'un pic de corrélation maximal. La valeur du décalage obtenue pour ce pic de corrélation correspond au décalage temporel recherché.

7.3.1. Résolution des ambiguïtés de phase

La résolution des ambiguïtés de phase est une étape cruciale pour un positionnement GNSS précis. Notons cependant que ces ambiguïtés n'ont pas être résolues pour chaque observation. En effet, en plus de mesurer la partie décimale du déphasage, le récepteur compte le nombre entier de cycles qui s'écoulent à partir de la première réception du signal. Tant qu'il n'y a pas interruption du signal (c'est-à-dire tant que le récepteur reste accroché au satellite), le récepteur relie le déphasage mesuré à l'ambiguïté initiale par un nombre entier relatif de cycles, déterminé à l'aide de la mesure **du décalage Doppler** induit par le mouvement relatif entre récepteur et satellite. Dans ce cas, seule une ambiguïté $N_i^j(t_1)$, celle de la mesure initiale, reste à déterminer pour un satellite j et un récepteur i donnés (Hofmann-Wellenhof et al., 2007).

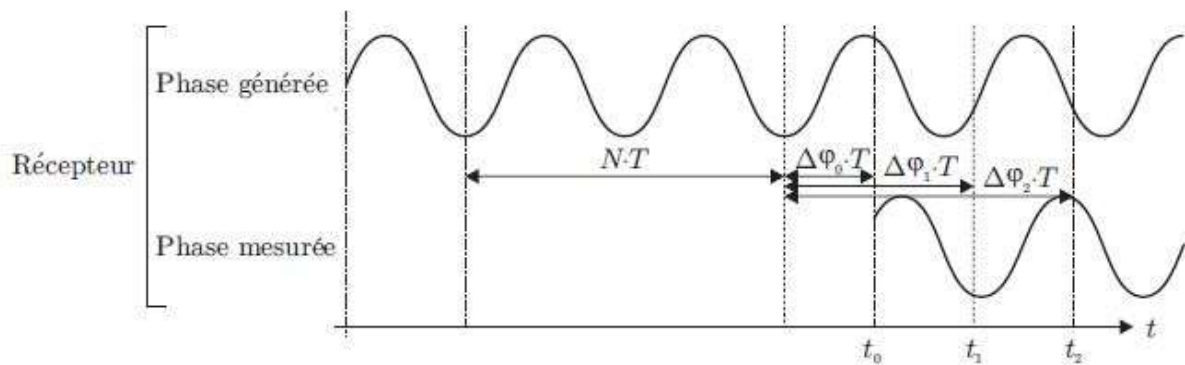


Figure II 14. Conservation de l'ambiguïté de phase lors du suivi de signal en provenance d'un satellite

Pendant une session d'observation, on veille donc de ce fait à ne pas interrompre le signal observé en direction d'un satellite. En cas d'interruption, on parle de **saut de cycle** : la valeur de l'ambiguïté entière change.

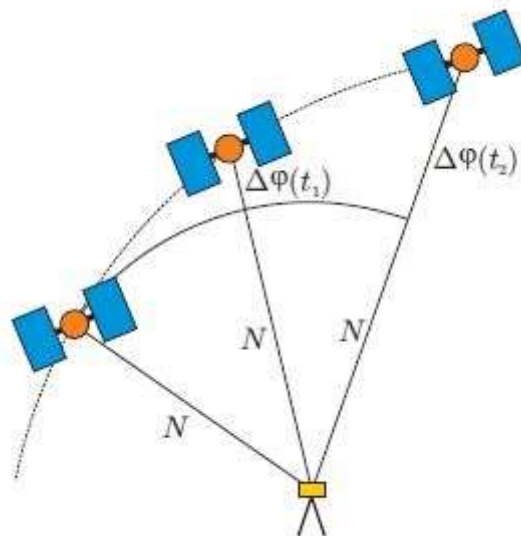


Figure II 15. Suivi d'un satellite avec conservation de l'ambiguïté entière

Actuellement, deux types de méthodes existent pour la résolution des ambiguïtés lors d'un positionnement différentiel :

- *Les méthodes de résolution en post-traitement (temps différé)*. Ces méthodes consistent en général à une première analyse GNSS avec estimation des ambiguïtés à des valeurs réelles (solution flottante), puis une seconde analyse qui permet la résolution des ambiguïtés à des valeurs entières (solution fixée).
- *Les méthodes de résolution en temps réel, dites AROF (Ambiguity Resolution On the Fly)* qui permettent une résolution quasi-instantanée des ambiguïtés mais qui nécessitent des lignes de bases plus courtes (inférieures à 50 km) et/ou une bonne modélisation des erreurs.

7.4. Combinaison linéaire des observations

Les combinaisons linéaires des observations peuvent être réalisées pour l'analyse a priori des observations ainsi que pour le traitement des données.

Ces combinaisons linéaires ont pour objectifs :

- De détecter des erreurs éventuelles affectant les observations ;
- De détecter les sauts de cycle ;
- De faciliter la fixation des ambiguïtés ;
- De réduire l'effet de l'ionosphère ou de la troposphère.

Elles peuvent être réalisées sur les observations de codes ou de phase mais aussi en mêlant à la fois ces deux types d'observation.

Les aspects critiques de ces combinaisons sont :

- Le bruit de la nouvelle observable créée par rapport aux observations initiales de code et/ou de phase ;
- La corrélation mathématique induite par la combinaison ;
- La conservation du caractère entier des ambiguïtés sur les mesures de phase.

8. Erreurs sur les mesures GNSS

Nous allons recenser ici les principales sources d'erreurs affectant les mesures GNSS et décrire les outils et les méthodes permettant leur réduction voire leur correction (Ait-Lakbir, 2023).

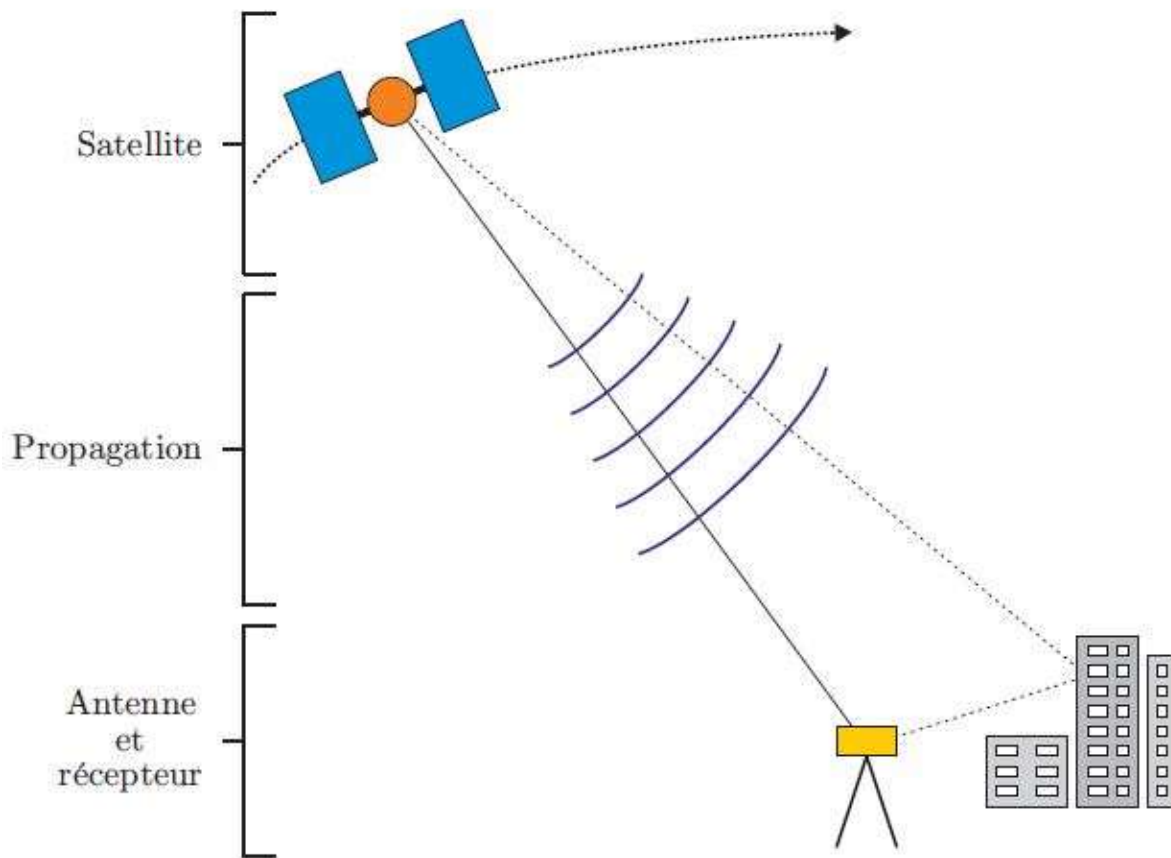


Figure 19. Origine des erreurs affectant les mesures GNSS

8.1. Erreurs liées aux satellites

8.1.1. Orbite et horloges des satellites

En positionnement absolu, l'erreur sur la position du satellite se répercute directement sur la position du récepteur. Celle-ci sera amoindrie lors de l'ajustement en raison de l'accumulation des observations venant de plusieurs satellites. L'impact des erreurs d'orbite et d'horloge satellite sur le positionnement instantané temps réel est métrique.

En positionnement relatif, (2 stations séparées par une distance b appelée ligne de base), l'erreur radiale δr sur la position du satellite entraîne une erreur δb sur la ligne de base mesurée. L'ordre de grandeur de l'erreur sur une ligne de base due à l'erreur sur l'orbite d'un satellite est correctement représenté par :

$$\frac{\delta b}{b} = \frac{\delta r}{r} \quad (\text{II } 18)$$

Les organismes gérant chacun des systèmes GNSS fournissent en temps réel, via le message de navigation les orbites prévues des satellites (on parle d'orbites *radiodiffusées*). Pour un

positionnement en temps différé (applications a priori plus précises), le service international IGS (International GNSS Service) calcule différentes orbites et erreurs d'horloge précises et les fournit à l'ensemble des utilisateurs.

Si on utilise en temps réel les orbites radiodiffusées (cas de la navigation par GNSS), seul un positionnement à quelques mètres peut être envisagé.

8.1.2. Effets relativistes

On a ici affaire aux effets de *la relativité restreinte* (ni l'espace, ni le temps ne sont absolus séparément : longueurs et durées mesurées dépendent de l'observateur inertiel) et de *la relativité générale* (l'écoulement du temps dépend de l'intensité de la gravitation : il ralentit au voisinage des masses).

Les effets de la relativité générale sur les satellites impactent à différents niveaux le positionnement ponctuel (effets éliminés pour un traitement différentiel) (*Hofmann-Wellenhof et al., 2008*) :

- *Effet sur l'orbite* : cet effet est négligeable.
- *Effet sur les horloges des satellites* : sans cette correction, l'estimation de la durée du voyage des signaux GPS serait erronée et la localisation précise serait impossible. Cet effet peut être corrigé par la quantité :

$$\Delta t_r = F \cdot e \cdot \sqrt{a} \cdot \sin E \quad (\text{II } 19)$$

Où a est le demi-grand axe de l'ellipse décrivant la trajectoire du satellite, e son excentricité, E l'anomalie excentrique et $F = -2 \frac{\sqrt{\mu}}{c^2}$ avec $\mu = \vartheta M$, ϑ étant la constante gravitationnelle universelle et M la masse du système Terre - atmosphère.

Cet effet est de l'ordre de **3 m** sur la mesure du temps de propagation, elle est prise en compte dans la détermination des orbites GNSS (Xu, 2010).

- *Effet sur les signaux* : une correction doit être appliquée pour conserver le caractère euclidien de la distance satellite - récepteur :

$$\delta_{rel} = 2 \frac{\sqrt{\mu}}{c^2} \ln \frac{r^j + r_i + r_i^j}{r^j + r_i - r_i^j} \quad (\text{II } 20)$$

Cet effet est de l'ordre de **20 mm maximum**.

- *Effet sur la fréquence du signal* : La relativité générale affecte la fréquence des signaux émis, cependant cette modification est prise en compte lors de la définition des signaux et n'a donc pas besoin d'être corrigée par l'utilisateur.

Les effets de la relativité restreinte affectent l'horloge du récepteur en raison de la rotation de la Terre lors de la propagation des signaux (Xu, 2010). On parle *d'effet de Sagnac*, modélisé par :

$$\delta_{rel} = \frac{1}{c} \vec{r}^J \cdot \vec{r}_I \cdot \vec{\omega}_e \quad (\text{II } 21)$$

Où \vec{r}^J et \vec{r}_I sont respectivement les vecteurs géocentriques de position du satellite et du récepteur, $\vec{\omega}_e$ est le vecteur rotation de la Terre.

Cet effet peut atteindre **des erreurs de l'ordre de 30 m** en fonction de la configuration géométrique entre satellite et récepteur. Cependant, la prise en compte de la rotation de la Terre dans l'analyse des observations induit implicitement cet effet dans l'erreur d'horloge du récepteur.

8.1.3. Centre de phase des satellites

Les orbites des satellites réfèrent au centre de masse de celui-ci et non pas à la position du centre de phase de l'antenne émettrice. Pour un positionnement précis, il est donc nécessaire de connaître le vecteur séparant centre de masse et centre de phase (Kouba, 2009). Notons que pour un positionnement différentiel, ce vecteur ne doit pas être forcément connu car il disparaît dans la différenciation des observations.

Ce vecteur est conventionnellement divisé en 2 parties :

Une partie fixe, appelée *Phase Centre Offset Vector*, **PCO**, correspondant au vecteur entre centre de masse et position moyen du centre de phase. Elle est exprimée dans un repère local lié à l'orientation du satellite (Z orienté vers le centre de la Terre, X vers le soleil, Y tel que le repère (X, Y, Z) soit direct).

Une partie variable qui dépend de l'angle au nadir en satellite et antenne réceptrice et notée **PCV**. C'est une correction à appliquée sur la mesure de distance. Les valeurs prises par ces quantités sont fournies par l'IGS via un fichier « ANTEX » (ANTenna EXchange) mis à jour régulièrement (Rothacher and Schmid, 2010).

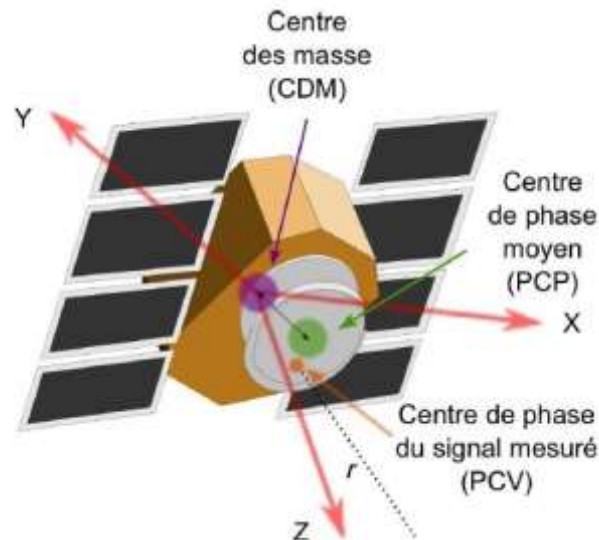


Figure II 16. Modèle d'antenne émettrice : Centre des masses, repère local, position du centre de phase et variation du centre de phase

Pour cette modélisation, les équations suivantes sont ainsi à considérer :

$$PCP = CMP + PCO \text{ et } r_{corr} = r + PCV$$

Où **PCP** est la position du centre de phase, **CMP** la position du centre des masses du satellite, r_{corr} la distance corrigée des variations du centre de phase du satellite et **R** la distance observée. Notons enfin une limite du fichier ANTEX de l'IGS : celui-ci fournit les variations du centre de phase pour un angle au nadir variant de $-14'$ à $+14'$, ce qui peut être insuffisant lors de l'estimation par PPP de la position d'un satellite embarquant un récepteur GNSS.

8.2. Erreurs liées à la propagation

La mesure de distance d'un satellite repose sur l'hypothèse fondamentale que la vitesse de propagation du signal émis par le satellite est constante et égale à la célérité de la lumière. Ceci est effectivement vérifié uniquement pour une propagation dans le vide, la vitesse de propagation des signaux change avec le déplacement du signal à travers l'ionosphère et la troposphère (Warnant, 2006).

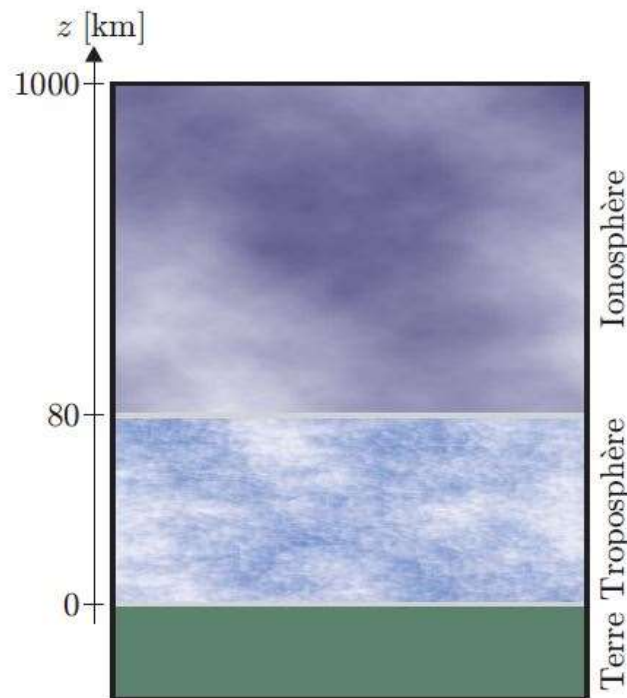


Figure II 17. Troposphère et ionosphère

L'**ionosphère** est la couche la plus haute de l'atmosphère, située entre 60 et 1000 km. Elle est constituée de gaz fortement **ionisés** (éléments sous la forme d'ions et électrons) à très faible pression (entre $2 \cdot 10^{-2}$ hPa et 10^{-8} hPa) et à haute température (1000°C dans les couches les plus élevées, entre 100 et 800 km). Elle est **dispersive** : la propagation d'une onde dans l'ionosphère dépend de la fréquence de cette onde.

La **troposphère** est la couche la plus basse, située entre 0 et 60 km. Elle contient près de 90% de la masse de l'atmosphère, avec en particulier la totalité de la vapeur d'eau atmosphérique.

8.2.1. L'ionosphère

On appelle **retard ionosphérique** l'allongement du temps de parcours entre le satellite et le récepteur. Cet allongement varie usuellement entre 1 et 100 mètres en fonction de l'agitation ionosphérique qui dépend :

- De la latitude du point (plus agitée à l'équateur),
- De l'activité solaire (cycle de 11 ans),
- De la période de l'année,
- Du jour ou de la nuit (calme la nuit).

Comme signalé précédemment, **l'ionosphère est un milieu dispersif** : les rayons ultraviolets provenant du soleil ionisent des molécules de gaz neutres et libèrent des électrons. Ces électrons libres influencent alors la propagation des ondes électromagnétiques. En raison de ce caractère dispersif de l'ionosphère, le retard affectant l'onde dépend en particulier de sa fréquence.

Pour l'étude de son effet sur la propagation de signaux GNSS, on modélise l'ionosphère en l'assimilant à un plasma. **Un plasma est un milieu constitué de particules neutres, d'ions et d'électrons**, les électrons étant des porteurs de charges mobiles $q = -e$ de masse m_e et de densité n_e . La théorie de la propagation des ondes électromagnétiques montre que la traversée de l'ionosphère se traduit :

- Par un retard de la propagation de l'information (code et message de navigation) (terme de groupe).
- Par une avance des phases porteuses (terme de phase).

Deux approches peuvent être envisagées pour la correction de ce retard :

- Pour les mesures monofréquences, **le modèle paramétrique de Klobuchar**, utilisé dans pour la navigation (positionnement absolue en temps réel).
- Pour les mesures bifréquences, **la combinaison « ionosphère free »**, basée sur la dépendance de l'impact de l'ionosphère à la fréquence de l'onde d'intérêt.

Notons également la possibilité d'utiliser des modèles plus fins de l'ionosphère, en particulier lors de l'analyse de mesures monofréquences en post-traitement.

Nous verrons par la suite que dans le cadre d'un positionnement différentiel avec de courtes lignes de bases (inférieures à 15 km), l'effet de l'ionosphère est considérablement réduit.

8.2.2. La troposphère

Tout comme l'ionosphère, la troposphère retarde la propagation des signaux émis par les satellites GPS. L'effet induit est appelé *retard troposphérique*. Des études ont montré que son effet *dégradait surtout la détermination de la composante verticale*.

Mathématiquement, ce retard est également défini comme la différence entre le trajet optique suivi par l'onde lors de sa propagation et la distance géométrique séparant émission (satellite j) et réception (récepteur i) :

$$T_{tropo} = \int_i^j n_{tropo}(s) ds - r = \int_i^j [n_{tropo}(s) - 1] ds \quad (\text{II } 22)$$

Où n_{tropo} est l'indice de réfraction de la troposphère ; il varie avec la pression, la température et l'humidité.

L'impact de ce retard sur le positionnement dépend de l'élévation des satellites GNSS utilisés :

- Pour des observations réalisées avec des satellites dont l'élévation au-dessus de l'horizon **descend jusqu'à 15°** : un retard d'1 m sur la propagation dans la troposphère induit un **retard entre 3 et 4 m** sur l'estimation de la hauteur.

- Pour des observations réalisées avec des satellites dont l'élévation au-dessus de l'horizon *descend jusqu'à 5°* : un retard d'1 m sur la propagation dans la troposphère induit un *retard entre 6 et 7 m* sur l'estimation de la hauteur.

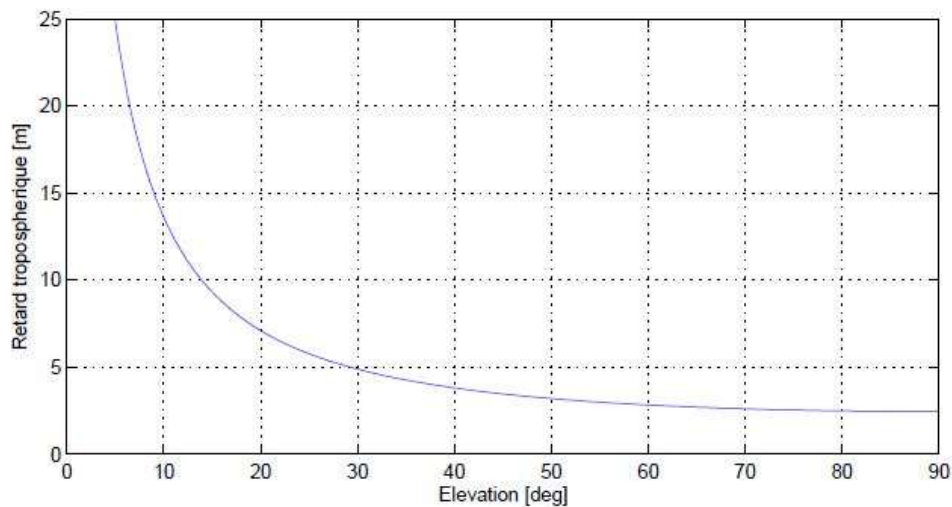


Figure II 18. Evolution du retard troposphérique avec l'élévation du satellite au-dessus de l'horizon

Deux approches peuvent être employées pour la correction de cet effet :

- Une première approche consiste à réaliser une correction empirique de cet effet à partir de mesures météorologiques réalisées au niveau de l'antenne ou de modèles standards. Cette approche permet la correction d'une grande partie de l'erreur induite, mais reste limitée si un positionnement millimétrique est exigé.
- Une seconde approche est basée sur l'utilisation de modèles pour l'estimation de paramètres supplémentaires lors de l'analyse GNSS (paramètres troposphériques). C'est la méthode employée par les logiciels scientifiques de traitement GNSS qui permettent une précision millimétrique sur les positions estimées.

Nous verrons également par la suite que dans le cadre d'un positionnement différentiel avec de courtes lignes de bases (inférieures à 30 km), l'effet de la troposphère est considérablement réduit.

8.3. Erreurs liées à la station

8.3.1. Le trajet multiple

Les trajets multiples sont des réflexions parasites qui peuvent entraîner des erreurs de plusieurs centimètres. Ils se produisent quand le signal GPS arrive au récepteur après plusieurs réflexions sur des surfaces proches du récepteur. Ils dépendent :

- Des conditions autour de l'antenne,
- Du type d'antenne,

- De l'élévation des satellites, les plus bas étant les plus sensibles aux trajets multiples.

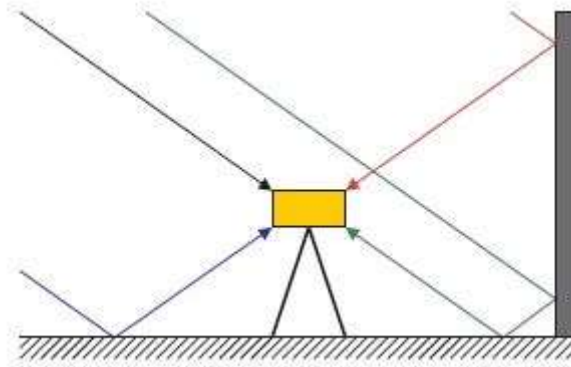


Figure II 19. Trajet multiple

Le trajet multiple impacte principalement les positionnements où une précision centimétrique est exigée : l'impact du trajet multiple peut atteindre des niveaux centimétriques sur la hauteur dans le cas de mesures de phase.

L'erreur engendrée est difficile à corriger, il n'existe pas de modèle général. On peut essayer de s'affranchir des trajets multiples lors des observations en prenant différentes dispositions :

- Éloigner l'antenne de surfaces réfléchissantes ;
- Utiliser des stations munies d'un plan absorbant à leur voisinage pour réduire les réflexions par le sol ;
- Privilégier les antennes à anneau de garde (choke-ring) ;
- Filtrer fortement les signaux reçus ;
- Sélectionner les satellites les plus hauts pour se positionner ;
- Privilégier des séquences d'observation plus longues ;
- Éviter les observations par temps humide (réflexion par pluie / neige).

8.3.2. Les masques

Des éléments de l'environnement de la station peuvent former des obstacles qui représentent des masques pour les signaux GPS. Un masque est un obstacle physique qui empêche la réception du signal GPS par le récepteur. La présence d'un obstacle peut entraîner :

- L'atténuation du signal si l'obstacle empêche le signal de passer en continu.
- La perte momentanée du signal si l'obstacle empêche le signal de passer momentanément. Le suivi de la phase n'est plus assuré, on a alors un saut de cycle, C'est-à-dire une nouvelle ambiguïté de phase.

Il n'existe bien sûr aucun moyen pour corriger l'effet de masques, la seule solution étant de choisir judicieusement la situation de la station.

8.3.3. Le centre de phase de l'antenne

On appelle centre de phase de l'antenne, le point par rapport auquel se fait la mesure. Il faut donc :

- Connaître précisément **la position de ce point**, qui varie en fonction de l'incidence du signal ;
- Pouvoir ramener la mesure au point matérialisé au sol.

Pour décrire la position du centre de phase de l'antenne, on considère un excentrement constant correspondant **la hauteur moyenne du centre de phase**, appelé **PCO** (Phase Center Offset) par rapport à **un point matérialisé de l'antenne**, appelé **ARP** (Antenna Reference Point) et **une partie variable**, appelée **PCV** (Phase Center Variation) qui est fonction de l'élévation et de l'azimut du satellite et différente pour chacune des longueurs d'onde du GNSS (Fig. II 20).

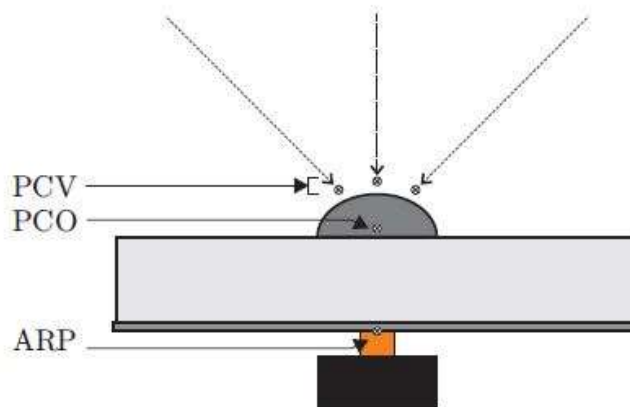


Figure II 20. Modèle d'antenne ARP, PCO et PCV

L'ARP est fixé pour chaque type d'antenne. Des fichiers donnant les PCO et PCV de chaque antenne en fonction des fréquences d'intérêt sont fournis par l'IGS (fichiers dits « atx ») et mis à jour régulièrement. Ils peuvent être introduits directement dans certains logiciels de traitement. On parle **de carte des centres de phase d'antenne**. On peut aussi étalonner ses propres antennes (meilleure solution mais bien sûr beaucoup plus coûteuse).

La mesure précise du vecteur séparant l'ARP et le marqueur sol combinée à l'utilisation de cartes de centre de phase permet donc de ramener la mesure GNSS au marqueur.

En traitement différentiel, si on utilise les mêmes antennes à des distances inférieures à quelques dizaines de kilomètres, il suffit d'orienter les antennes dans la même direction pour que toutes les corrections soient identiques et s'éliminent dans un calcul différentiel.

8.3.4. Phase wind up

On rappelle que la **polarisation** d'une onde correspond à la direction des champs électromagnétiques (contenu dans un plan orthogonal à la propagation) ; cette direction dépend de la phase de l'onde. Les ondes GNSS sont dites à **polarisation circulaire droite** en raison du sens de rotation des vecteurs électromagnétiques lors de la propagation de l'onde.

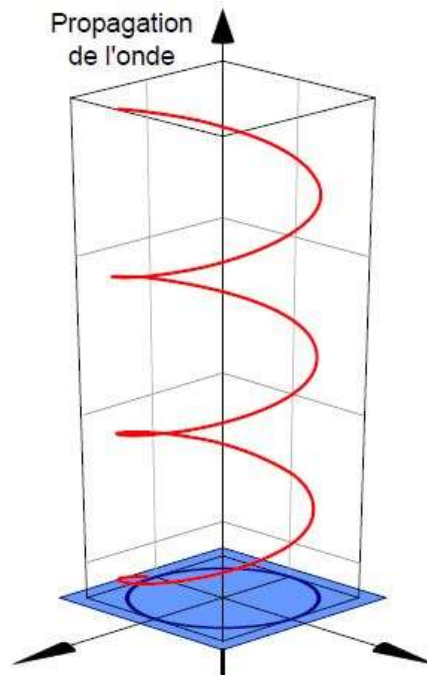


Figure II 21. Polarisation circulaire droite

Le phénomène de phase wind-up est lié à **l'orientation relative des antennes émettrice et réceptrice**. En raison de la polarisation circulaire des ondes portant les signaux GNSS, un changement de cette orientation relative (mouvement du satellite et/ou du récepteur) *induit un changement dans l'observation de la phase pouvant atteindre la moitié de la longueur d'onde de la porteuse observée* (Wu et al., 2023).

Lors d'un **traitement différentiel**, le phase wind-up a un effet **peu significatif** sur la position : à partir de simulations, l'effet est de l'ordre 2 mm pour une ligne de base de 500, jusqu'à 4m pour une ligne de base de 4000 km. Par contre, pour **un traitement non-différentié**, il doit nécessairement être pris en compte pour corriger ce décalage dans la mesure de phase qui peut induire des **erreurs décimétriques sur le positionnement**, en particulier lorsque le récepteur est mobile.

Wu et al., (1993) propose une correction de cet effet basé sur une modélisation dipolaire du couple émetteur - récepteur. Cette correction est implémentée dans la majeure partie des logiciels d'analyse GNSS (Kouba, 2009).

8.4. Déformation de l'écorce terrestre

8.4.1. Marée terrestre

La croûte terrestre est aussi sujette aux forces gravitationnelles induites par la Lune et le Soleil qui entraîne le phénomène de marées océaniques. La majeure partie de cet effet, *appelé marée terrestre* (Solid Earth tides.).

Les marées terrestres peuvent atteindre **30 cm sur la composante verticale et 5 cm sur les composantes horizontales**. Elle se décompose en une partie permanente (de -12 cm à +6 cm sur la composante verticale) et une partie périodique (de moyenne quasi-nulle sur 24 h). Une modélisation sous forme d'harmoniques sphériques permet une correction de cet effet avec une précision de l'ordre de 1 mm. Pour une précision de l'ordre de 5 mm un développement à l'ordre 2 de ces harmoniques est suffisant (*Kouba et Héroux, 2000 ; Kouba, 2009*).

Une description complète des effets des marées terrestres et de leur correction est disponible dans les conventions de l'IERS (*Petit and Luzum, 2013*).

8.4.2. Surcharge océanique

La surcharge océanique (Ocean loading.) est une *déformation de la croûte terrestre liée au phénomène de marées océaniques*. Cet effet est **plus faible que les marées terrestres** d'un ordre de grandeur mais présente une variabilité spatio-temporelle plus importante (il ne présente pas de terme « permanent »).

L'impact de la surcharge océanique est surtout significatif pour du positionnement proche des côtes et sur des durées inférieures à 24 h et doit être obligatoirement corrigé lorsqu'une précision inférieure à 10 cm est attendue, l'impact sur la position de la station étant centimétrique.

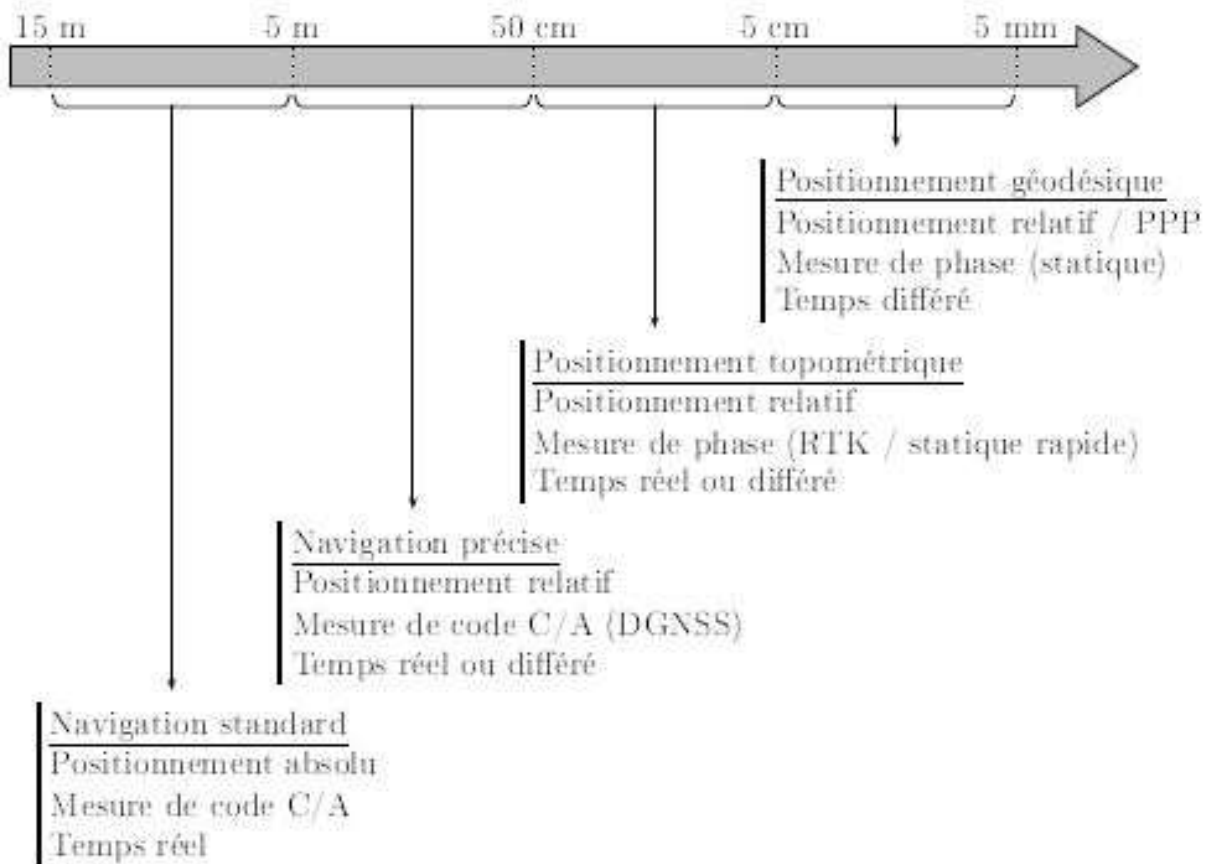
8.5.Synthèse des différents postes d'erreur

L'impact des erreurs sur 2 modes de positionnement par GNSS. **Pos. Standard** : positionnement instantané et absolu à partir de mesures de code. **Pos. Précis** : positionnement différentiel, en post-traitement avec des mesures de phase sur une longue période (Ait-Lakbir, 2023).

Tableau II 1. Synthèse des différentes erreurs

Source		Impact de l'erreur	
		Pos. standard	Pos. précis
Satellite	Horloge	3 m	5 mm
	Orbite	2 m	
	Bruit de code	3 m	
Propagation	Ionosphère	3 m	1 mm
	Troposphère	1 m	5 – 25 mm
Station	Trajet multiple	1 m	2 – 15 mm
	Bruit de mesure	1 m	2 mm
	Centre de phase	1 m	2 mm
	Horloge	0.5 m	1 mm
Erreur totale typique		10 – 15 m	5 – 20 mm

Utilisation des GNSS pour le positionnement



A l'issu de ce chapitre l'apprenant sera capable à distinguer entre :

- ***Positionnement absolu ou ponctuel ;***
 - Positionnement absolu sur le code
 - Positionnement ponctuel précis (PPP)
- ***Positionnement relatif ou différentiel ;***
 - Positionnement différentiel par mesure de code (DGNSS « T différé » ; LADGNSS et WADGNSS « T réel »)
 - Positionnement différentiel par mesure de phase (Statique rapide et trajectographie « T différé » ; RTK et NRTK « T réel »)

1. Introduction

On distingue deux grands modes de positionnement à l'aide du GNSS (Lahaye; Ladet, 2014) :

- Positionnement absolu ou ponctuel : la position de l'antenne est déterminée de manière directe à partir des observations et de la position des satellites, dans le même référentiel.
- Positionnement relatif ou différentiel : le vecteur séparant l'antenne de position inconnue et une ou plusieurs stations de référence est estimé. L'antenne est ainsi positionnée dans le même référentiel que les stations de référence.

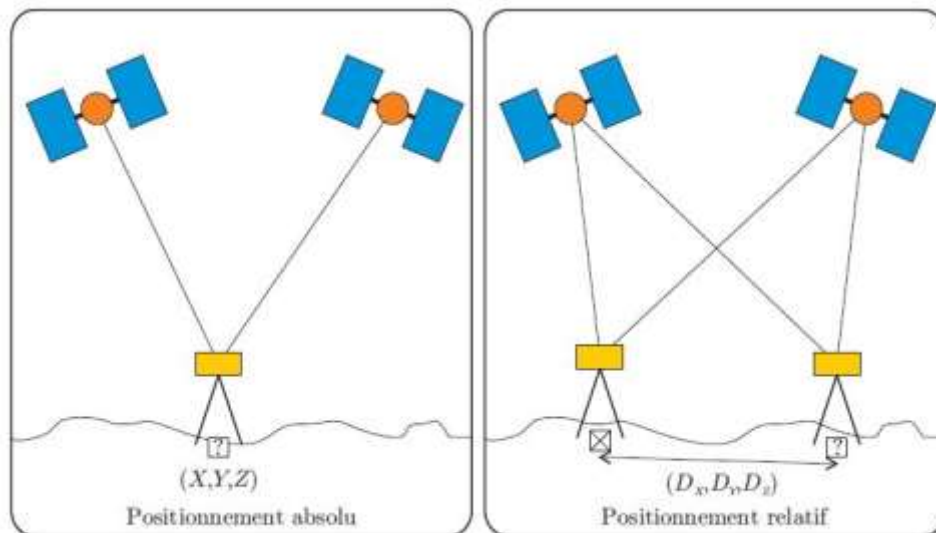


Figure III 1. Positionnement absolu et relatif

Ces deux modes de positionnement peuvent être réalisés à partir de mesures sur le code et/ou de mesures sur la phase, en temps réel ou en temps différé.

2. Positionnement absolu

2.1. Positionnement absolu sur le code

C'est le mode de positionnement **autonome** ou naturel voire par défaut de chaque GNSS. Il est utilisé pour la navigation (militaire, automobile, aérienne, pédestre, etc.). Le positionnement est **réalisé à partir de mesures de code issue d'au moins 4 satellites, sur une ou deux porteuses, en temps réel et sur un seul récepteur**. L'**exactitude** du positionnement est de l'ordre de **5 à 20 m** et principalement de la géométrie de distribution des satellites.

Le positionnement se fait dans le repère de référence associé au GNSS. C'est en général le seul moyen d'y accéder.

L'exactitude sur le positionnement est caractérisée par les facteurs de dilution de précision, $nDOP$ (Dilution Of Precision) (Richard, 2016) :

$$\sigma_n = nDOP \cdot \sigma_0 \quad (\text{III } 1)$$

Où σ_0 est la précision de la mesure et σ_n la précision du positionnement.

n : Désigne les différentes composantes du positionnement :

$n = V$: Composante verticale de la solution

$$VDOP = \frac{\sigma_h}{\sigma_0} \tag{III 2}$$

$n = h$: Composante horizontale de la solution

$$HDOP = \frac{\sqrt{\sigma_e^2 + \sigma_n^2}}{\sigma_0} \tag{III 3}$$

$n = P$: Composante position de la solution

$$PDOP = \frac{\sqrt{\sigma_e^2 + \sigma_n^2 + \sigma_h^2}}{\sigma_0} \tag{III 4}$$

$n = T$: Composante temps de la solution

$$TDOP = c \frac{\sigma_t}{\sigma_0} \tag{III 5}$$

$n = G$: Composante position et temps de la solution

$$GDOP = \frac{\sqrt{\sigma_e^2 + \sigma_n^2 + \sigma_h^2 + c^2 \sigma_t^2}}{\sigma_0} \tag{III 6}$$

Plus le $nDOP$ est grand, moins le résultat est précis : *par exemple*, avec une précision de mesure de 10 mètres et un PDOP de 7, la précision théorique attendue pour un positionnement instantané sera de 70 m. Le $nDOP$ se calcule à partir de la matrice de variance -covariance des inconnues estimées (position de la station et temps récepteur). Cette matrice est exprimée dans le repère géodésique local (est, nord, hauteur, temps) :

$$\begin{pmatrix} \sigma_e^2 & COV_{(e,n)} & COV_{(e,h)} & COV_{(e,t)} \\ COV_{(n,e)} & \sigma_n^2 & COV_{(n,h)} & COV_{(n,t)} \\ COV_{(h,e)} & COV_{(h,n)} & \sigma_h^2 & COV_{(h,t)} \\ COV_{(t,e)} & COV_{(t,n)} & COV_{(t,h)} & \sigma_t^2 \end{pmatrix} \tag{III 7}$$

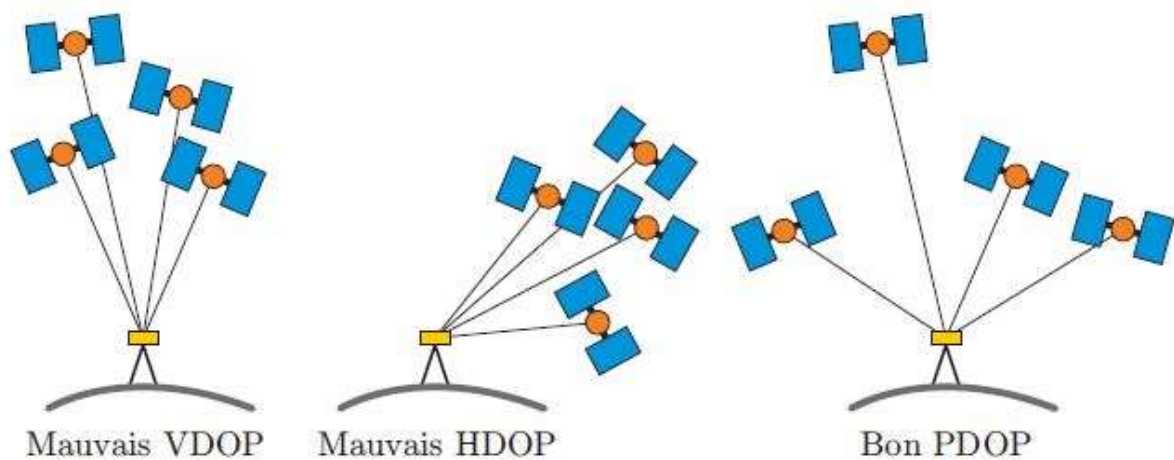


Figure III 2. Interprétation géométrique des facteurs de dilution de précision

2.2. Positionnement Ponctuel Précis

Le PPP (Positionnement Ponctuel Précis ou *Precise Point Positioning*) est un positionnement absolu réalisé sur les mesures de phase et de code en post-traitement (traitement en temps différé) (Zumberge et al., 1997).

Il consiste à calculer une solution GNSS pour un récepteur unique en utilisant des orbites et des corrections d'horloge satellite précises ainsi que les paramètres de rotation des pôles, déterminés par des centres d'analyse GNSS à partir d'un réseau global comme celui de l'IGS (International GNSS Service) analysé en différentiel (voir section suivante). Les seuls paramètres nécessitant d'être estimés sont alors les paramètres propres à la station (position, troposphère, erreur d'horloge). La position est alors déterminée dans le repère de référence dans lequel les orbites sont exprimées.

L'avantage du PPP est de diminuer de manière significative le temps de calcul puisqu'une seule station est traitée. Le temps de calcul augmente linéairement avec le nombre de stations du PPP et non de manière géométrique comme pour un traitement différentiel en réseau (voir la section suivante).

La précision finale est généralement inférieure à celle obtenue pour un traitement différentiel statique avec une précision millimétrique sur la composante planimétrique et de l'ordre du centimètre sur la composante verticale et cela pour des sessions de durée supérieure à 6h.

Cette nouvelle technique est de plus en plus utilisée, les applications étant variées : analyse globale ou régionale de réseaux permanents, transfert de temps, météorologie, positionnement cinématique de mobiles au sol, dans le ciel ou dans l'espace (satellites LEO).

3. Positionnement différentiel

C'est le mode de positionnement le plus précis car il permet d'éliminer les erreurs systématiques en réalisant des différentes observations entre des stations.

Pour cela, il est nécessaire de disposer de deux stations qui observent simultanément. Les observations seront alors comparées pour déduire la position relative des deux stations. Le positionnement peut se baser sur des mesures de code ou de phase, pour un temps d'observation allant de quelques secondes à plusieurs jours voire plusieurs années. Le calcul est réalisé en temps réel ou en temps différé, avec des éphémérides radiodiffusées ou recalculées.

La position est alors déterminée dans le système de référence dans lequel une des stations, choisies comme référence (et fixe), est exprimée. *La précision atteinte varie alors du mètre à quelques millimètres en fonction des choix effectués.*

Tableau III 1. Différentes stratégies de positionnement différentiel par GNSS

	Mesure de code	Mesure de phase
Temps réel	LADGNSS WADGNSS	RTK NRTK
Temps différé	DGNSS	Statique rapide Statique Trajectographie

3.1. Positionnement différentiel par mesure de code

3.1.1. Positionnement temps différé

En temps différé, l'analyse des observations GNSS est réalisée après acquisition. On utilise les observations d'une ou plusieurs stations fixes situées à proximité (jusqu'à une centaine de kilomètres) de la station inconnue, appartenant par exemple à un réseau GNSS permanent. Les corrections sont alors calculées à partir de ces observations (en utilisant toujours les orbites radiodiffusés) et appliquées aux observations acquises par la station mobile

3.1.2. Positionnement temps quasi-réel

Les corrections de pseudo-distances sont émises en temps réel au récepteur mobile (de coordonnées inconnues). Ces corrections sont transmises dans le format RTCM (Radio Technical Commission for Maritime Services), qui est un standard de transmission de correction DGNSS.

On différencie LADGNSS et WADGNSS en fonction du mode de transmission et de l'échelle de travail utilisée (*Lahaye and Ladet, 2014*) :

- **Le LADGNSS (Local Area DGNSS)** est destiné à être utilisé sur une aire géographique assez restreinte. La station fixe réalise l'acquisition des observations GNSS et en déduit les corrections qu'elle émet par radio ou par standard de téléphonie mobile.
- **Le WADGNSS (Wide Area DGNSS)** peut être utilisé sur une zone plus large. Cette fois-ci, plusieurs stations fixes réalisent l'acquisition des observations GNSS et en déduisent les corrections qu'elles envoient à des satellites géostationnaires qui les réémettent sous forme de cartes de corrections différentielles à appliquer aux mesures de code. Ce service est généralement fourni contre abonnement (Omnistar, Starfre Network, etc....)

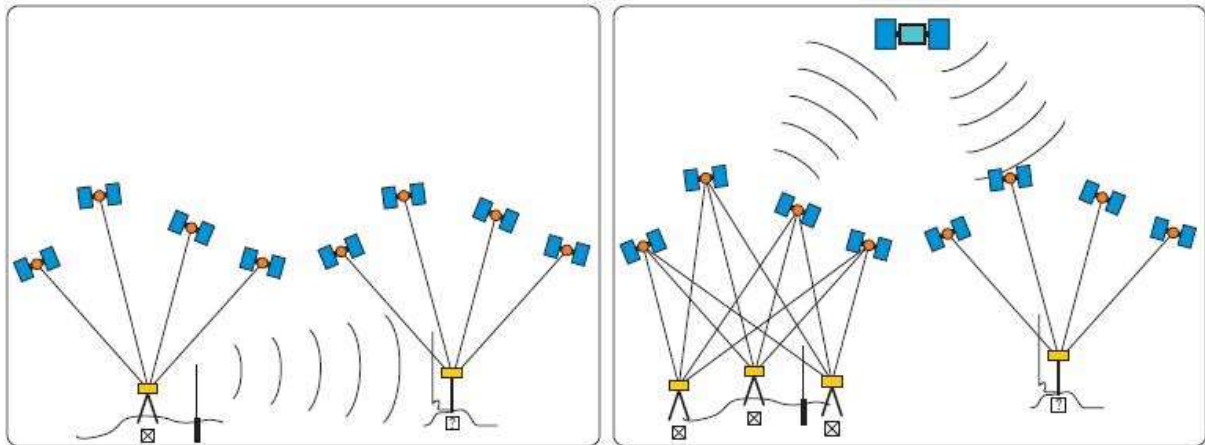


Figure III 3. Position DGNSS : LADGNSS (à gauche) et WADGNSS (à droite)

Cette méthode de positionnement peut aussi s'appliquer aux mesures de phase, mais nous allons voir que pour ces mesures, la double différenciation est privilégiée car plus performante (et moins bruitée quand appliquée à des mesures de phase (Hofmann-Wellenhof et al., 2008).

3.2. Positionnement différentiel par mesure de phase

Appelée **simple différence**, présente l'avantage d'éliminer le terme d'erreur d'horloge du satellite (δt^j) et réduit les effets des erreurs d'orbite et de propagation de l'onde dans l'atmosphère, en particulier si les stations sont proches (Lahaye and Ladet, 2014).

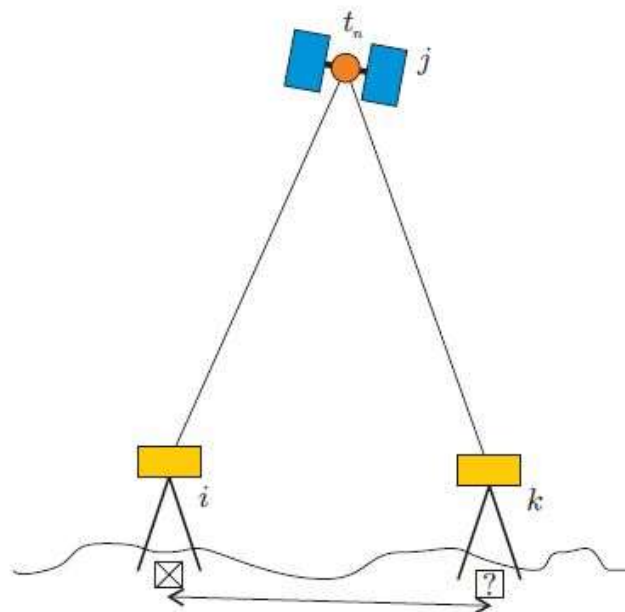


Figure III 4. Simple différence entre des récepteurs i et j

Considérons maintenant un autre satellite l , observé par les deux récepteurs i et k en même temps que le satellite j et calculons la différence des simples différences réalisées sur j et l .

Cette formulation, appelée **double différence** élimine les erreurs d'horloge récepteur. De plus les ambiguïtés conservent encore leur caractère entier.

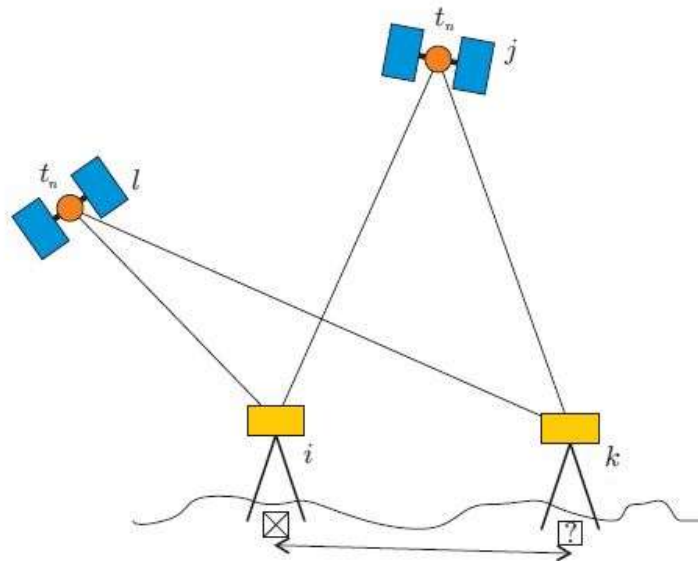


Figure III 5. Double différence entre des récepteurs i et j et des satellites k et l

Si la station i est fixe et de coordonnées connues, la linéarisation de l'équation de double différence autour d'une position approchée de la station k permet la détermination du position de k par rapport à i après inversion des équations d'observation (par moindres carrés par exemple).

Enfin, une nouvelle différenciation peut être à nouveau faite sur les équations double différence, en considérant deux époques successives. Cette nouvelle différenciation, appelée **triple différence** présente l'avantage d'éliminer les ambiguïtés entières inconnues. elle est généralement utilisée pour étudier les sauts de cycle.

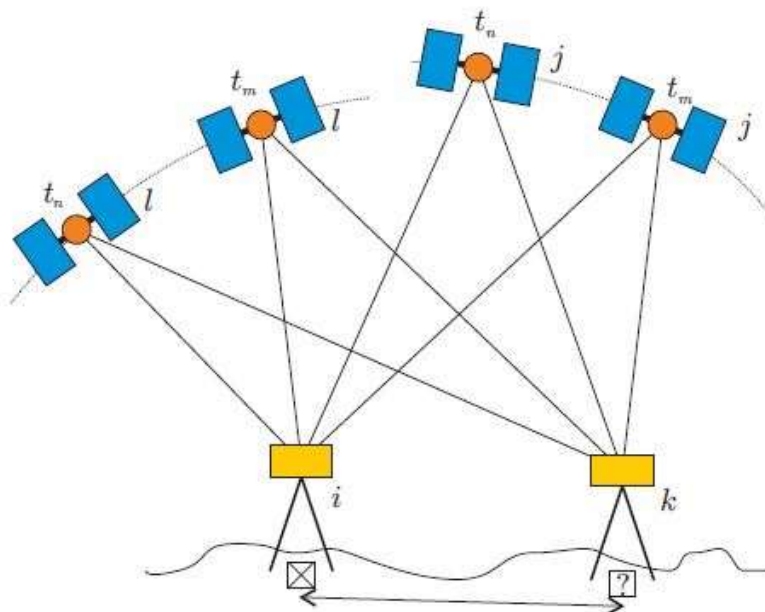


Figure III 6. Triple différence entre récepteurs i et j , des satellites k et l , à des époques t_n et t_m

Notons que l'ensemble des équations détaillées ici sont valables uniquement pour des mesures de phase réalisées sur des signaux de même fréquence.

3.2.1. Positionnement en temps différé

On dispose d'une ou plusieurs stations de référence fixes et de stations mobiles ou fixes de coordonnées inconnues. Les observations GPS sont analysées après acquisition (post-traitement). Le positionnement des stations inconnues est réalisé par compensation des lignes de bases les reliant aux stations de coordonnées connues. En fonction de l'application, le positionnement est submétrique à millimétrique :

Trajectographie : Elle ne se base pas uniquement sur la mesure de phase, c'est une méthode hybride basée également sur la mesure du code pour faciliter la résolution des ambiguïtés, l'idée étant de concilier les avantages des deux types d'observation (précision de la phase, non-ambiguïté du code). La précision du positionnement du mobile par rapport au récepteur fixe éloigner d'une centaine de kilomètres est de l'ordre de 50cm ; par contre la position relative des points de la trajectoire est centimétrique.

Positionnement statique rapide : les mesures de phases sont réalisées sur une durée courte (15 à 30 min) à l'aide de récepteurs mono ou bifréquence. Pour un résultat précis (centimétrique), les lignes de bases ne doivent pas excéder quelques dizaines de kilomètres. Les ambiguïtés entières sont fixées avec un algorithme de résolution rapide. La durée des observations est en général fixée en accord avec la longueur des lignes de base en suivant approximativement les ordres de grandeur suivants :

- Quelques minutes pour des bases inférieures au kilomètre ;
- 20 min + 2 min / km en monofréquence ;
- 10 min + 1 min / km en bifréquence.

La précision est de l'ordre de $5 \text{ mm} \pm 10^{-5} \cdot B$ à $5 \text{ mm} \pm 10^{-6} \cdot B$ (B est la ligne de base) (Botton et al., 1997).

Positionnement statique : les mesures de phases sont réalisées sur une durée d'1 h à plusieurs années selon le type d'application, les temps d'observation longs permettent de tirer parti des évolutions de la géométrie de la constellation. On utilise des récepteurs bifréquences ainsi que des antennes réduisant les trajets multiples. Les lignes de bases peuvent varier de quelques centaines à plusieurs milliers de kilomètres. Les calculs sont réalisés à l'aide de logiciels professionnels ou scientifiques (Bernese GNSS Software, Gamit, Gipsy-Oasis II) sur les observations « ionosphere free » avec des orbites radiodiffusées ou précises, une prise en compte plus ou moins évoluée de l'effet de la troposphère et la fixation des ambiguïtés. On admet que la précision sur les positions varie approximativement entre les ordres de grandeur

$2 \text{ mm} \pm 10^{-7} \cdot B$ et $2 \text{ mm} \pm 10^{-8} \cdot B$ (B est la ligne de base). Pour des réseaux mondiaux, l'exactitude est absolue centimétrique sur toute la surface du globe.

3.2.2. Positionnement temps réel

En positionnement temps réel sur la mesure de phase, on distingue deux modes de fonctionnement : le **RTK**, et son évolution avec le développement des stations GNSS permanentes, le **NRTK** (Junior, 2017).

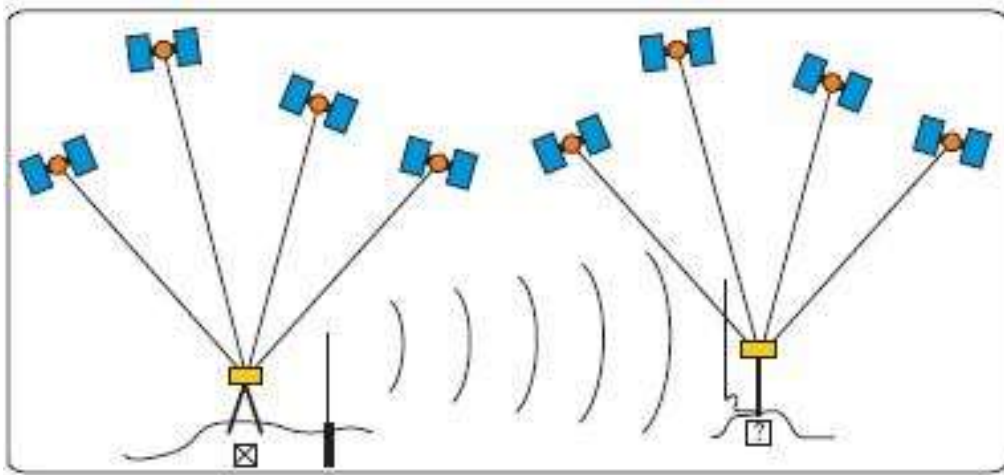


Figure III 7. Positionnement RTK

3.2.2.1. Le RTK

On appelle RTK (Real Time Kinematic pour Cinématique temps réel) le **positionnement différentiel temps réel par mesure de phase à partir d'une station fixe de coordonnées connues**. Le principe est assez similaire au DGPS, excepté que la mesure utilisée est ici une mesure de phase et que le mobile calcule des doubles différences au lieu d'appliquer des corrections venant de la station de base.

On dispose d'une station de référence de coordonnées connues équipée d'un émetteur radio. Cette station transmet ces observations de phase et sa position à une station inconnue (éventuellement mobile via le protocole NTRIP) équipée d'un récepteur radio. Cette transmission se fait à nouveau selon le standard RTCM (3.0 ou 3.1) par radio UHF en général. La transmission de ces corrections différentielles est cependant plus complexe qu'en mode DGPS car les messages de corrections de mesures de phases sont plus longs.

Le RTK permet un positionnement instantané avec une précision centimétrique mais cette précision dépend fortement de la distance entre la station de référence et la station inconnue.

Un temps d'initialisation (3 à 5 s) peut être nécessaire pour la résolution des ambiguïtés entières (en particulier si la station inconnue est mobile) à l'aide d'algorithmes de résolution rapide (AROF, *Ambiguity Resolution On the Fly*) ; pour être efficaces ces algorithmes nécessitent

cependant des distances entre station de référence et station inconnue qui ne dépassent pas 10 à 20 km (Wanninger, 2004).

3.2.2.2. Le NRTK

Une évolution du positionnement RTK est apparue avec le développement des réseaux GNSS permanents. Au lieu d'utiliser les observations mesurées en une seule station fixe, on utilise un **réseau de stations GPS**, de coordonnées connues pour le positionnement en temps réel. On parle alors de NRTK (*Network Real Time Kinematic* pour Cinématique temps réel en réseau). La méthode est alors semblable au RTK simple, la transmission des corrections se faisant alors plus fréquemment par téléphonie mobile (GPRS/EDGE/3G). **La seule différence majeure par rapport au RTK simple est la longueur des lignes de bases qui dans le cas du NRTK sont généralement plus longues** (densité du réseau GNSS permanent) ; cette source d'erreur est compensée par la prise en compte de plusieurs stations fixes au lieu d'une seule.

Trois types de solutions techniques NRTK existent, fournissant des précisions équivalentes. Les seules différences entre ces solutions interviennent au niveau de la répartition des tâches réalisées par le centre de calcul (qui récupère les observations des stations permanentes et transmet des informations de correction) et la station inconnue (Cina et al., 2015).

- **La solution MAC (Master Auxiliary Concept)** : C'est la solution où la majorité des opérations sont réalisées côté récepteur. Le récepteur envoie sa position approchée au serveur qui en déduit un sous-réseau de stations proches de la station inconnue. Une station maîtresse est alors choisie parmi ce sous-réseau, les autres étant qualifiées d'auxiliaires. Sont alors envoyées à la station inconnue les observations de la station maîtresse et des corrections différentielles pour les stations auxiliaires, calculées au niveau du serveur et qui sont interpolées à l'endroit de la mesure ;
- **La solution FKP (Flaschen Korrektur Parameter)** : C'est une solution intermédiaire concernant la répartition des opérations, entre récepteur et serveur. Le serveur calcule un modèle surfacique de corrections à partir du réseau GNSS. Ce modèle de corrections est alors envoyé au récepteur qui les intègre dans son calcul en l'interpolant au niveau de sa position approchée ;
- **La solution VRS (Virtual Reference Station)** : C'est la solution où la majorité des opérations sont réalisées côté serveur. Le récepteur envoie sa position approchée au serveur de calcul. À partir des observations acquises par le réseau de stations permanentes, le serveur simule des observations pour une station virtuelle située à la position approchée envoyée par le récepteur et les transmet. Le récepteur utilise alors ces observations simulées pour réaliser un traitement différentiel.

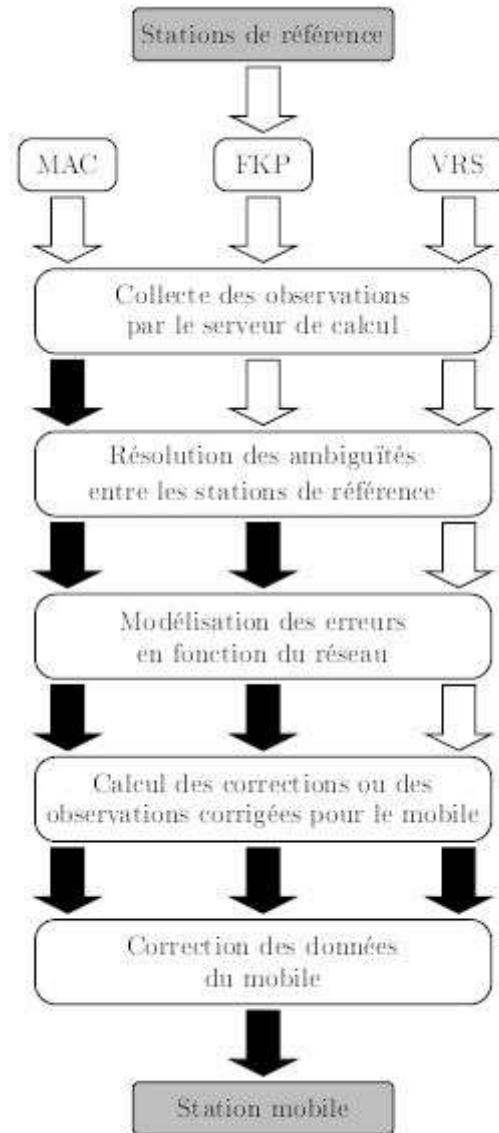


Figure III 8. Les différentes méthodes de NRTK. Les étapes suivant les flèches vides sont réalisées au niveau des serveurs ; Les étapes suivant les flèches pleines au niveau du récepteur mobile

Les principaux GNSS



Ce chapitre vise à doter les étudiants des connaissances et compétences pour les rendre capable à :

- *Connaitre les principaux GNSS ;*
- *Montrer les différents services de chaque système GNSS ;*
- *Déterminer l'architecture de chaque système (Secteur spatial, secteur contrôle et secteur utilisateur) ;*
- *Différencier entre les principaux GNSS.*

1. Le système GPS

Le système Américain de localisation par satellite GPS est le système de localisation le plus **connu** et le plus **utilisé** aujourd'hui, appelé officiellement **NAVSTAR** (Navigation System by Timing And Ranging). Les voitures, bateaux, avions et même la plupart des smart phones sont dotés d'un récepteur GPS. Ce système de **radionavigation par satellites** donne la possibilité à un nombre illimité d'utilisateurs de calculer leurs positions instantanément avec une précision de quelque mètre en trois dimensions (latitude, longitude et altitude) dans **n'importe quel point de la terre** à l'aide d'un récepteur électronique qui traite les signaux transmis par **quatre satellites** au minimum. Ce système a été développé et mis en place par le département de la **Défense américaine** (DoD). Conçu en premier lieu pour des raisons militaires, actuellement il est couramment utilisé dans des applications civiles telles que le transport, l'agriculture, opérations de sauvetage et des autres applications ou services qui ne cessent de voir le jour.

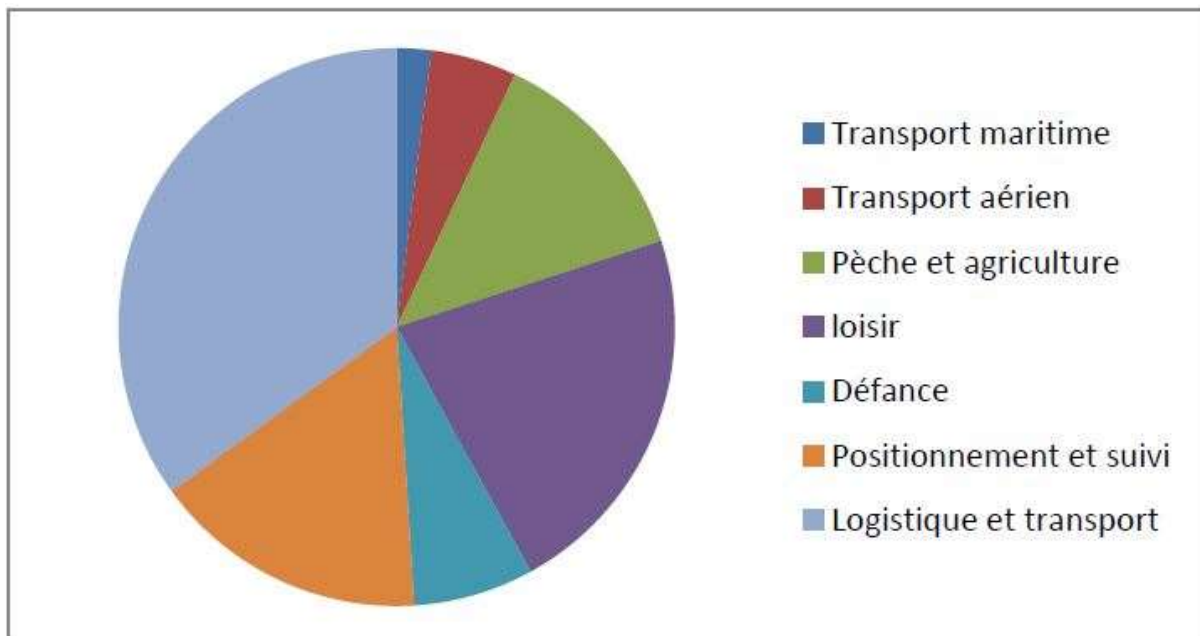


Figure IV 1. Importance du système GPS suivant les domaines d'utilisation

1.1. Architecture du système GPS

Le système GPS se compose de **trois segments principaux**, le segment *spatial*, le segment de *contrôle* et le segment *utilisateur*. Le secteur spatial représente l'ensemble des satellites GPS qui transmettent des signaux contenant les informations nécessaires pour la navigation. Le secteur utilisateur qui est un récepteur électronique qui reçoit ces signaux et calcule sa position à base de ces informations. Le rôle du secteur de contrôle est de gérer et suivre les satellites pendant leur durée de vie (*Xu and Xu, 2007*).

1.1.1. Secteur spatial

Le secteur spatial est une constellation de **24 satellites partagés en six différentes orbites MEO** avec une inclinaison de 55° par rapport à l'équateur et **une altitude moyenne de 20200 Km**, les orbites sont séparées par 60° entre elles pour couvrir les 360° . **Chaque satellite parcourt l'orbite en 11h58m02s** avec une **vitesse de 3874 m/s**, donc chacun tourne autour de la terre deux fois par jour, les satellites GPS transmettent les signaux GPS dans deux bandes de fréquences, la première nommée L1 à 1575.42 MHz, et la deuxième nommée L2 à 1227.60 MHz.

1.1.2. Secteur contrôle

Le rôle du secteur de contrôle est **de gérer, surveiller et piloter les satellites GPS**, pour assurer le bon fonctionnement du système, ce secteur doit corriger les orbites et recharger les batteries des satellites en plus de mettre à jour les informations nécessaires pour la navigation comme les données éphéméride et horloge du satellite.

Le secteur de contrôle se compose de plusieurs stations, une station principale nommée **MSC** (Master Control Station) située dans le Colorado USA et **cinq autres stations MS** (Monitor Station), dont le rôle est de suivre les satellites pour assurer les corrections des horloges et des corrections sur les orbites. En plus, ces stations transmettent en permanence les données éphémérides à la constellation pour faire une mise à jour de ces données et assurer le bon fonctionnement du système.

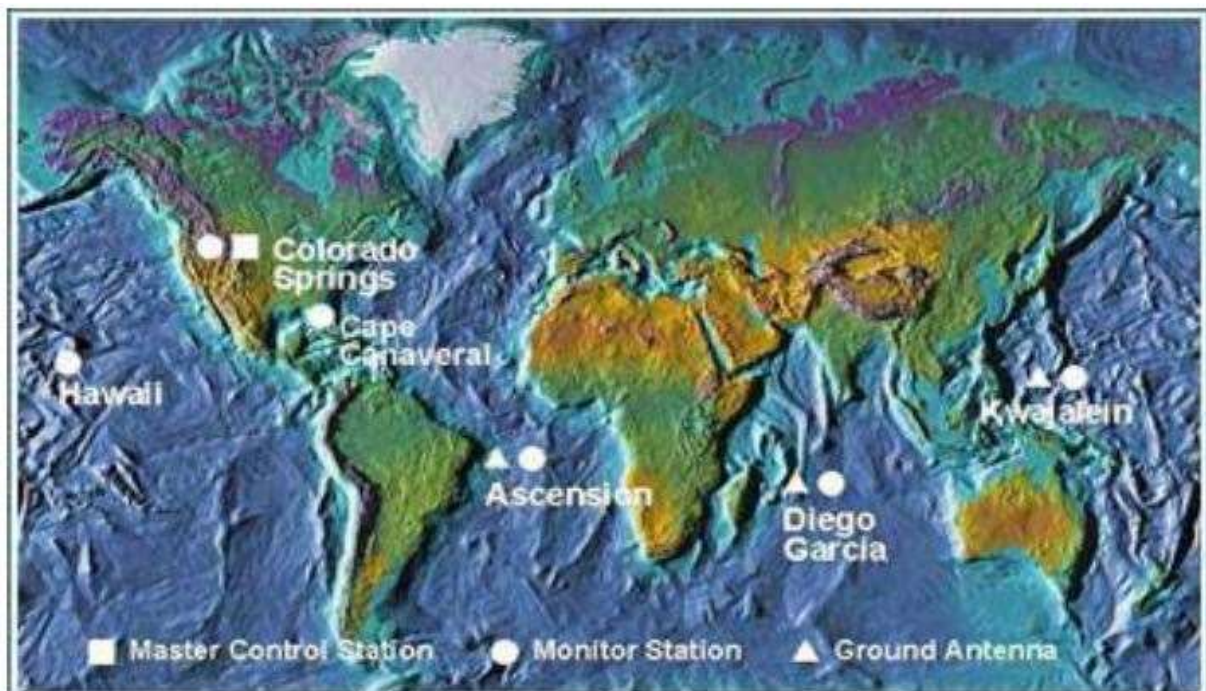


Figure IV 2. Les différentes stations pour le secteur contrôle (<http://www.faa.gov>)

L'autre composante du secteur contrôle sont les stations antennes. Deux types des antennes sont utilisées, la première émettrice qui travaille dans la bande L utilisée pour transmettre les

informations aux satellites et la deuxième réceptrice dont le rôle est de récupérer les données transmises par les satellites dans les bandes **L1** et **L2**.

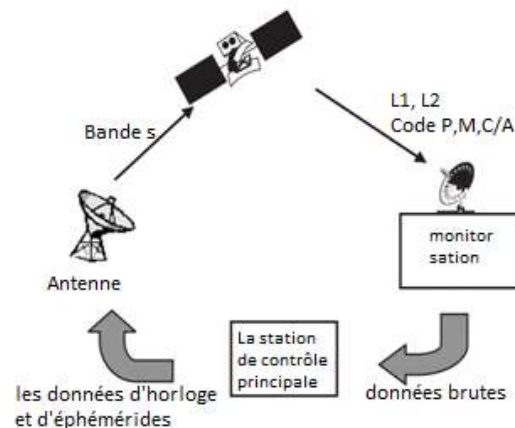


Figure IV 3. Principe de fonctionnement pour le secteur contrôle

1.1.3. Secteur utilisateur

Le secteur utilisateur représente l'interface entre les utilisateurs et le système GPS, ce secteur c'est les récepteurs GPS qui sont des équipements électroniques dont le rôle est de collecter les signaux transmis par les satellites à l'aide d'une antenne intégrée qui travaille dans les fréquences GPS **L1** et **L2**, puis faire un traitement de ces signaux basés sur plusieurs algorithmes développés pour calculer la position.

1.2. Services du système GPS

Le système GPS assure deux types de services pour les utilisateurs avec des performances différentes, un service pour les applications civiles nommé **SPS** (Standard Positioning Service) et un autre service dédié aux applications militaires de l'armée Américain **PPS** (Precise Positioning Service).

1.2.1. Le service SPS

Le SPS est un service de positionnement et de synchronisation fourni par le système GPS à la fréquence **L1** transmise par tous les satellites. Il utilise le code **C/A**, ce service est disponible pour un usage civil, commercial, scientifique et pacifique.

1.2.2. Le service PPS






Le PPS est un service de positionnement et de synchronisation fourni par le système GPS aux fréquences **L1** et **L2**, transmises par tous les satellites, contient un code **P**, ce code sera normalement cryptographiquement modifié par un code **Y**. Le code **Y** ne sera pas disponible pour les utilisateurs qui ne disposent pas des clés cryptographiques valides. Ce service est principalement destiné aux forces armées et agences gouvernementales américaines, qui est également rendu disponible à d'autres gouvernements.

1.3.Modernisation du système GPS

Dès que le système GPS est mis en service, des développements et des améliorations techniques ont été effectués à chaque nouveau satellite lancé, basé sur ces améliorations les satellites GPS sont distribués sur plusieurs générations. Dans la **première génération** ces renouvellements touchaient les équipements et les composants des satellites pour **améliorer le rendement de l'horloge, autonomie du satellite et la conception**, etc. Dans cette génération, les satellites GPS utilisent **deux porteuses et deux codes** pour transmettre les données de navigation, donc chaque satellite émet trois signaux, un pour les applications civiles codé par le code C/A dans la bande L1 (1575,42 MHz) et deux pour les applications militaires cryptées par le code P(Y) dans les deux bande L1 (1575,42 MHz) et L2 (1227,60 MHz).

En 2005 le premier satellite du **block IIR-M** a été lancé. Le progrès majeur dans cette **nouvelle génération** des satellites GPS c'est **l'ajout des nouveaux signaux qui comportent plusieurs améliorations** qui sont très intéressantes aux utilisateurs, car elles assurent une meilleure précision et peuvent donner la possibilité aux récepteurs de corriger les différentes erreurs. Elles **assurent une plus grande fiabilité** de positionnement avec l'avantage d'avoir plusieurs bandes ce qui est très utile pour l'amélioration de la précision. En effet, la majorité des bruits indésirables peuvent être considérablement réduits, à l'image des effets ionosphérique et troposphérique. Pour ces raisons et à cause de l'augmentation des applications civiles qui nécessitent une haute précision, que le ministère américain de la Défense (DoD) a décidé d'inclure **un nouveau signal civil** dans les satellites du block IIR-M sur la bande de fréquence **L2**. Ce signal qui est similaire au signal civil existant dans la bande L1 appelé **L2C** apporte plusieurs améliorations techniques qui peuvent aider les récepteurs à améliorer leur précision. La deuxième révolution dans le système GPS c'est l'ajout **d'un troisième signal civil** sur une autre bande de fréquence appelée **L5** dans le block IIR-M, ce signal qui est **réservé exclusivement aux services de sécurité de l'aviation a une porteuse de fréquence 1176,45 MHz**.

Tableau IV 1. Différentes générations des satellites GPS (Yahia and Sofiane, 2011)

Block IIA	Block IIR	Block IIR(M)	Block IIF	GPS III
				
0 satellites opérationnels	12 satellites opérationnels	7 satellites opérationnels	12 satellites opérationnels	En développement
*Data codée par le code d'étalement C/A dans la fréquence L1 pour utilisation civile * Data codée par le code d'étalement P(Y) dans la fréquence L1 & L2 pour utilisation militaire *Durée de vie de 7.5 ans *Lancés entre 1990 & 1997	*Même signaux comme le Block IIA. * Amélioration de la fonctionnalité pour l'horloge *Durée de vie de 7.5 ans * Lancés entre 1997 & 2004	* Même signaux * 2 ^{em} signal pour les applications civil L2C *nouveau code M pour les applications militaire *Durée de vie de 7.5 ans * Lancés entre 2005 & 2009	* Même signaux * 3 ^{em} signal pour les applications civil L5 *Intégration d'une horloge atomique. *Durée de vie de 12 ans * Lancés entre 2010 & 2016	* Même signaux * 4 ^{em} signal pour les applications civil L1C *Durée de vie de 15 ans

1.4. Signaux GPS

1.4.1. Ondes porteuses

Initialement, deux porteuses sont utilisées pour la transmission des signaux GPS : **L1** et **L2**. Avec la modernisation du système, une nouvelle fréquence a été mise en place, **L5**. Les signaux sont tous transmis à une fréquence multiple de la fréquence fondamentale du système $f_0 = 10,23 \text{ MHz}$.

Tableau IV 2. Les différentes fréquences du système GPS (Yahia and Sofiane, 2011)

Porteuse	Facteur (f_0)	Fréquence (MHz)	Longueur d'onde (cm)
L1	154	1 575.42	19.0
L2	120	1 277.60	24.4
L5	115	1 176.45	25.5

Ces porteuses sont modulées par des codes de pseudodistances et le message de navigation.

1.4.2. Code

Initialement, deux codes étaient disponibles pour le GPS : un code civil (le **C/A** - code), un code destiné aux militaires (le **P(Y)** - code). Suite à la modernisation du système, 4 codes de positionnement sont venus compléter le système.

Le système fonctionne selon le mode **CDMA**, les codes sont donc uniques pour chaque satellite. Chaque satellite est ainsi caractérisé par un numéro **PRN** (Pseudo-Random Noise) correspondant au patron unique du code qu'il émet. Lorsque le satellite est amené à disparaître, le satellite remplaçant récupère son numéro **PRN**. Il existe **32 codes PRN GPS** correspondant donc à **32 patrons différents**.

- **Le C/A-code** : c'est le code **civil** non-classifié d'origine du système. Il se compose d'une suite de **1023** bits (0 ou 1) de durée **1 ms** (soit 1,023 Mbps¹⁰ « 10 : Megabits par seconde ») et qui **se répète** toutes les 1 ms (soit environ 300 km). **Ces codes sont générés selon la méthode de Gold Code avec une clé unique pour chaque satellite. Ils modulent uniquement la porteuse L1.**
- **Le P(Y)-code** : c'est le code **militaire** original de GPS. Le code P est non classifié mais **un second code, W, est utilisé pour le crypter** (anti-spoofing détaillé précédemment). Il se compose de $2,3527 \cdot 10^{14}$ bits émis à la cadence de 10,23 Mbps : sa longueur est donc de 266,41 jours mais **il est réinitialisé chaque dimanche à minuit**. C'est donc une séquence très longue, difficile à exploiter si le récepteur ne dispose pas d'informations a priori : le positionnement par ce code n'est possible que sous réserve d'un premier positionnement à l'aide du C/A-code.
- **Le L2C-code** : c'est un nouveau code **civil, à usage commercial**, créé pour la modernisation de GPS. Il est en cours de déploiement (émis à partir des satellites du bloc II-M). **Il se décompose en deux codes pseudo-aléatoires** (L2CL et L2CM pour Civilian Long et Civilian Moderate) générés à 511,5 kbps¹¹ (11. Kilobits par seconde), soit L2C à 1,023 Mbps. Ce code a **une longueur de 767250 bits et dure 1,5 s**. Comme son nom l'indique, il module la porteuse L2 des signaux émis par les satellites récents.

- **Le M-code** : c'est un nouveau **code militaire** (et donc protégé) dont l'émission a débuté avec le lancement des satellites du bloc IIR-M. Il module les porteuses L1 et L2. Il présente l'avantage par rapport au code P(Y) **d'être plus rapide à analyser et un cryptage amélioré.**
- **Le L5C-code** : il est constitué de **2 codes destinés à la sûreté de la vie**, qui sont émis par les satellites du bloc IIF. Ils sont modulés sur la porteuse **L5**. Ces 2 codes, nommés **L5I et L5Q**, sont composés de 10 230 bits à un taux de répétition de 10,23 Mbps. Ils sont de plus modulés avec un nouveau code de 10 bits pour L5I et 20 bits pour L5Q, créant ainsi un code « composite » de 10 ms et 20 ms respectivement. **Ces signaux sont plus performants que le C/A code** permettant une meilleure corrélation croisée et une meilleure résistance aux interférences.
- **Le L1C-code** : c'est **l'évolution du C/A code**. Il modulera L1 et devrait être compatible avec un des codes de Galileo.

Tableau IV 3. Les différents codes du système GPS utilisables fin 2010

Code	Porteuse	Nombre de bits	Durée	Répétition
C/A	L1	1 023	1 ms	1.023 Mbps
P	L1 + L2	2.3527 10 ¹⁴	1 semaine	10.23 Mbps
L2C	L2	767 250	1.5 s	1.023 Mbps
M	L1 + L2	?	?	5.115 Mbps
L5C-I	L5	10 230 × 10	10 ms	10.23 Mbps
L5C-Q	L5	20 460 × 20	20 ms	10.23 Mbps

1.4.3. Message de navigation

Le message de navigation contient des **informations relatives à la constellation GPS** et est nécessaire au récepteur pour pouvoir calculer sa correction. Il module toutes les porteuses du GPS. Il est codé sur **37 500 bits à 50 bps**¹² (12. Bits par seconde) : **12 min 30 s** sont donc nécessaires à la réception de la totalité du message.

Le message de navigation GPS suit la structure suivante :

- Un message est composé de 25 frames de 30 s contenant 1500 bits de données.
- Chaque frame est composé de 5 subframes de 6 s contenant 300 bits de données.
- Chaque subframe est composée de 10 words de 0,6 s, contenant chacune 30 bits de données.

Chaque subframe débute systématiquement avec 2 words nommés TLM (Telemetry word) et HOW (Handover Word). **Le TLM permet la synchronisation des subframes tandis que le HOW indique la date d'émission du message.**

Les subframes 1 à 3 contiennent les informations spécifiques au satellite qui a émis le message (erreur d'horloge, état du satellite, paramètres d'orbite). Ces mêmes informations sont répétées dans chaque frame. **Les subframes 4 et 5 contiennent les almanachs de l'ensemble de la constellation, un modèle de correction ionosphérique. L'ensemble de ces informations sont complètes au bout de 12 min 30 s.**

Avec la modernisation du GPS, des nouveaux messages de navigation sont émis : **CNAV** est un message de navigation civil, transmis sur L2 ; **MNAV** est un message de navigation réservé aux militaires. Un dernier message, **CNAV-2**, est émis sur L1 avec le nouveau code L1C. Ces messages contiennent des données plus précises que le message de navigation standard.

1.5. Référentiel spatio-temporel

1.5.1. Système de référence

Le système de référence associé au GPS est le **WGS-84** (World Geodetic System). Différentes réalisations de ce système se sont succédées pour améliorer son exactitude.

- La première réalisation a été obtenue à partir des observations réalisées sur 1500 stations à l'aide du système TRANSIT. Le repère obtenu présente alors **des écarts de l'ordre de 1 à 2 m** avec la réalisation contemporaine de l'ITRS (obtenue à partir d'observations SLR et VLBI).
- La version actuelle (**G1150** car mise en place à partir de la semaine 1150) à partir des stations du segment sol de GPS. La cohérence avec la réalisation contemporaine de l'ITRS (ITRF2002) est de **l'ordre de 1 cm** ; cependant, le repère de référence étant fixe, *l'effet induit par le déplacement des stations de référence depuis la réalisation ne permet pas de conserver cette cohérence.*

C'est donc dans ce système qu'est exprimé la position GPS en mode absolu.

1.5.2. Le temps GPS

L'échelle de temps GPS est une échelle de temps continue, basée sur l'analyse des données des horloges atomiques situées à **l'USNO** (US Naval Observatory). Elle est uniquement utilisée pour des besoins de synchronisation du système. Elle est reliée à l'échelle de temps international UTC par le temps universel coordonné de l'USNO avec **une précision de 1 µs**.

Le temps GPS coïncida avec le temps UTC le 6 janvier 1980 à 00 :00 :00,0. Contrairement à l'UTC, il n'est pas corrigé pour coïncider avec la rotation de la Terre et présente donc un biais constant avec le TAI (19 s) qui correspond à l'écart **TAI-UTC le 6 janvier 1980 à 00 :00 :00,0.**

À partir de sa date d'origine (6 janvier 1980 à 00 :00 :00), la date GPS est comptée en semaines et secondes dans la semaine, ou en jours et secondes dans le jour

- La semaine GPS 0 commence le dimanche 6 janvier 1980 à 00 :00 UTC.
- Le dimanche est le jour 0 de la semaine GPS, le samedi le jour 6.
- Une époque correspond alors au nombre de secondes écoulées depuis le début de la semaine.

Exemple : 30 décembre 2009 - 13 :45 :00.0

Semaine 1564, Jour 3 (mercredi) / Semaine 1564, 308 700 s

Signalons enfin que chaque 1024^e semaine, le numéro de la semaine GPS est remis à zéro dans le message de navigation, cette quantité y étant codée sur 10 bits. La première « remise à zéro » s'est déroulée le 22 août 1999 et la seconde le 7 avril 2019.

2. Le système Russe GLONASS

GLONASS « GLObalnaya NAvigatsionnaya Sputnikovaya Sistema » est la version Russe du système GNSS, c'est un système de radio navigation qui assure le positionnement et le temps aux utilisateurs, il est développé initialement pour l'armée soviétique et il est géré par le ministère de la défense Russe. Ce système peut être considéré comme la deuxième génération du système de localisation soviétique Tsikada qui a été lancés entre 1976.

2.1. Architecture du système GLONASS

2.1.1. Segment spatial

Le système GLONASS se compose de 24 satellites avec des altitudes d'environ 19100 Km au-dessus de la surface de la terre répartis en 3 orbites séparées par 120° avec une inclinaison de 64.8° par rapport à l'équateur et chaque satellite a une période de 11 :15 :44. Cette constellation assure qu'au moins cinq satellites sont visibles à chaque moment sur plus de 99% de la surface de la Terre. GLONASS comme GPS utilise deux codes, C/A code sur la bande L1 et P code sur les bandes L1 et L2, la différence entre GLONASS et GPS, c'est que le premier utilise la méthode FDMA (Frequency Division Multiple Access) et le deuxième utilise la méthode CDMA (Code Division Multiple Access) pour distinguer les satellites. Tous les satellites GLONASS transmettent les mêmes code C/A et P, mais chacun des satellites opère avec des fréquences différentes aux autres.

Les fréquences porteuses des signaux L1 et L2 peuvent être écrites comme indiqué ci-dessous :

$$f_1^n = 1602 + 0.5625.n \text{ MHz}$$

$$f_2^n = 1246 + 0.4375.n \text{ MHz}$$

Ou n est le numéro de canal de fréquence $1 < n < 24$.

Le message de navigation comprend des données qui ressemblent au message de navigation GPS qui contient des informations sur les orbites des satellites, leurs horloges...etc. *Inversement au GPS où les données éphémérides sont définies par rapport au système képlérien, les éphémérides diffusées par les satellites GLONASS sont définies par rapport au système ECEF, et ils sont mis à jour toutes les 30 minutes (Revnivykh et al., 2017).*

2.1.2. Segment de contrôle

Le segment de contrôle se compose d'un centre de contrôle principal situé dans le centre spatial Kranznamenksk à environ 70 km au sud-ouest de Moscou. Le centre est relié à 8 stations de suivis distribuées à travers la Russie. Ces stations sont responsables de la surveillance et le suivi de l'état des satellites dans les orbites, la détermination des éphémérides et des décalages d'horloge de chaque satellite par rapport au temps de GLONASS, et de transmettre ces informations au centre de contrôle du système par des liaisons radio une fois par heure.

2.1.3. Secteur utilisateur GLONASS

Le segment utilisateur du système GLONASS se compose de l'ensemble des récepteurs électroniques capables de recevoir et traiter les signaux transmis par les satellites GLONASS sur les différentes bandes de fréquences. Pour les services ouverts (application civile) l'utilisation de ces récepteurs n'est associée à aucune charge, sauf qu'ils ne sont pas autorisés à accéder à des signaux alloués pour les applications militaires.

2.2. Modernisation du système GLONASS

En 2003, les Russes ont commencé le lancement d'une nouvelle génération des satellites nommé GLONASS-M, où "M" signifie "Modernisé". Ces satellites utilisent des technologies plus modernes et contiennent un certain nombre de nouvelles fonctionnalités. En comparant avec les satellites précédents, GLONASS-M offre certains avantages, tels que l'augmentation de la durée de vie des satellites, l'amélioration de la performance de l'horloge des satellites, l'horloge sur cette version est plus stable. L'ajout des données de navigation complémentaires GLONASS-M, ces nouvelles données de navigation améliorent considérablement les performances globales du système.




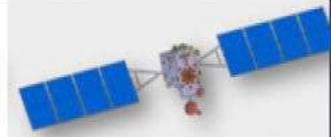
Cette génération est également dotée d'implémentation d'une liaison radio inter-satellites. Les satellites GLONASS-M transmettent à la fois les signaux L1 et L2 en plus d'un troisième signal L3, la fréquence centrale est de 1201 MHz et qui utilise la méthode FDMA pour distinguer les satellites. Une autre amélioration dans ces satellites consiste à ajouter des codes CDMA pour le signal L1.

$$f_3^n = 1201 + 0.4375 \cdot n \text{ MHz}$$

En Février 2011, le premier satellite d'une nouvelle génération pour le système GLONASS nommé **GLONASS-K1** a été lancé, cette nouvelle génération développée par **ISS Reshetnev** (Reshetnev Information Satellite Systems) contient des améliorations importantes par rapport à l'ancienne génération GLONASS-M qui augmente la durée de vie des satellites et qui améliore la précision du système. Les satellites GLONASS-K1 transmettent des signaux de navigation supplémentaires pour améliorer la précision du système. *Deux militaires et deux civils seront transmis sur les bandes L1 et L2, et des signaux civils supplémentaires seront transmis dans les bandes L1, L2 L3 et L5 utilisant la méthode CDMA.*

La future amélioration du système GLONASS consiste à développer des satellites nommés **GLONASS-K2**, l'évolution dans cette génération consiste à améliorer la durée de vie des satellites et la précision en plus de l'ajout des nouveaux signaux CDMA.

Tableau IV 4. Différentes générations des satellites GLONAS (Urlichich et al., 2011)

GLONASS			GLONASS-M			GLONASS-K1			GLONASS-K2		
											
1982			2003			2011			2018		
Durée de vie de 3 ans			Durée de vie de 7 ans			Durée de vie de 10 ans			Durée de vie de 10 ans		
Horloge erreur de $5 \cdot 10^{-13}$ s			Horloge erreur de $1 \cdot 10^{-13}$ s			Horloge erreur de 10 à $5 \cdot 10^{-14}$ s			Horloge erreur de 5 à $1 \cdot 10^{-13}$ s		
Signaux			Signaux			Signaux			Signaux		
L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3
L1OF	L2OF	-	L1OF	L2OF	-	L1OF	L2OF	L3OC	L1OF	L2OF	L3OC
L1SF	L2SF	-	L1SF	L2SF	-	L1SF	L2SF		L1SF	L2SF	

3. Le système Européen Galileo

Galileo c'est le système de navigation par satellite Européen, il est désormais pleinement opérationnel, offrant un service de localisation **extrêmement précis** pour les applications civiles et commerciaux. Ce système **est compatible avec les autres systèmes mondiaux** de navigation par satellite le GPS et GLONASS. Un utilisateur sera capable de mesurer sa position avec **le même récepteur**, cette *combinaison de plusieurs systèmes donne l'opportunité aux utilisateurs d'améliorer la précision des récepteurs GNSS* (Damiano, 2007).

La constellation de satellites Galileo, transmet plusieurs signaux de navigation, les signaux **E5a** et **E5b** dans la gamme de fréquences 1164-1215 MHz, le signal **E6** dans la gamme 1.260 à

1.300 MHz et le signal **E2-L1-E1** dans la gamme 1559-1592 MHz. **Tous les satellites Galileo utilisent la même fréquence pour chaque signal**, pour cette raison le système utilise la méthode d'accès de la division à codes multiples (**CDMA**) pour identifier chaque satellite, en plus Galileo utilise *deux types de modulation* la **QPSK** et la **BOC**.

Tableau IV 5. Les fréquences des signaux Galileo

Signal	Fréquence	La bande	Puissance du signal reçu	Modulation
E5a	1176.45 MHz	92.07 MHz	-155 dBw	AltBOC (15.10)
E5b	1207.14 MHz	92.07 MHz	-155 dBw	AltBOC (15.10)
E6	1278.75 MHz	40.92 MHz	-155 dBw	BPSK
E1	1575.42 MHz	40.92 MHz	-155 dBw	MBOC

3.1. Architecture du système Galileo

Les segments du système Galileo sont presque similaires aux GPS et GLONASS avec quelques modifications :

3.1.1. Segment spatial

Le segment spatial est développé pour avoir une constellation de **30 satellites MEO**, avec une **altitude de 23222 Km** régulièrement répartie sur **3 plans orbitaux** avec une inclinaison de 56° par rapport à l'équateur.

3.1.2. Segment contrôle

Le segment contrôle est responsable de la surveillance des satellites de navigation pour la détermination de l'orbite des satellites, la synchronisation de l'horloge et la diffusion des informations de navigation aux satellites. Le segment de contrôle est composé d'environ 12-15 stations de références, 5 stations de liaison aux satellites (Antenne) et deux centres de contrôle, ce segment comprendra aussi 16-20 stations de surveillance.

3.1.3. Segment utilisateur

Le segment utilisateur est représenté par les différents types des récepteurs électroniques qui peuvent recevoir et traiter les différents signaux envoyés par les satellites Galileo.

3.2. Les services Galileo

La constellation Galileo offre la capacité de diffuser à l'échelle mondiale un ensemble de **six signaux de navigation**, chacun est composé d'un ou deux codes utilisés pour des raisons commerciales, la sécurité de vie et des services publics. Les principaux services fournis par le système Galileo sont les suivants :

3.2.1. Service ouvert

OS (Open Service) ce service utilise les fréquences **E5a**, **E5b** et **E2-L1-E1** pour transmettre les données de navigation. Ces données de navigation sont disponibles à tous les utilisateurs avec un accès gratuit.

3.2.2. Service commercial

CS (Commercial Service), toutes les données dans ce service sont chiffrées et sont transmises sur les fréquences **E5b**, **E6** et **E2-L1-E1**. L'accès à ces données commerciales est fourni directement aux utilisateurs par des fournisseurs de services. Les signaux dans ce service sont conçus pour développer des applications très précises.

3.2.3. Services de sauvetage et de protection civile

SOL (Safety-of-life Services), ils incluent principalement l'intégrité du signal et la combinaison de ce service fournie par Galileo avec le GPS et un service d'augmentation et de corrections comme EGNOS dans le but d'augmenter la précision des récepteurs. La précision requise dans ce service est d'environ 4 mètres, cela pourrait être possible dans le cas où le modèle ionosphérique basé sur plusieurs mesures de fréquence et la modélisation des autres erreurs GNSS sont introduites.

3.2.4. Service public réglementé

PRS (Public Regulated Service), les signaux dans ce service sont transmis sur les fréquences **E6** et **L1**, ce service est fourni sur des fréquences **réservées** pour une grande continuité contrôlée par les gouvernements de l'UE, tels que la police, la protection civile, des applications de la loi, de la protection civile tels que certains services d'urgence, ainsi que d'autres activités gouvernementales.

4. Le système chinois Compass /Beidou

Compass est le système **chinois** de navigation par satellite. Le gouvernement chinois a décidé de construire leur propre système mondial de navigation par satellite en 1980 appelé BeiDou. Ce système est **le résultat de développement de plusieurs services de localisation régionaux**. Il **a été développé en trois étapes** :

- Étapes 01 : consiste à développer un système de démonstration, qui a été créé en 2000 ;
- Étapes 02 : le développement du système BeiDou régional pour répondre aux exigences de la Chine et ses environs, ce dernier a été mis en service en 2012 ;
- La dernière étape c'est le développement du système de localisation mondiale BeiDou qui a été achevée avec une constellation globale en 2020 et fournit des services de navigation et de positionnement à l'échelle mondiale.

4.1. Architecture du système Compass

BeiDou comme les autres systèmes de navigation par satellite se compose de trois parties : le segment spatial, le segment contrôle et le segment utilisateur.

4.1.1. Secteur spatial

La constellation du système Compass sera composé de **35** satellites dont **5** entre eux sont des satellites géostationnaire GEO et **trois** sont des satellites IGSO (Inclined geo synchronous orbit) et les autres sont des satellites MEO. Les cinq satellites GEO ont été mis en orbite, le dernier satellite GEO a été lancé en Décembre 2011. Les satellites GEO sont positionnés à 58.75 ° E, 80 ° E, 110,5 ° E, 140°E et 160 ° E respectivement.

Les satellites MEO sont dans des orbites inclinées par 55° par rapport à l'équateur et une altitude de 21528 Km et les satellites IGSO sont dans des orbites avec une inclinaison de 55° avec une altitude de 36000 Km. La position de chaque satellite a une longitude de 118°E et séparés entre eux par un angle de 120°, chaque satellite BeiDou transmet trois signaux avec trois fréquences différentes, un signal nommé **B1** avec une fréquence de 1561.098 MHz, **B2** à 1207.14 MHz et un troisième signal **B3** à 1268.52 MHz.

4.1.2. Secteur contrôle

Le segment contrôle du système BeiDou se compose d'une station de commande principale MCS (Master Control Station) responsable du contrôle de la constellation de satellites et de traitement des mesures reçues par les stations de surveillance MS (Monitor Station) pour générer le message de navigation et des corrections orbitales. Ces messages seront transférés aux satellites à l'aide des stations nommé US (Upload Station).

4.1.3. Secteur utilisateur BeiDou

Le segment utilisateur du système BeiDou se compose des terminaux électroniques qui sont capables de recevoir les signaux de navigation BeiDou et de déterminer les pseudo-distances entre eux et plusieurs satellites pour résoudre les équations de navigation afin d'obtenir leurs coordonnées.

4.2. Les services BeiDou

BeiDou assure aux utilisateurs deux types de services :

4.2.1. Service public

Le service public est un service similaire aux autres services publics fournis par les autres systèmes de localisation par satellites, il est gratuit et ouvert à tous les utilisateurs du monde entier, chacun de ces utilisateurs peut calculer la position utilisant les mêmes principes utilisés par les autres systèmes par la mesure de la distance entre eux et plusieurs satellites. Ce service est conçu pour fournir une précision de l'ordre de 10 mètres.

4.2.2. Service réservé

Ce service est utilisé à des applications réservées au gouvernement de la Chine, ce service conçu pour assurer une utilisation élevée fiable même dans des situations complexes.

D'autres services sont en état de développement, ces services sont prévus d'avoir une meilleure précision par la correction des erreurs à l'aide de 30 stations de correction basées sur les informations diffusées par les satellites GEO.

5. Interopérabilité entre les systèmes

Jusqu'à maintenant il existe quatre systèmes de localisation par satellites GNSS dans le monde. D'autres pays commencent à développer leurs propres systèmes de navigation par satellite, à l'image de l'Inde et le Japon.

Tous ces systèmes utilisent le même principe pour localiser un récepteur, chaque utilisateur doit calculer la distance qui le sépare avec plusieurs satellites et à l'aide de la position de chaque satellite il peut estimer sa position.

La différence entre les systèmes de navigation concerne **le nombre des satellites** utilisés pour couvrir toute la surface de la terre pour que le service fourni soit accessible à tout moment. Le système GPS utilise 24 satellites situés dans 6 plans séparés entre eux par 60°, par contre la constellation du système Galileo est composée de 30 satellites 27 opérationnels et 3 de réserve, situés dans trois plans séparés entre eux par 120°. BeiDou utilise 30 satellites et le système GLONASS se compose de 24 satellites dans trois plans orbitaux. Une autre différence entre les systèmes vient de la méthode utilisée par chacun pour **distinguer entre les satellites**. Les trois systèmes GPS, Galileo et Beidou utilisent la méthode CDMA donc chaque satellite sera défini par un code unique ou bien plusieurs codes si le satellite transmet plusieurs signaux pour plusieurs services. Le système GLONASS utilise la méthode FDMA pour la majorité de ses services donc chaque satellite transmet chaque signal avec une fréquence différente des autres signaux et autres satellites. Le tableau suivant donne une comparaison entre les systèmes (Ai et al., 2021).

Tableau IV 6. Comparaison entre les systèmes GNSS

Système	GPS	GLONASS	BeiDou	Galileo
Nombre de Satellite	24	24	27	30
Nombre des orbites	6	3	3	3
Inclinaison des orbites	55°	64.8°	55°	56°
Séparation entre les orbites	60°	120°	120°	120°
Altitude des satellites (km)	20200	19100	21528	23222
Méthode d'accès	CDMA	FDMA/CDMA	CDMA	CDMA
Fréquences utilisés (MHz)	L1 :1575.42 L2 :1227.60 L5 :1176.45	L1 :1602 L2 :1246 L3 :1201	B1 :1561.098 B2 :1207.14 B3 :1268.52	E5a :1176.45 E5b :1207.14 E6 :1278.75 E1 :1575.42

Les satellites GNSS transmettent en continu des signaux qui contiennent les données de navigation sur plusieurs fréquences dans la bande L. La distribution des bandes de fréquences pour le système radio de navigation par satellite RNSS (Radio Navigation Satellite System) est illustrée par la figure IV 4.

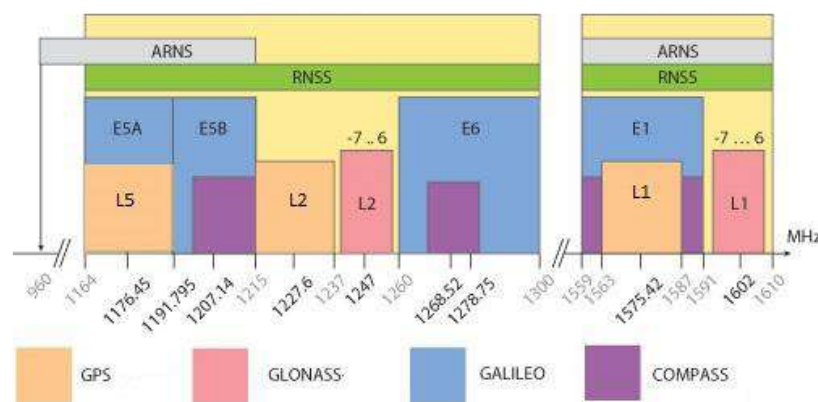


Figure IV 4. Distribution des canaux GNSS

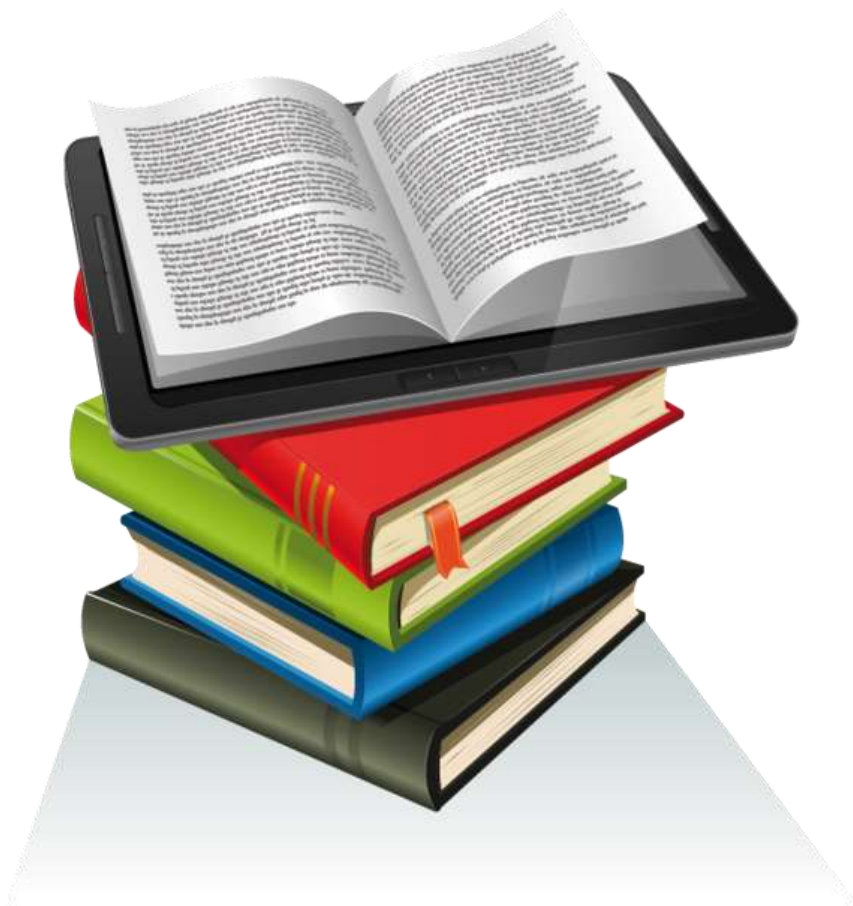
La bande réservée au service de radionavigation aéronautique **ARNS** est divisée en deux parties : La première correspond à la bande L supérieure entre 1559 et 1610 MHz, qui contient les signaux **L1** du GPS, **E1** pour Galileo et le **G1** du GLONASS ; La deuxième bande réservée au service ARNS c'est la bande entre 1151 et 1214 MHz, cette deuxième bande contient les signaux **E5a**, **E5b** pour Galileo et le **L5** pour le GPS. Ces bandes sont particulièrement réservées aux applications de sécurité-de-vie et aucun utilisateur n'est autorisé à interférer avec ces signaux. Les autres signaux GPS **L2**, GLONASS **G2** et Galileo **E6** qui se trouvent dans les bandes 1215,6 - 1350 MHz sont utilisés pour la radio navigation et sont accessibles par **tous les utilisateurs**.

6. Mise à jour des données pour refléter les avancées récentes des systèmes GNSS

Pour assurer que le polycopié reflète les avancées récentes des systèmes GNSS, il est indispensable de signaler les informations suivantes :

- *Systèmes d'augmentation basés sur les satellites (SBAS) :*
 - EGNOS (Europe) : Le service EGNOS continue d'améliorer la précision et la fiabilité des signaux GNSS en Europe ;
 - WAAS (États-Unis) : Le Wide Area Augmentation System (WAAS) fournit des corrections pour améliorer la précision du GPS en Amérique du Nord ;
 - MSAS (Japon) : Le Multi-functional Satellite Augmentation System (MSAS) offre des services d'augmentation pour le Japon et les régions environnantes ;
 - GAGAN (Inde) : Le GPS-Aided GEO Augmented Navigation (GAGAN) est opérationnel et fournit des services d'augmentation en Inde ;
 - SouthPAN (Australie et Nouvelle-Zélande) : Le Southern Positioning Augmentation Network (SouthPAN) est en cours de développement et a commencé à offrir des services initiaux en septembre 2022.
- *Nouvelles initiatives :*
 - HydroGNSS (Agence spatiale européenne) : L'ESA développe la mission HydroGNSS pour surveiller des variables hydrologiques telles que l'humidité du sol et la biomasse au-dessus du sol en utilisant la réflectométrie GNSS ;
 - Systèmes de navigation lunaire : La NASA, l'ESA et d'autres agences spatiales travaillent sur des systèmes de navigation similaires au GPS pour la Lune, visant à soutenir les futures missions lunaires et une économie lunaire émergente.

Références bibliographiques



Références bibliographiques

- Ai, Q., Maciuk, K., Lewinska, P., Borowski, L., 2021. Characteristics of onefold clocks of GPS, Galileo, BeiDou and GLONASS systems. *Sensors* 21, 2396.
- Ait-Lakbir, H., 2023. Analyse des sources d'erreurs systématiques dans le positionnement précis par GNSS : apport de la constellation Galileo (PhD Thesis). Toulouse 3.
- Akos, D.M., 1997. A software radio approach to global navigation satellite system receiver design. Ohio University.
- ARIAS, E.F., GUINOT, B., 2006. Avenir du temps universel coordonné (UTC). *Navigation* 54, 59–78.
- Brezinski, C., 2005. Géodésie, topographie et cartographie. *Bull. Sabix Société Amis Bibl. L'Histoire L'École Polytech.* 32–66.
- Capderou, M., 2002. *Satellites : orbites et missions*. Springer Science & Business Media.
- Capitaine, N., 1996. Le temps universel et la mesure de la rotation de la Terre. *Journ. 1996-Systèmes Réf. Spatio-Temporels Deux Siècles DÉvolution Système Monde* 109–115.
- Cina, A., Dabove, P., Manzano, A.M., Piras, M., others, 2015. Network real time kinematic (NRTK) positioning—description, architectures and performances. *Satell. Position.-Methods Models Appl.* 23–45.
- Damiano, J.-P., 2007. Galileo : Le système européen de navigation par satellite. *Rev. L'électricité L'électronique* 6, 63–77.
- Denègre, J., Salgé, F., 1996. *Les Systèmes d'Informations géographiques*, Paris, Puf, Coll. Que Sais-Je 127–128.
- Donnay, J.-P., 2012. Systèmes géodésiques et projections" Lambert belge". *Atlas Numér. Belg.-Doss. Cartogr.*
- Donnay, J.-P., 2005. Les Systèmes d'Information Géographique (SIG). Préliminaires à un usage dans l'enseignement. *Bull. Société Géographique Liège* 45, 45–52.
- Dounia, G., Salli, H., 2022. Détection de position d'impulsion à sant temporel pseudo aléatoire des signaux pseudolite pour les récepteurs GNSS participatifs (PhD Thesis). faculté des sciences et de la technologie univ bba.
- Guinot, B., 1986. Is the International Atomic Time TAI a coordinate time or a proper time ? *Celest. Mech.* 38, 155–161.
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., Wasle, E., 2008. More on GNSS. *GNSS—Global Navig. Satell. Syst. GPS GLONASS Galileo More* 397–430.

- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., Wasle, E., 2007. GNSS—global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more. Springer Science & Business Media.
- Jin, S., 2012. Global navigation satellite systems: signal, theory and applications. BoD—Books on Demand.
- Junior, P.S.D.O., 2017. Definition and implementation of a new service for precise GNSS positioning (PhD Thesis). Conservatoire national des arts et métiers-CNAM.
- Kouba, J., 2009. A guide to using International GNSS Service (IGS) products.
- Kovalevsky, J., 1972. Les lois de Kepler et la mécanique céleste moderne. *Astron.* Vol 86 P 304 86, 304.
- Kumar, A., Kumar, S., Lal, P., Saikia, P., Srivastava, P.K., Petropoulos, G.P., 2021. Introduction to GPS/GNSS technology, in: *GPS and GNSS Technology in Geosciences*. Elsevier, pp. 3–20.
- Lahaye, R., Ladet, S., 2014. Les principes du positionnement par satellite : GNSS. *Cah. Tech. L'INRA* 9–18.
- Lambeck, K., 1971. The relation of some geodetic datums to a global geocentric reference system. *Bull. Géod. 1946-1975* 99, 37–53.
- Langley, R.B., 1998. The UTM grid system. *GPS World* 9, 46–50.
- Langley, R.B., Teunissen, P.J., Montenbruck, O., 2017. Introduction to GNSS. *Springer Handb. Glob. Navig. Satell. Syst.* 3–23.
- Li, X., Götze, H.-J., 2001. Ellipsoid, geoid, gravity, geodesy, and geophysics. *Geophysics* 66, 1660–1668.
- Louchet, A., 2014. Étude 5. Projections cartographiques et navigation. *Collect. U 2*, 77–95.
- Otmane, A., Baba-Hamed, K., Safa, A., 2015. Prédétermination des valeurs de pluies et crues extrêmes dans le bassin versant de l'Oued Mekerra, Mémoire de magister, Université d'Oran 2, 187.
- Otmane, A., Gacemi, M.Ea., Belabid, N. et al. Which strategy should be adopted for the delimitation of the hydraulic public domain? The case of a watershed characterised by dam overflows and inter-basin water transfers (Boudouaou-Algeria). *Environ Earth Sci* 83, 592 (2024). <https://doi.org/10.1007/s12665-024-11886-7>
- O'Driscoll, C., 2018. What is navigation message authentication. *GNSS* 1.
- Papo, H.B., Perelmuter, A., 1988. Datum definition in the GPS era. *CISM J.* 42, 127–132.
- Petit, G., Luzum, B., 2013. The 2010 reference edition of the IERS conventions, in : *Reference Frames for Applications in Geosciences*. Springer, pp. 57–61.

- Polischuk, G., Kozlov, V., Ilitchov, V., Kozlov, A., Bartenev, V., Kossenko, V., Anphimov, N., Revnivkykh, S., Pisarev, S., Tyulyakov, A., others, 2002. The global navigation satellite system GLONASS: Development and usage in the 21st century, in: Proceedings of the 34th Annual Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting. pp. 151–160.
- Revnivykh, S., Bolkunov, A., Serdyukov, A., Montenbruck, O., 2017. Glonass. Springer Handb. Glob. Navig. Satell. Syst. 219–245.
- Richard, E., 2016. Étude et réalisation d'un nouveau système de référence spatio-temporel basé sur des liens inter-satellites dans une constellation GNSS (PhD Thesis). Université Pierre et Marie Curie-Paris VI.
- Rothacher, M., Schmid, R., 2010. ANTEX : The antenna exchange format, version 1.4. Format Specif. IGS Cent. Bur. Pasadena–2006.
- Urlichich, Y., Subbotin, V., Stupak, G., Dvorkin, V., Povalyaev, A., Karutin, S., 2011. GLONASS modernization, in: Proceedings of the 24th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2011). pp. 3125–3128.
- Wanninger, L., 2004. Introduction to network RTK. IAG Work. Group 4, 2003–2007.
- Warnant, R., 2006. L'effet de l'atmosphère terrestre sur les GNSS : une perturbation ou un signal géophysique ? Bull. Société Géographique Liège 47.
- Wu, Z., Lu, C., Tan, Y., Zheng, Y., Liu, Yang, Liu, Yanxiong, Jin, K., 2023. Real-time GNSS tropospheric delay estimation with a novel global random walk processing noise model (GRM). J. Geod. 97, 112.
- Xu, G., Xu, Y., 2007. GPS. Springer.
- Yahia, G., Sofiane, B., 2011. Etude générale du GPS (PhD Thesis). Université Mouloud Mammeri.
- Zumberge, J., Heflin, M., Jefferson, D., Watkins, M., Webb, F.H., 1997. Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. J. Geophys. Res. Solid Earth 102, 5005–5017.