
Systèmes de positionnement

Contenu

2.1.	Introduction	26
2.2.	Les systèmes satellitaires	27
2.3.	Les capteurs inertiels	36
2.4.	Conclusion.....	37

Ce chapitre a pour objectif la présentation de certains capteurs de navigation utilisés : satellites (GNSS – Global Navigation Satellite System), inertielle. Ces capteurs qui sont d'intérêt dans l'étude abordée nous permettent de calculer la position, l'orientation, la vitesse et l'horloge du récepteur.

2.1. Introduction

Dans ce chapitre, deux types de systèmes de positionnement et navigation sont présentés : par satellites (GNSS – Global Navigation Satellite System), et par navigation inertielle. Les capteurs de navigation nous permettent de calculer la position, l'orientation, la vitesse et le temps du récepteur. Les GNSS permettent de déterminer la position, la vitesse et le temps. A minima, quatre satellites sont nécessaires pour estimer ces informations : 3 pour la position et un pour le temps. Les données des capteurs inertiels permettent quant à eux d'estimer la position, la vitesse et l'orientation du récepteur. Contrairement aux systèmes de positionnement par GNSS, la navigation inertielle est entièrement autonome et n'utilise aucun signal externe pour déterminer une solution de navigation. Elle sera donc opérationnelle dans des environnements difficiles (forêt, bâtiment, ...) contrairement au positionnement par GNSS. Les données inertielles sont souvent couplées avec des données GNSS pour améliorer la précision de la position et de la vitesse du récepteur. Le Tableau 2.1 présente les avantages et inconvénients de l'utilisation de chacun des systèmes GNSS et INS [14].

Tableau 2.1 : avantages et inconvénients des systèmes GNSS et INS

	Avantages	Inconvénients
GNSS	- Erreurs restreintes - Auto-initialisation	- Taux d'échantillonnage faible - Sensible aux effets d'ombrage, de brouillage et de trajets multiples
INS	- Taux d'échantillonnage élevé - Solution de navigation complète (position, vitesse, accélération, attitude) - Entièrement autonomie	- Erreurs non restreintes (précision dépend de la précision des capteurs inertiels) - Nécessite une connaissance du champ de gravité - Nécessite des conditions initiales

Les avantages de l'intégration GNSS/INS sont perceptibles à différents niveaux autant pour l'acquisition de signaux GNSS de faible intensité que pour la poursuite de ces derniers en environnement difficile. Les avantages d'une solution hybride GNSS/INS s'explique principalement par la complémentarité qui existe entre ces systèmes et qui est illustrée dans la Figure 2.1. La Figure 2.1 présente les avantages synergiques de la combinaison les données GNSS et les données INS. Les erreurs de capteurs inertiels sont corrigées à l'aide des précisions de GNSS. Ensuite, cela permet les mesures inertielles plus précises. Et puis, la susceptibilité au bruit du récepteur est réduite. Après, les performances du système anti-brouillage sont améliorées. Enfin, la navigation est plus précise grâce à la combinaison des données GNSS et des données INS.

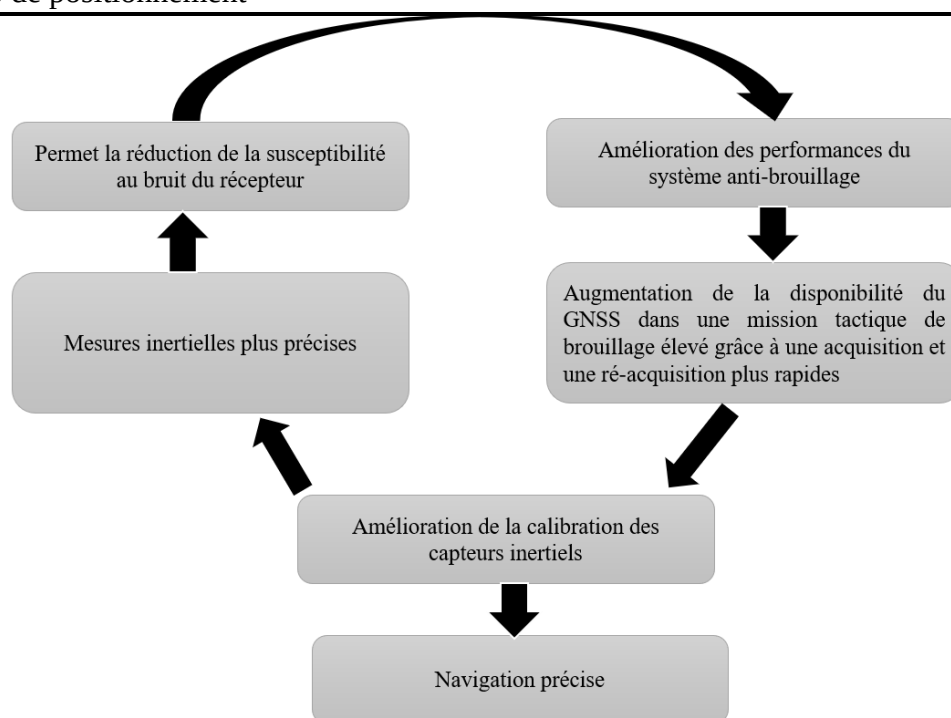


Figure 2.1 : Complémentarité entre les systèmes GNSS et INS [14]

2.2. Les systèmes satellitaires

2.2.1. Principe du positionnement par satellites

On distingue deux méthodes de positionnement par satellite. La première porte sur le positionnement absolu qui utilise une simple trilatération à partir des informations émises par les satellites visibles. Quant à la deuxième méthode, elle consiste en un positionnement relatif qui utilise une station de base dont la position est bien connue. Cette station transmet aux récepteurs les corrections des erreurs de trilatération pour améliorer la précision de position.

2.2.1.1. Positionnement absolu

Le positionnement absolu utilise le principe de la trilatération de signaux électromagnétiques synchronisés émis par les satellites. Les signaux émis par les satellites sont codés selon des codes pseudo aléatoires. Une réplique de la séquence du code du satellite est générée par le récepteur. Le temps de propagation correspond à la différence de temps entre deux instants : « code généré » et « code reçu » au niveau du récepteur. Ce temps multiplié par la vitesse de la lumière dans le vide donne une mesure de distance qui est appelée pseudo-distance.

Une seule distance n'est pas suffisante pour déterminer une position. Théoriquement on a besoin de trois satellites pour obtenir trois pseudo-distances à partir des coordonnées de chaque satellite. Chaque satellite est identifié à partir du code pseudo-aléatoire qu'il envoie. Le récepteur peut ainsi obtenir les coordonnées des trois satellites au moment de l'émission du signal. La position du récepteur est obtenue comme une intersection de trois sphères. Chaque sphère a pour centre un satellite et pour rayon la pseudo-distance qui sépare le satellite du récepteur.

En pratique, les horloges des satellites et l'horloge du récepteur ne sont pas synchronisées ce qui ne permet pas de déterminer une bonne position. Un quatrième satellite est alors utilisé pour déterminer l'erreur d'horloge du récepteur. Le principe de ce fonctionnement est illustré dans la Figure 2.2.

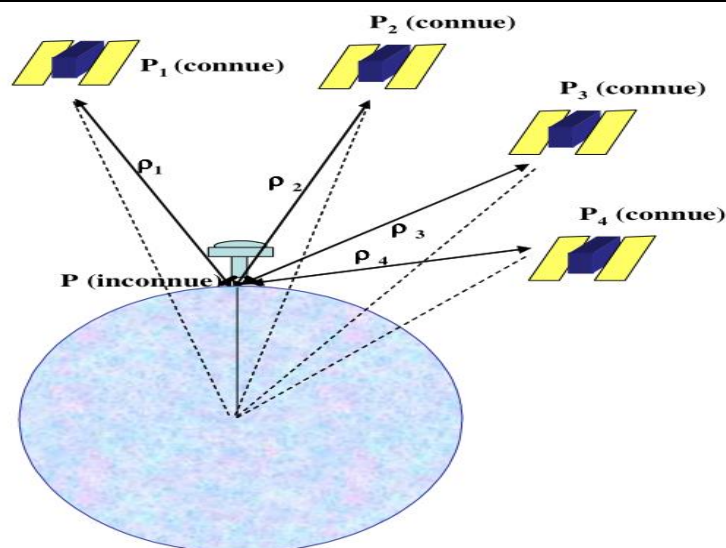


Figure 2.2 : Principe de positionnement par GNSS [15]

2.2.1.2. Positionnement relatif

Le positionnement relatif correspond au GNSS différentiel (DGNSS). Il fonctionne de la même manière que le système de positionnement GNSS absolu, mais il offre une solution plus précise. Pour cela, le récepteur doit être équipé d'un boîtier supplémentaire permettant de recevoir des corrections fournies par les stations de base. Le principe du positionnement relatif est assez simple : les mesures effectuées en une position bien connue sont comparées aux valeurs théoriques. La différence obtenue permet de fournir des corrections retransmises vers le récepteur qui les intègre dans le calcul de sa position, améliorant ainsi sa précision. Ces corrections sont intégrées soit directement dans le calcul de la position, ou dans la mesure des pseudo-distances. Les algorithmes de positionnement absolu et du positionnement relatif seront présentés en détail dans le chapitre 4.

Il existe actuellement plusieurs systèmes GNSS, les quatre systèmes les plus aboutis sont : GPS, Glonass, Galileo et Beidou. Chacune des technologies se décompose en trois segments : (a) segment spatial, (b) segment de contrôle, et (c) segment utilisateurs. Aujourd'hui, deux systèmes sont pleinement opérationnels et couvrent l'ensemble de la surface terrestre : GPS et GLONASS. Les deux autres systèmes de positionnement par satellites : Galileo et Beidou sont en cours de déploiement.

2.2.2. Le GPS

Le système GPS a été développé par le DOD (Department of Defense) des Etats Unis à partir de 1978 et fut complètement opérationnel en 1995. Pour la navigation, il utilise trois fréquences porteuses : $L1=1575,42$ MHz, $L2=1227,60$ MHz et $L5=1176,45$ MHz.

2.2.2.1. Composantes principales du système GPS

Le GPS comprend trois segments principaux, ils sont présentés ci-dessous.

a) Segment spatial

Le segment spatial se compose de 24 satellites, répartis sur 6 orbites inclinées de 55° sur le plan équatorial et situées à une altitude de 20,184 km avec une période de 11h58 min 2s. Ces satellites sont positionnés de telle sorte à avoir au moins quatre satellites visibles du sol partout dans le monde. Plusieurs classes ou types de satellites GPS ont été utilisés : Bloc I (ne sont plus

en service), Bloc II (ne sont plus en service), Bloc IIA (ne sont plus en service), Bloc IIR (10 satellites), Bloc IIR-M (7 satellites), Bloc IIF (12 satellites) et Bloc III (2 satellites) en avril 2020.

b) Segment de contrôle

Le segment de contrôle se compose de (source : gps.gov) :

- Une station de contrôle principale (MCS-Master control station),
- Une station de contrôle alternative,
- Onze antennes de commande et de contrôle,
- Seize sites de surveillance.

Les stations de surveillance suivent passivement tous les satellites en vue, accumulant des données de télémétrie. Ces informations sont traitées au MCS pour déterminer les orbites des satellites et mettre à jour le message de navigation de chaque satellite. Les informations mises à jour sont transmises à chaque satellite via les antennes au sol.

c) Segment utilisateur

Le segment utilisateur regroupe l'ensemble de tous les utilisateurs civils et militaires du système GPS. Les utilisations principales sont le positionnement absolu ou relatif par le code et/ou par la phase et la datation précise d'événement.

Deux types de services, basés sur des mesures de code, sont offerts aux utilisateurs :

- Le SPS (Standard Positioning Service) : c'est le service de positionnement qui est accessible à tout utilisateur disposant d'un récepteur GPS. C'est un service gratuit et anonyme,
- Le PPS (Precise Positioning Service) : c'est le service de positionnement précis du GPS ; il nécessite d'obtenir des clés de décodage auprès du DOD américain. Il est réservé aux militaires américains et à leurs alliés.

2.2.2.2. Structure du signal GPS

Les signaux du système GPS sont codés selon CDMA (Code Division Multiple Access). Un signal GPS est constitué d'une porteuse, une séquence unique de code PRN (Pseudo-Random Noise) et un message contenant les données de navigation appelé message de navigation.

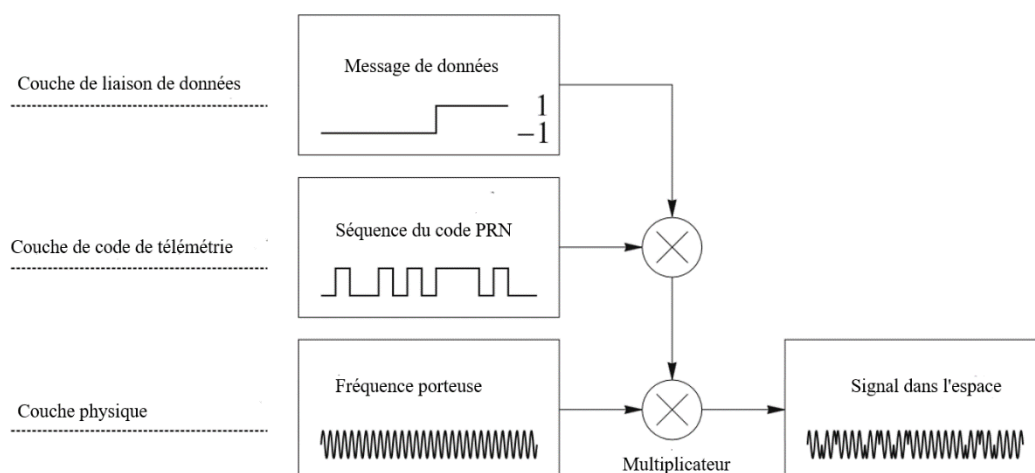


Figure 2.3 : Composition du signal de satellite de navigation [16]

Les différents satellites transmettent tous sur la même fréquence sans interférences entre les différents canaux. Ceci est possible avec l'utilisation des codes PRN qui sont uniques et orthogonaux. Ces codes sont utilisés pour calculer la distance entre le satellite et le récepteur.

Les satellites GPS émettent plusieurs signaux codés, à destination civile comme le code C/A (Coarse/Acquisition), L2C, L5C ou militaire comme le code P(Y), M-code, les caractéristiques des signaux sont données dans le Tableau 2.2.

Tableau 2.2 : Signaux du système GPS [17]

Liaison	Fréquence	PRN Code	Modulation
L1	1575,42 MHz	C/A P-code M-code L1C-I L1C-Q	BPSK(1) BPSK (10) BOCs (10,5) BOCs (1 ,1) TMBOC (6,1,4/33)
L2	1227,6 MHz	P-code L2C M-code	BPSK (10) BPSK (1) BOCs (10,5)
L5	1176,45 MHz	L5-I L5-Q	BPSK (10) BPSK (10)

2.2.2.3. *Référentiels spatio-temporels*

Le système GPS fournit une position en latitude, longitude et hauteur. Afin de positionner correctement un point sur la surface de la terre, il est nécessaire d'avoir un système de référence. De même, la base de temps liée au système GPS doit être définie explicitement :

- Système de référence associé au GPS : il est désigné par le WGS-84 (World Geodetic System). Différentes réalisations de ce système se sont succédées pour améliorer son exactitude. C'est donc dans ce système que la position GPS en mode absolu est exprimée.
- 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).

2.2.3. *GLONASS*

GLONASS est l'équivalent Russe du GPS. Ce système a été développé à partir de 1982 par les militaires Russes et il est opérationnel depuis 1987.

2.2.3.1. *Composantes principales du système GLONASS*

Le GLONASS comprend également trois segments principaux, ils sont présentés ci-dessous.

a) Segment spatial

Le segment spatial est composé de 24 satellites, répartis sur trois orbites de 64,8° situés à l'altitude de 19 100 km parcourus en 11h15m44s. Cette constellation permet d'assurer la visibilité d'au moins 5 satellites sur 99% de la surface de la terre. Différentes générations de satellites se sont succédées depuis 1982, avec les satellites Ouragan (qui ne sont plus en service), puis Ouragan-M (23 satellites), Ouragan-K1 (1 satellite) et K2 (sera lancé en 2021).

b) Segment de contrôle

Le segment de contrôle est constitué par les éléments suivants (source : gssc/esa/Glonass architecture) :

- Un centre de contrôle du système,
 - 5 centres de télémétrie, de suivi et de commande,
 - 2 stations de télémétrie laser,
 - 10 stations de surveillance et de mesure,
- c) Segment d'utilisateur.

Les utilisations principales sont le positionnement absolu ou relatif par le code et/ou par la phase et la datation précise d'événements. Deux types de services, présentés ci-dessous, sont offerts aux utilisateurs GLONASS.

- Le SPS (Standard Positioning Service) : ce service de positionnement est accessible à tout utilisateur disposant d'un récepteur GLONASS.
- Le PPS (Precise Positioning Service) : c'est le service de positionnement précis de GLONASS ; il nécessite d'obtenir des clés de décodage auprès du ministère Russe de la défense.

2.2.3.2. Structure du signal GLONASS

A l'origine, la structure des signaux GLONASS était basée sur une modulation FDMA (Frequency Division Multiple Access). L'évolution du système utilise maintenant la modulation CDMA (Code Division Multiple Access).

a) FDMA

La structure des signaux de GLONASS (code et phase) est assez proche de celle des signaux GPS. La différence principale entre GPS et GLONASS est que ce dernier utilise la technologie d'accès multiple par répartition en fréquence (FDMA) sur L1 et L2 pour discriminer les signaux de différents satellites, alors que le GPS utilise la technologie CDMA pour distinguer les satellites. Tous les satellites GLONASS transmettent les mêmes codes C/A et P, mais chaque satellite a des porteuses légèrement différentes.

- Les porteuses

Le GLONASS utilise deux fréquences dans la bande L : L1 et L2. Les numéros de canaux pour le fonctionnement du signal de GLONASS sont :

$$\begin{aligned} f_{K1} &= f_{01} + K\Delta f_1 \\ f_{K2} &= f_{02} + K\Delta f_2 \end{aligned} \quad (2.1)$$

où

K= numéros de canaux, $(-7 < K < 6)$

$f_{01}=1602$ MHz ; $\Delta f_1=562,5$ kHz

$f_{02}=1246$ MHz ; $\Delta f_1=437,5$ kHz

- Code et modulation

Les codes et modulations utilisés pour les signaux GLONASS sont présentés dans le tableau 2.3.

Tableau 2.3 : Signaux de télémétrie GLONASS en FDMA [17]

Liaison	PRN Code	Modulation
L1	C/A	BPSK(0.511)
	P-code	BPSK (5.11)
L2	C/A	BPSK (0.511)
	P-code	BPSK (5.11)

b) CDMA

Dans ses dernières évolutions, le système GLONASS commence à utiliser la technologie CDMA. Les informations officielles indiquent que le système GLONASS utilise trois signaux CDMA ouverts (L1OC, L2OC et L3OC) et deux restreints (L1SC et L2SC) (Tableau 2.4).

Tableau 2.4 : Signaux du GLONASS en CDMA [17]

Liaison	Fréquence	PRN Code	Canal	Modulation
L1	1600,995 MHz	L1OC	Données Pilote	BPSK(1) BOC(1,1)
		L1SC	Données Pilote	BOC(5, 2.5) BOC(5, 2.5)
L2	1248,06 MHz	L2OC	Données Pilote	BPSK(1) BOC(1,1)
		L2SC	Données Pilote	BOC(5, 2.5) BOC(5, 2.5)
L3	1202,025 MHz	L3OC	Données Pilote	BPSK(10) BPSK(10)

2.2.3.3. Référentiels spatio-temporels

Tout comme le système GPS, le système GLONASS a besoin de référentiels spatio-temporels pour fournir un positionnement précis.

- Système de référence de GLONASS : il est nommé PZ-90 (Parametry Zemli -1990) ou PE-90 (Parameters of the Earth -1990). Depuis le 17 septembre 2007, le référentiel PZ-90 a été mis à jour dans la version PZ.02 avec une différence d'environ 400 mm par rapport au référentiel WGS-84 (de système GPS). Depuis le 31 décembre 2013, la version PZ-90.11 est diffusée, et elle est alignée sur le système international de référence terrestre (ITRS) à l'époque 2011.0 au niveau centimétrique.
- Le temps GLONASS (GLONASST) : est lié à l'UTC mais présente un décalage constant de trois heures (la différence entre l'heure de Moscou et l'heure de Greenwich). En dehors du décalage constant, la différence entre le temps GLONASS et le temps UTC doit être inférieure à 1ms en raison du maintien des échelles de temps par des horloges atomiques. Cette différence est présentée dans le message de navigation (paramètre τ_c). Alors, le temps GLONASS peut être calculé à partir du temps UTC, il est donné par l'équation (2.2).

$$GLONASST = UTC + 3^h - \tau_c \quad (2.2)$$

2.2.4. Galileo

Galileo est le système européen de navigation par satellite, lancé par l'UE (Union Européenne) et l'ESA (European Space Agency) et dont les tests ont été débutés en fin 2005. La définition du système Galileo a été réalisée en 1999 et il fonctionnera complètement en 2020 ou 2021. La

principale motivation du développement de Galileo est de pouvoir se passer de GPS dont l'utilisation est dépendante du bon vouloir de l'armée américaine. Une différence majeure de Galileo avec le GPS et GLONASS est située au niveau de son placement sous le contrôle d'autorités civiles et non militaires.

2.2.4.1. Composantes principales du système

a) Segment spatial

Le segment spatial sera constitué à terme de 30 satellites dont 6 de rechange, répartis sur trois plans orbitaux inclinés de 56° et situés à l'altitude de 23 222 km parcourue en 14h.

b) Segment du sol

Le segment sol de mission est chargé de créer le message de navigation diffusé par les satellites, de détecter les éventuelles anomalies et d'en prévenir les utilisateurs, ainsi que de mesurer les performances du système. Il est constitué des éléments donnés ci-dessous (source : gsc-eurooa.eu/galileo).

- Deux centres de contrôle localisés en Europe (Oberpfaffenhofen et Fucin) pour réaliser les fonctions de calcul d'orbitographie, d'intégrité, de création du message de navigation et du temps Galileo, de la surveillance du système et de mesure de performance des services,
- Six stations de TTC (Telemetry, Tracking, Control), chargées de maintenir les liaisons de télécommandes et télémesures avec les satellites,
- Stations de liaison montante de données de mission,
- Plusieurs stations de capteurs de référence réparties dans le monde,
- Un réseau de diffusion de données entre tous les lieux répartis géographiquement,
- Un centre de services, situé à Madrid, pour aider les utilisateurs de Galileo.

c) Segment utilisateur

Il est possible de distinguer 5 niveaux de services prévus :

- Le service libre, OS (Open Service) : en libre accès pour tout possesseur d'un récepteur compatible Galileo, il fournira des données de positionnement, de navigation et de datation,
- Le service commercial, CS (Commercial Services) : en échange d'une redevance, il offrira de nombreux services à valeur ajoutée (garantie du service, intégrité et continuité des signaux, données de navigation métrique),
- Le service de sûreté de la vie, SOL (Safe of life) : il délivrera un service de sécurité et intègre pour applications critiques tels que le transport,
- Le service public réglementé, PRS (Public Regulated Service) ; il s'adressera en priorité aux utilisateurs d'applications gouvernementales de sécurité,
- Le service de recherche et secours, SAR (Search And Rescue) : pour la recherche et le sauvetage. Il permettra de localiser l'ensemble du parc des balises Cospas-Sarsat utilisées pour les signaux de détresse.

2.2.4.2. Structure du signal

Dix signaux de navigation ont été définis dans les cinq bandes de fréquence E1, E6, E5, E5a et E5b.

Tableau 2.5 : Bandes de fréquences Galileo [16]

Liaison	Fréquence [MHz]
E1	1 575,420
E6	1 278,750
E5	1 191,795
E5a	1 176,450
E5b	1 207,140

Plusieurs codes et messages de navigation différents ont dû être spécifiés pour répondre aux diverses exigences d'application des services Galileo. Trois types de codes sont distingués : le code à accès ouvert, le code crypté avec cryptage commercial et le code crypté avec cryptage gouvernement. Tous les satellites utilisent les mêmes fréquences porteuses pour la transmission du signal. Ici, il utilise la technologie CDMA.

Les séquences de codes sont soit générées à l'aide d'un registre à décalage de rétroaction linéaire, soit optimisées, les codes construits étant stockés dans la mémoire satellite.

Tableau 2.6 : Codes de télémétrie Galileo

Liaison	PRN code	Canal	Modulation
E1	E1A	Données	BOCc(15,2.5)
	E1B	Données	CBOC (6,1,1/11)
	E1C	Pilote	CBOC(6,1,1/11)
E6	E6A	Données	BOCc(10,5)
	E6B	Données	BPSK (5)
	E6C	Pilote	BPSK (5)
E5	E5a-I	Données	AltBOC(15,10)
	E5a-Q	Pilote	AltBOC(15,10)
	E5b-I	Données	AltBOC(15,10)
	E5b-Q	Pilote	AltBOC(15,10)

2.2.4.3. *Référentiels spatio-temporels*

Les référentiels spatio-temporels utilisés par Galileo sont les suivants :

- Système de référence associé à GALILEO : il est nommé GTRF (Galileo Terrestrial Reference Frame). Il sera défini à partir des réalisations de l'ITRS en assurant des écarts inférieurs à 3 cm sur l'ensemble du globe. L'ellipsoïde associé sera le GRS80,
- Le temps Galileo (GST) : une échelle de temps continue maintenue par le segment central de Galileo et synchronisées avec le TAI avec décalage nominal inférieur à 50 ns. L'époque de départ du GST et le dimanche 22 août 1999 à 0h UTC.

2.2.5. *BEIDOU*

Beidou, également nommé COMPASS est un système de navigation et de positionnement développé par la chine depuis le milieu des années 1980. Deux types de services seront disponibles : l'un civil, l'autre militaire. Il vient d'être complètement opérationnel en juin 2020 et il offre une précision pouvant aller jusqu'à 10 cm en Asie-Pacifique, pour sa version militaire.

2.2.5.1. Composantes principales du système Beidou

a) Segment spatial

En Mars 2020, le segment spatial se compose de 43 satellites possédant différents types d'orbite : 6 satellites en orbite géostationnaire, 10 en orbite géosynchrone inclinée (55°) et 27 en orbite moyenne (55°) sur 3 plans orbitaux.

b) Segment de contrôle

Le segment de contrôle est composé des éléments donnés ci-dessous (source : gssc/esa/Beidou ground segment).

- Une station de contrôle principale : responsable du contrôle de la constellation de satellites et du traitement des mesures reçues par les stations de contrôle pour générer le message de navigation,
- Stations de téléchargement : sa fonction est de télécharger les corrections d'orbite et le message de navigation vers les satellites Beidou,
- Stations de contrôle collectent les données Beidou pour tous les satellites à partir de leur position.

Actuellement, le segment terrestre comprend une station de contrôle principale, deux stations de téléchargement et 30 stations de contrôle.

En outre, le système prend en charge un service de communication de messages courts qui peuvent être échangés entre la station et les utilisateurs.

c) Segment utilisateur

Tout comme Galileo, plusieurs services devraient être disponibles permettant différents niveaux de précision. La précision attendue sur un positionnement standard est comparable à celle donnée par les autres systèmes (environ 10m).

2.2.5.2. Structure du signal Beidou

La première et deuxième phase du système Beidou sont respectivement BDS-1 et BDS-2. BDS-1 et BDS-2 n'étaient disponibles qu'en Asie. Tandis que la troisième phase du système Beidou (BDS-3), elle couvre la Terre entière. BDS-3 introduit de nouvelles fréquences de signal B1C/B1I/B1A, B2a/B2b, B3I/B3Q/B3A et la fréquence de test Bs. Le Tableau 2.7 représente les caractéristiques des signaux Beidou-2 et Beidou-3.

Tableau 2.7 : Caractéristiques des signaux Beidou-2/Compass et Beidou-3

Liaison	Fréquence (MHz)	Modulation
B1I	1561,098	BPSK(2)
B1Q	1561,098	BPSK(2)
B1C	1575,42	MBOC(6,1,1/11)
B1A	1575,42	BOC(14,2)
B2I	1207,14	BPSK(2)
B2Q	1207,14	BPSK(10)
B2a	1176,45	AltBOC(15,10)
B2b	1207,14	AltBOC(15,10)
B3I	1268,52	BPSK(10)
B3Q	1268,52	BPSK(10)
B3A	1268,52	BOC(15,2.5)

2.2.5.3. *Référentiels spatio-temporels*

Les Référentiels spatio-temporels du système Beidou sont :

- Système de référence de Beidou : il est désigné par China Geodetic Coordinate System 2000 (CGC2000), cohérent avec l'ITRF97 au niveau centimétrique,
- Le temps Beidou : Le BDT (Beidou Time System) est basé sur le TAI, réalisé par les stations de contrôle du système. Le temps est compté en semaines et secondes, et dans la semaine à partir du dimanche 1er janvier 2006 à 00h00min00s UTC.

2.3. Les capteurs inertiels

2.3.1. *Principe des capteurs inertiels*

La navigation inertielle est une technique de navigation basée sur des mesures des accéléromètres et des gyroscopes. Ces données sont utilisées pour estimer la position et l'orientation du récepteur relativement à un point de départ, avec une orientation et à une vitesse connue.

Les accéléromètres et les gyroscopes sont intégrés dans un appareil appelé centrale inertielle (CI) ou IMU (Inertial Measurement Unit), le principe est illustré dans la Figure 2.4 .

- Trois accéléromètres mesurant les trois composantes du vecteur force spécifique. La force spécifique est la somme des forces extérieures autres que gravitationnelles divisée par la masse.
- Trois gyromètres mesurant les trois composantes du vecteur vitesse angulaire (vitesses de variation des angles de roulis, de tangage et de lacet).

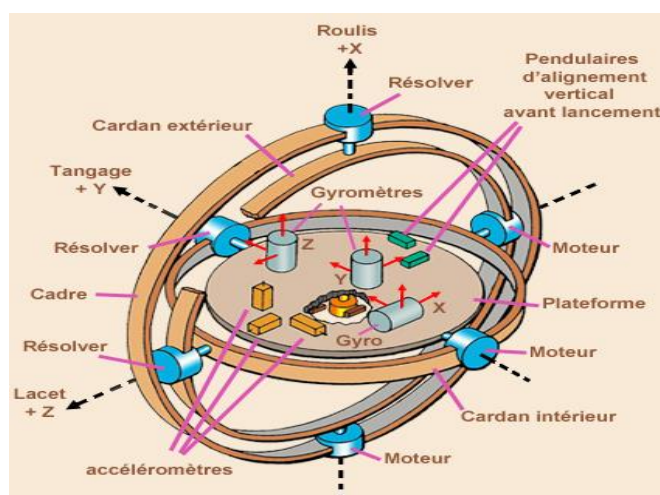


Figure 2.4 : Plate-forme inertielle [NASA/Wikipedia]

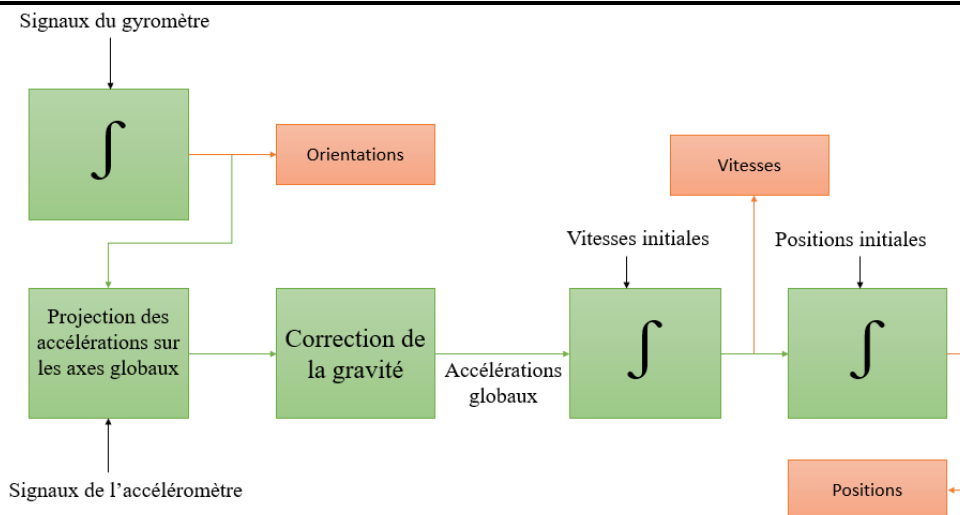


Figure 2.5 : Principe d'une centrale inertielle [18]

La Figure 2.5 présente l'exploitation des données issues d'une centrale inertielle. Le calculateur de la centrale inertielle réalise l'intégration en temps réel, uniquement à partir des mesures de ces six paramètres (trois de gyromètres, trois d'accéléromètres). Il permet d'obtenir trois angles d'attitude, trois composantes de vitesse et trois composantes de position.

Des centrales inertielles sont installées à bord de véhicules terrestres, de navires, de sous-marins, d'avions, d'hélicoptères, de missiles et de véhicules spatiaux. Elles sont même parfois transportées par des piétons pour des applications de localisation de précision en génie civil quand les systèmes GNSS sont indisponibles (forêt, dans les tunnels, ...).

2.3.2. Erreurs des systèmes inertiels

En pratique, les informations obtenues à partir d'une centrale inertielle s'écarte des positions et vitesses réelles à cause des erreurs de mesure qui impactent les mesures des rotations et des accélérations (biais, bruits, facteurs d'échelle, non-linéaires...). On observe alors des dérives au cours du temps sur les estimations des attitudes, de la vitesse et de la position. Le plus gros contributeur à l'erreur d'une centrale à inertie est le gyromètre. Ceci est dû au fait qu'il est intégré une fois de plus que les accéléromètres. Le biais de mesure de la vitesse angulaire engendre donc de plus grandes erreurs que celui d'accélération.

Pour atteindre une meilleure précision, il faut mettre en œuvre des gyromètres présentant des erreurs n'excédant pas quelques centièmes de degrés par heure ($^{\circ}/h$) et des accéléromètres de quelques dizaines de millionième de la gravité terrestre d'erreur (μg). Ces capteurs inertiels doivent de plus être acquis à des cadences de plusieurs centaines de Hertz pour tenir compte des mouvements du porteur.

2.4. Conclusion

Dans ce chapitre, les capteurs satellites et inertiels sont présentés. Les systèmes satellites ayant une couverture globale sont : GPS (Etats-Unis), GLONASS (Russie), Galileo (EU) et Beidou (Chine). Dans le Tableau 2.8 les principales caractéristiques de ces systèmes sont rappelées. Quant aux capteurs inertiels, ils permettent d'estimer la position et l'orientation d'un objet relativement à un point de référence, à une orientation et à une vitesse initiale connue. Les données INS et celles issues des GNSS sont souvent combinées pour améliorer les précisions au niveau de la position et de la vitesse du récepteur ; et notamment dans le cas où les signaux GNSS sont indisponibles. Le chapitre 3 suivant portera, en particulier, sur le traitement de

données GNSS, la détermination des positions des satellites et le calcul des erreurs GNSS. Les données INS seront présentées et utilisées dans le chapitre 6 où les algorithmes permettant de combiner des données GNSS et INS seront présentés.

Tableau 2.8 : Comparaison des caractéristiques des satellites

Paramètre	GPS	GLONASS	Galileo	Beidou
1 ^{er} lancement	1978	1982	2005	2007
FOC	1995	2010	2020	2020
Services	Militaire	Militaire	Commercial	Public
	Civil	Civil	Ouvert	Réservé
N° de satellites	32	24	30	27
Plan orbital	6	3	3	3
Inclination	55°	64.8°	56°	55°
Altitude (km)	20184	19100	23222	27878
Période	11h58m	11h15m	14h05m	12h50m
Système de référence	WGS-84	PZ-90	GTRF	CGCS2000
Système de temps	GPST	UTC	GST	China UTC
Codage	CDMA	FDMA et CDMA	CDMA	CDMA
Fréquences (MHz)	L1 : 1575,42	G1 : 1602	E1 : 1575,42	B1I : 1561,098
	L2 : 1227,60	G2 : 1246	E5 : 1919,795	B1C : 1575,42
	L5 : 1176,45	G3 : 1202,025	E5a : 1176,45	B2a : 1176,45
			E5b : 1027,14	B2b : 1207,14
			E6 : 1278,75	B3I : 1268,52

Chapitre 3

Traitement des données GNSS

Contenu

3.1.	Présentation des données GNSS.....	40
3.1.1.	Format RTCM	40
3.1.2.	Format RINEX	42
3.1.3.	Format NMEA.....	42
3.2.	Traitements de données RINEX	44
3.2.1.	Fichier d'observations GNSS.....	45
3.2.3.	Fichier des messages de navigation GLONASS	50
3.2.4.	Fichier des messages de navigation Galileo	52
3.3.	Détermination des positions et les vitesses des satellites.....	55
3.3.1.	Calcul des positions et des vitesses des satellites GPS et Galileo	55
3.4.	Modélisation des erreurs GNSS	60
3.4.1.	Correction des erreurs d'horloges satellites	60
3.4.2.	Corrections des erreurs à la propagation.....	62
3.4.3.	Modèle des multi-trajets	67
3.5.	Résultats de simulation des erreurs sources	68
3.6.	Conclusion.....	71

Ce chapitre présente dans un premier temps les différents formats de données GNSS : formats RTCM, RINEX et NMEA. Ensuite, il présentera le contenu des fichiers de données RINEX qui servira au calcul de la position du récepteur. Après la présentation des données RINEX, nous présenterons la détermination de la position et de la vitesse des satellites. Enfin, nous présenterons les modélisations des erreurs GNSS.

3.1. Présentation des données GNSS

Différents formats de données ont été spécifiés pour l'échange de données de navigation par satellite. Trois formats ont été retenus au niveau international : RTCM, RINEX, NMEA. Le premier format RTCM est défini par la commission technique radio pour les services maritimes (RTCM-Radio Technical commission for Maritime Services). Il est utilisé pour la transmission en temps réel des mesures et des corrections différentielles. Le deuxième format RINEX est utilisé pour l'échange de données brutes (raw data), en particulier pour les applications de post-traitement, tester les nouveaux algorithmes (RINEX-Receiver-Independent Exchange). Le troisième format NMEA est défini par l'Association nationale d'électronique marine (NMEA-National Marine Electronics Association). Il est particulièrement utilisé pour la transmission des solutions de position.

3.1.1. Format RTCM

La transmission des données de correction entre un récepteur référent et un récepteur inconnu a été normalisée en 1985 selon les propositions de la commission technique radio des services maritimes des Etats-Unis [16]. Le format RTCM a été introduit à l'origine pour les opérations différentielles dans les applications maritimes. Cependant, il est désormais utilisé dans tous les domaines d'application pour la transmission de toutes sortes de données GNSS. RTCM maintient les normes RTCM 10402.3 (version 2.3) et RTCM 10403.3 (version 3.3) en tant que normes "actuelles".

La version 2.3 définit 64 types de messages différents comme indiqué dans le Tableau 3.1. Les messages sont constitués d'une séquence de mots de 30 bits chacun. Les six derniers bits de chaque mot sont des bits de parité. Chaque message commence par un en-tête de deux ou trois mots. Le premier mot contient un préambule fixe, l'identificateur du type de message et l'identificateur de la station de référence. Le deuxième mot contient l'étiquette temporelle de la trame, le numéro de séquence, la longueur du message et un indicateur de santé de la station de référence. Dans certains messages, un troisième mot est ajouté à l'en-tête. Le message total a une longueur maximale de 33 mots.

Tableau 3.1 : Messages de la version 2.3 (gssc.esa/DGNSS_Standards)

Types de message	Nom de message	Type de message	Nom de message
1	Correction GPS différentielle	13	Paramètres de l'émetteur au sol
2	Correction GPS différentielle Delta	14	Message de l'auxiliaire d'enquête
3	Paramètres de la station de référence	15	Message sur l'ionosphère (troposphère)
4	Arpentage (surveying)	16	Message spécial
5	Constellation santé	17	Almanach des éphémérides
6	Null frame	18	Mesures non corrigées de la phase du transporteur

7	Almanachs des balises	19	Mesures non corrigées de la pseudo-distance
8	Pseudolite Almanachs	20	Corrections de la phase du support RTK
9	Corrections différentielles partielles des ensembles de satellites	21	RTK corrections de pseudo-distance
10	Corrections différentielles du code P	22-58	Non défini
11	C/A-code L1, L2 corrections delta	59	Message propriétaire
12	Pseudolite (Pseudo-Satellite) paramètres de la station	60-63	GeMultipurpose Usa

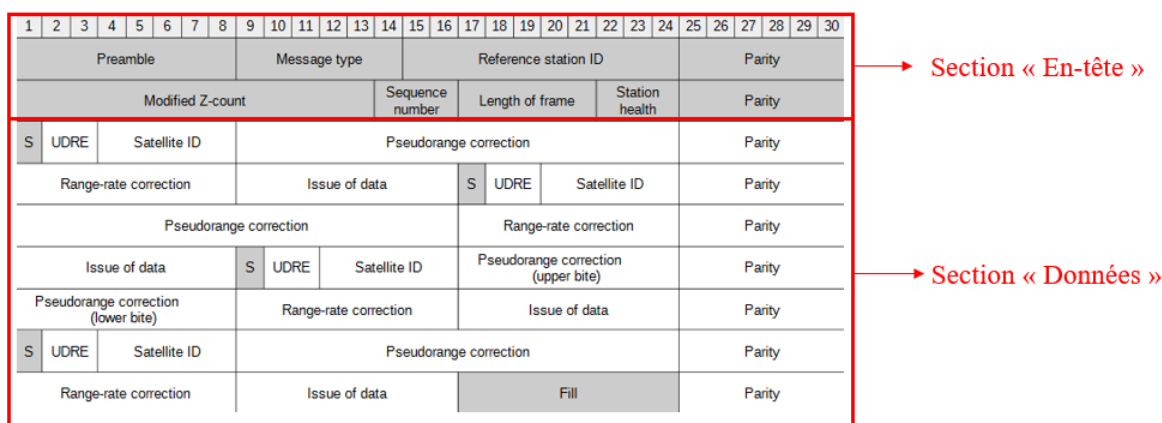


Figure 3.1 : Structure d'un message à quatre satellites de type 1 [19]

Dans la Figure 3.1, la longueur de la trame du message de type 1 est de 30 bits, tandis que la hauteur de la trame dépend du nombre de satellites visibles à la station de référence – par exemple dans ce cas, la hauteur de la trame est de neuf mots avec quatre satellites visibles. Chaque mot se termine par une parité de 6 bits, qui est utilisée pour vérifier les erreurs.

Dans la version 2.3, le DGPS (Différentiel GPS) conventionnel nécessite les types de message 1, 2 et 9 pour assurer la précision du compteur. Le fonctionnement RTK (Real Time Kinematics) repose sur les types de message 18 à 21 pour fournir une précision centimétrique. Divers systèmes utilisent le format de message RTCM pour transmettre des informations propriétaires. Le message de type 59, en particulier, peut être utilisé comme canal de communication pour transmettre, par exemple : des messages courts.

La version 3 du RTCM a été définie pour accroître l'efficacité de la transmission des informations et pour améliorer l'opération d'intégrité. La version 3 a été conçue en particulier pour les opérations RTK et le réseau RTK, où un grand volume de données doit être transmis. Le message se compose d'un préambule de 8 bits, d'un identificateur de longueur de message de 10 bits et de 6 bits supplémentaires dans l'en-tête, réservés pour une utilisation future. Le champ de données a une longueur maximale de 1024 octets, suivie d'un contrôle de redondance cyclique (CRC - Cyclic Redundancy Check) sur 24 bits.

Pour la transmission des données RTCM sur Internet, le transport en réseau de RTCM via le format du protocole Internet (NTRIP-Networked Transport of RTCM via Internet Protocol) a été défini par l'agence fédérale Allemande de cartographie et de géodésie. Le NTRIP est basé sur le protocole de transfert hypertexte (HTTP-hypertext transfer protocol). Entre-temps, le format NTRIP a été officiellement repris par le RTCM.

3.1.2. Format RINEX

Afin d'économiser de l'espace de stockage, les formats propriétaires de récepteur GNSS sont principalement binaires. Cela crée un problème lors de la combinaison de données provenant de différents récepteurs GNSS. Pour résoudre ce problème, le format RINEX est développé. En 1989, la première version est développée par W.Gurtner de l'institut d'astronomie de l'Université de Berne, en Suisse.

Les types de fichiers RINEX (ASCII) les plus couramment utilisés sont le fichier de navigation, qui contient les données d'éphémérides du satellite, et le fichier d'observation. Le fichier d'observation contient essentiellement les phases de porteuse, les distances en code, les mesures Doppler et les rapports signal/bruit des GPS, GLONASS, Galileo, Beidou, ainsi que les données de systèmes d'augmentation satellitaire EGNOS et WASS(SBAS). Les observations des différents GNSS sont désignées par le caractère « G » pour GPS, « R » pour GLONASS, « E » pour Galileo et « S » pour les satellites SBAS. Depuis 1993, la version RINEX 2 est disponible, elle a été révisée et adoptée plusieurs fois. La version RINEX 3.02 a été soumise en avril 2013 et contient de nouveaux codes d'observation provenant de système GPS ou Galileo. La dernière version est RINEX 3.04 de décembre 2018. Actuellement, les deux versions RINEX 2 et RINEX 3 sont toujours utilisées.

La version RINEX 2.11 définit sept fichiers RINEX différents, chacun contenant une section d'en-tête et une section de données : (1) fichier de données d'observation GNSS, (2) fichier de message de navigation GPS, (3) fichier de données météorologiques, (4) fichier de message de navigation GLONASS, (5) fichier de message de navigation par satellite géostationnaire, (6) fichier de données d'horloge satellite et récepteur et (7) fichier de données de diffusion SBAS. La longueur de ligne de tous les fichiers RINEX 2.11 est limitée à un maximum de 80 caractères et le nombre de lignes varie selon le fichier. Dans la version 3, la restriction de 80 caractères dans la longueur de ligne des enregistrements d'observation est supprimée. Les détails de fichiers RINEX sont présentés dans la section 3.2.

3.1.3. Format NMEA

L'association nationale américaine d'électronique marine (NMEA-US National Marine Electronics Association) a proposé en 1983 la spécification d'interface NMEA-0183 [16]. Bien que définie à l'origine pour l'interface des appareils électroniques marins, elle est devenue entre-temps une interface standard volontaire de l'industrie pour les récepteurs GNSS. Le format de données NMEA spécifie le format d'échange des informations de position, y compris les indicateurs de qualité, les données de route sur terre ou de vitesses sur terre. La transmission de la correction différentielle, bien que spécifiée aujourd'hui, ne faisait pas partie des objectifs initiaux de NMEA-0183.

La norme NMEA-0183 spécifie une transmission de données en série avec un débit de 4800 bps et un format ASCII 8 bits des données. Les récepteurs GNSS offrent généralement des débits de transmission plus élevés.

Traitement des données GNSS

Un ensemble de données NMEA, désigné par une chaîne ou une phrase, est composé de 82 caractères au maximum. Chaque phrase commence par le signe de dollar « \$ » suivi de l'adresse déposée. L'adresse déposée est généralement subdivisée en un champ de deux caractères et un type de phrase de trois caractères. Entre-temps, environ 60 types de phrases différents ont été approuvés (certaines phrases dans Tableau 3.2.). Le champ parlant utilise un « GP » pour indiquer les données GPS et un « GL » pour les informations GLONASS, BD ou GB pour les informations Beidou et « GA » pour les informations Galileo. L'adresse déposée est suivie d'un nombre variable de champs de données qui sont séparés par des virgules (.). Le dernier champ de données est suivi d'un astérisque « * » et d'une somme de contrôle optionnelle. Seuls certains types de messages requièrent obligatoirement la somme de contrôle, qui est calculée par une opération XOR des caractères commençant après le « \$ » jusqu'au « * », mais à l'exclusion de celui-ci. La somme de contrôle, donnée en format hexadécimal, est finalement suivie d'un caractère de retour de chariot et de saut de ligne. Les différents messages et leur contenu sont définis dans le Tableau 3.2. La version actuelle 4.11 de la NMEA-0183 a été publiée en 2018.

Tableau 3.2 : Quelques phrases NMEA liées au GNSS

Phrases	Description du contenu
ALM	Données de l'almanach
GGA	Données relatives à la position (temps, coordonnées ellipsoïdales, nombre de satellites, dilution de la position, indicateur de qualité, hauteur géoïdale)
GLL	Données fixes réduites (heure, latitude, longitude, statut)
GSA	Satellites actifs (utilisés pour le calcul de la position), y compris les facteurs DOP
GSV	Satellites en vue, azimuth, élévation et rapports signal/bruit pour chaque satellite
VTG	Données de navigation (cap sur le sol, vitesse sur le sol)

Nous allons ci-dessous, décoder les données NMEA, par exemple une ligne des données de phrases « GGA » [source : gpsinformation.org/da/nmea] :

\$GPGGA,123519,4807.038,N,01131.000,E,1,08,0.9,545.4,M,46.9,M,,*47

Où :

GP	Données indiquées de GPS
GGA	Données relatives
123519	Correction prise à 12 :35 :19 UTC
4807.038,N	Latitude 48 deg 07.038' N
01131.000,E	Longitude 11 deg 31.000' E
1	Qualité fixe : 0 = non valable 1 = GPS fixe 2 = DGPS fixe 3 = PPS fixe 4 = Cinématique en temps réel 5 = RTK flottant 6 = Estimé (estimation) 7 = Mode de saisie manuelle 8 = Mode de simulation
08	Nombre de satellite suivis
0.9	Dilution horizontale de la position

545.4,M	Altitude, mètres, au-dessus du niveau moyen de la mer
46.9,M	Hauteur du géoïde (niveau moyen de la mer) au-dessus du WGS84 ellipsoïde
« Champ vide »	Temps en secondes depuis la dernière mise à jour du DGPS
« Champ vide »	Numéro d'identification de la station DGPS
*47	Les données de la somme de contrôle, commence toujours par *

3.2. Traitements de données RINEX

Dans ce travail de thèse, les données RINEX ont été utilisées. Pourquoi sont-elles utilisées ? Première raison, elles peuvent être utilisées pour tester des solutions matérielles et logicielles et pour de nouveaux algorithmes de post-traitement, par exemple : modélisation de l'ionosphère ou de la troposphère. Deuxième raison, sous réserve des limitations matérielles, l'accès aux mesures brutes permet à un développeur d'utiliser des techniques de positionnement avancées (RTK, PPP) et de créer une solution actuellement disponible uniquement dans les récepteurs professionnels. Il en résulte une poussée technologique pour développer de nouvelles applications. Troisième raison, l'accès aux mesures brutes offrira de nouveaux moyens de détecter les interférences RF et de localiser la source d'interférence en combinant les mesures de plusieurs appareils ou de vérifier la source (OS-NMA : Open Service Navigation Message Authentication). Avec la troisième raison, d'autres applications seront réalisées dans le future proche.

Pour déterminer la position et la vitesse d'un récepteur, des données navigation des satellites et des observations sont utilisées. Dans nos travaux, les quatre types fichiers RINEX sont utilisés : le fichier d'observations GNSS, le fichier des messages de navigation GPS, le fichier des messages de navigation GLONASS et le fichier des messages de navigation Galileo.

Tableau 3.3 : Type de variables dans le format RINEX

(# est utilisé pour identifier l'espace)

Type de variable	Format	Exemples	Description
Integer	In	I4 : '2020' I5 : '#2020' I3.3 : '020'	Un nombre entier à 'n' positions. Notez qu'il est possible de spécifier la longueur minimale de l'entier en incluant un nombre après le symbole en point flottante. Cela oblige à compléter le nombre, même avec des zéros.
Float	Fn.m	F8.2 : '-1999.50' F8.2 : '#1999.50' F7.3 : '99.000'	Un 'n' positions double avec 'm' positions décimales. La note 'n' comprend l'espace du signe et le symbole en point flottante.
Exponential	Dn.m	D12.2 : '-1402.20D+02' D12.4 : '-0.1999D+06' E12.3 : '44.000E+006' E12.3 : '-44.000E+006'	Un double exponentiel à 'n' positions avec 'm' positions décimales. La note 'n' est la longueur totale du nombre exponentiel, qui comprend