IGN

l'information grandeur nature

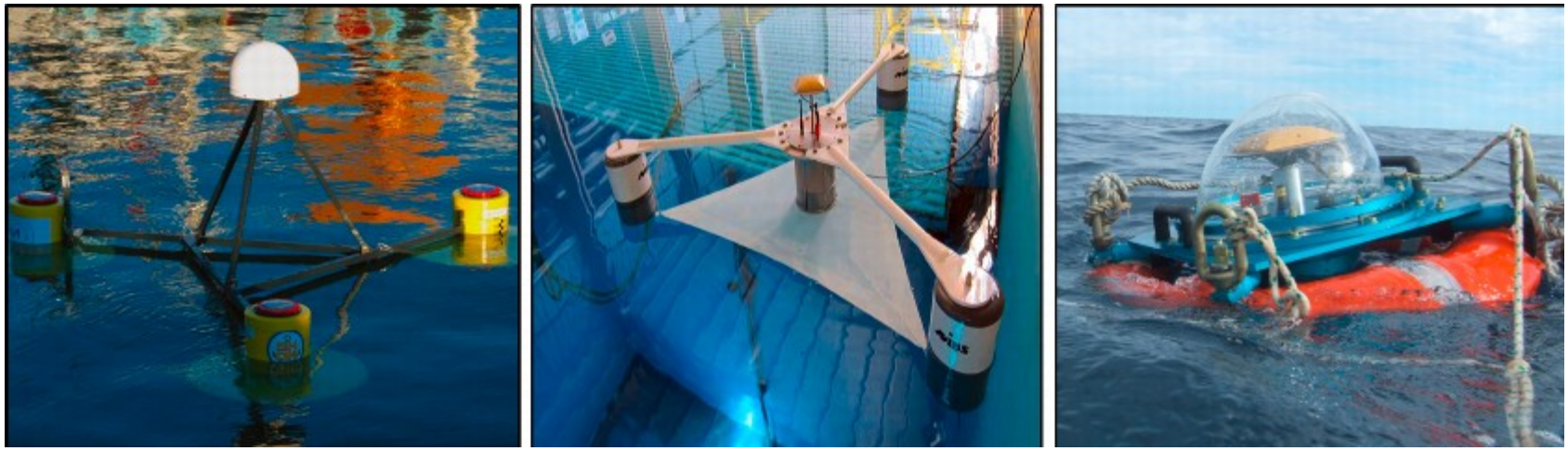
INSTITUT NATIONAL
DE L'INFORMATION
GÉOGRAPHIQUE
ET FORESTIÈRE

# Système de positionnement par satellite

Thomas Donal
Avril 2019

# GNSS et mesures du niveau de la mer.

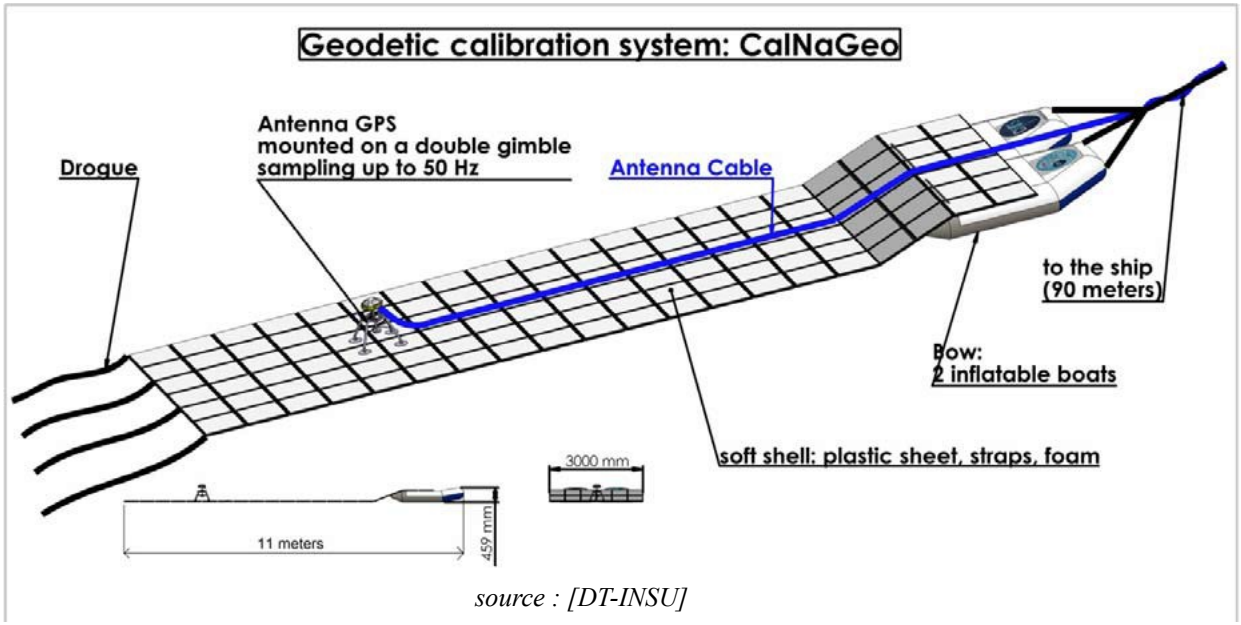
# Bouées GNSS



*source : [SHOM]*

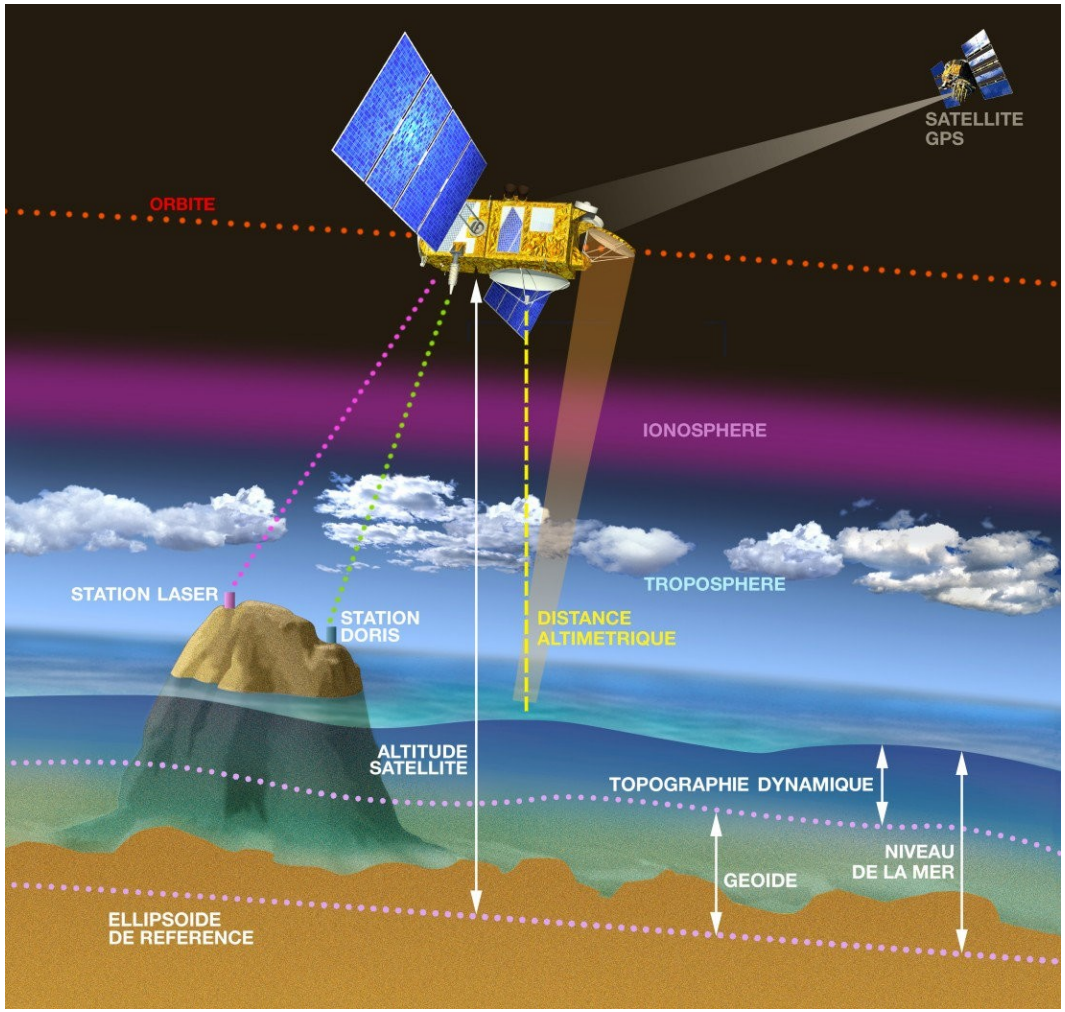
*source : [DT-INSU]*

# Nappes GNSS

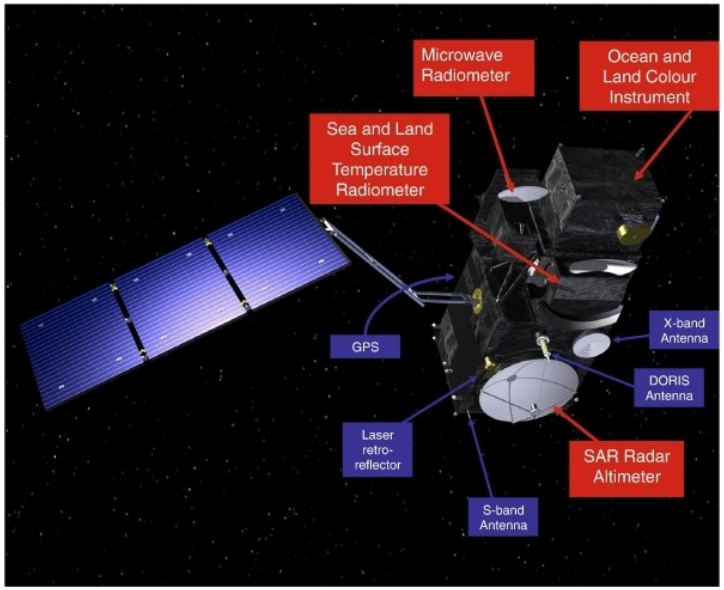



*source : [DT-INSU]*

# Altimétrie spatiale

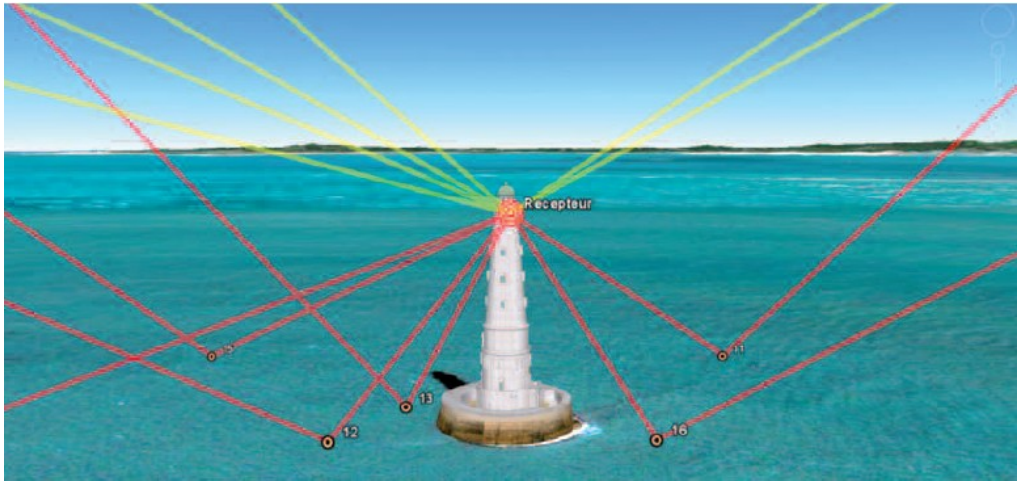


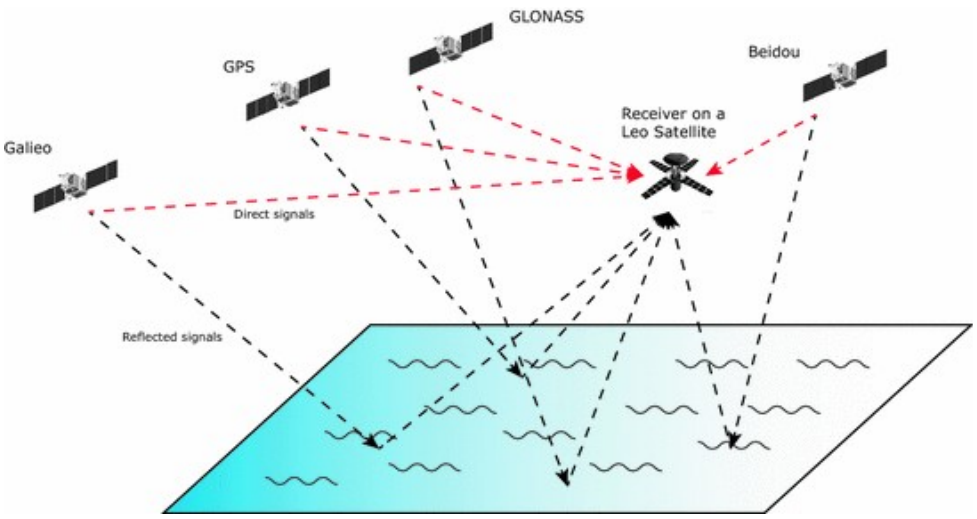

*source : [CNES]*

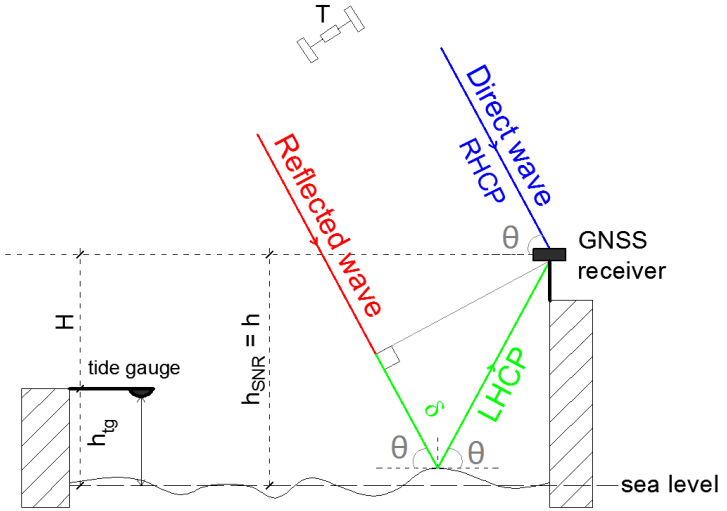



*source : [CNES]*

# Réflectométrie GNSS



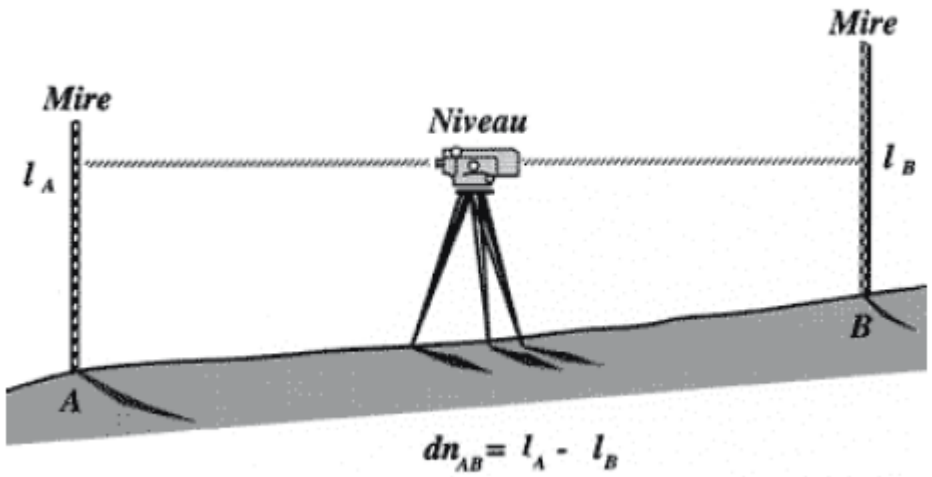

*source : [Roussel N 2015]*

# Co-localisation avec les marégraphes

# Co-localisation GNSS / marégraphes

# Rattachement GNSS ↔ marégraphe
# Mesures de nivellement

# Nivellement géométrique

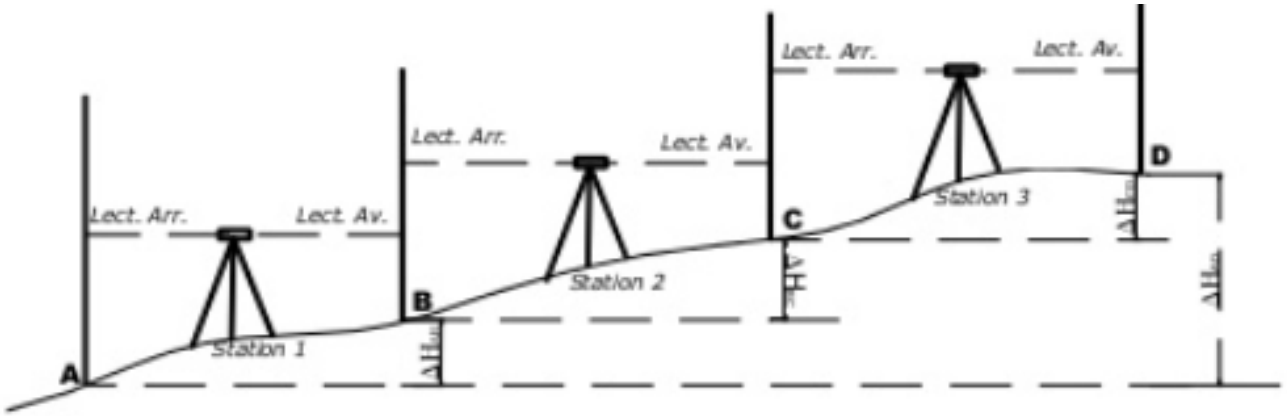



$$dn_{AB} = l_A - l_B$$

$$Alt_B = Alt_A + L_{AR} - L_{AV}$$

IGN

# Nivellement géométrique




$$\Delta H_{AB} = \text{lect arrA} - \text{Lect av. B}$$

$$\Delta H_{BC} = \text{lect arr B} - \text{Lect av. C}$$

$$\Delta H_{CD} = \text{lect arr C} - \text{Lect av. D}$$

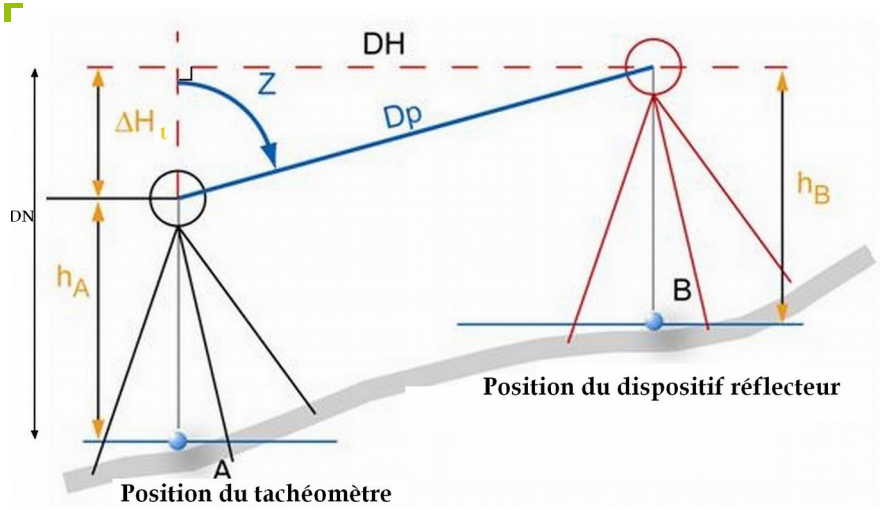
---

$$\Delta H_{AD} = \Sigma\, lect.arr - \Sigma\, Lect\ av.$$

# Nivellement géométrique

# Nivellement géométrique

# Nivellement trigonométrique




$$DN = h_A + D_p \cos(Z) - h_b$$

# Système altimétrique

## France continentale

Système d'altitude : NGF/IGN69

- **Type d'altitude** : normal (voir « Calcul des altitudes normales »)
- **Origine** établie à partir des observations marégraphiques réalisées au Marégraphe de Marseille entre le 1er février 1885 et le 1er janvier 1897
- **Repère fondamental** : M.AC - 0-VIII implanté à l'intérieur des bâtiments du Marégraphe de Marseille
- **Couverture** totale du territoire

## TAAF (Terres Australes et Antarctiques Françaises)

Système d'altitude : EPF 1952 (Ile des Pétrels)

- **Type d'altitude** : orthométrique
- **Niveau de référence** : Niveau moyen de la mer déterminé grâce à un marégraphe implanté sur l'îlot du Marégraphe
- **Repère fondamental** : AB - 1 (Croix gravée sur un rocher)
- **Couverture** totale de l'île

# GNSS, comment ça marche ?

# Plan de la présentation

- 1. Introduction aux GNSS
- 2. Signaux et mesures GNSS
- 3. Erreurs sur les mesures GNSS
- 4. Méthodes de positionnement
- 5. Réseaux GNSS permanents
- 6. Les différents GNSS

# Pré-requis

- Systèmes de référence
- Systèmes de coordonnées

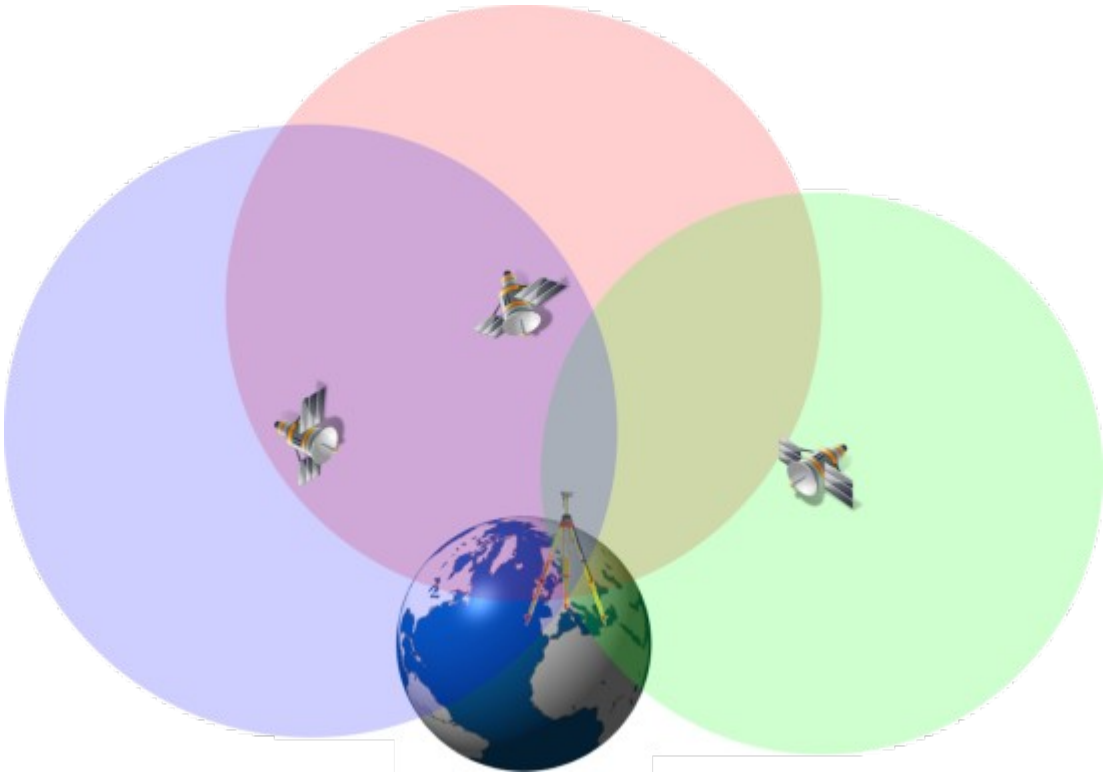
# 01. Introduction au GNSS

# 1.1. Définition

- **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 couverture mondiale.
- **Objectif :**
  - fournir à un récepteur sa position, sa vitesse et l'heure.
  - positionnement réalisé de manière instantanée, 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.

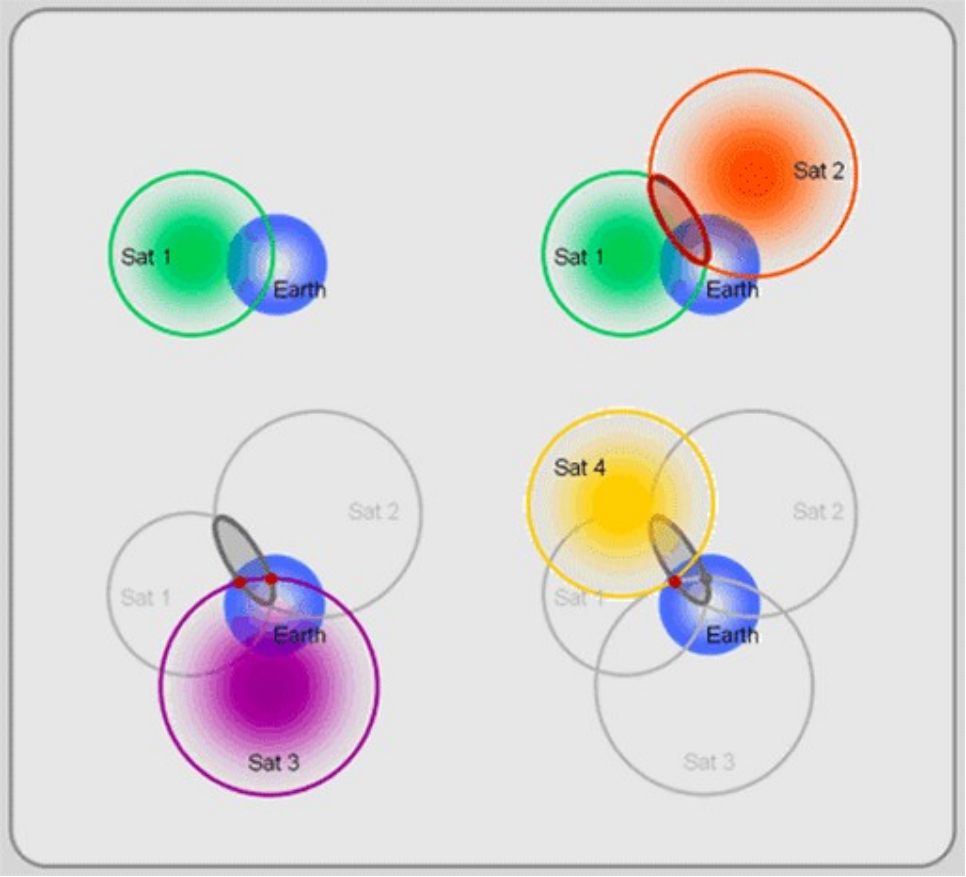
# 1.2. Principe du positionnement

- Le fonctionnement des GNSS repose sur la mesure du temps de propagation du signal émis par un satellite jusqu'à sa mesure par un récepteur. La mesure du temps de propagation du signal en provenance de plusieurs satellites permet par intersection de déterminer la position du récepteur.



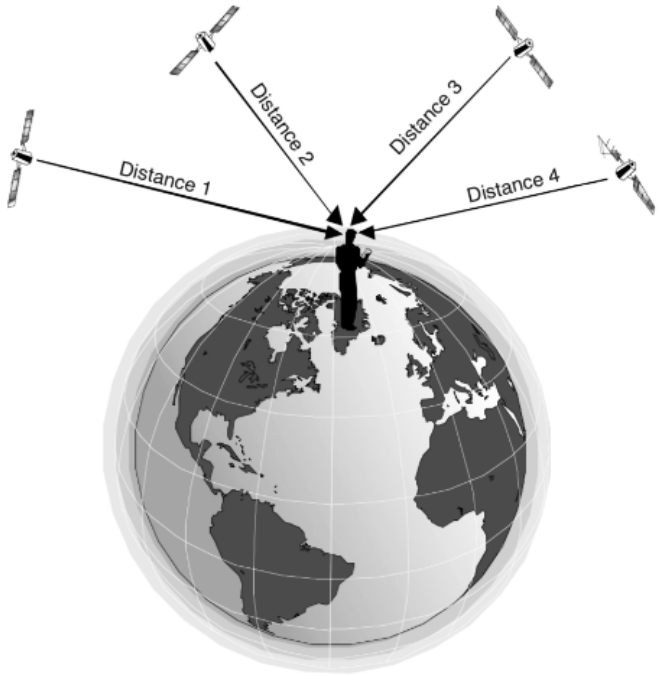
# 1.2. Principe du positionnement

- **Pour un positionnement standard par GNSS, 4 inconnues doivent donc être déterminées :**
  - Trois inconnues de position, dans un repère géocentrique, lié à un système de référence propre au GNSS ;
  - Une inconnue de temps, , liée à la désynchronisation du récepteur avec le temps GNSS.



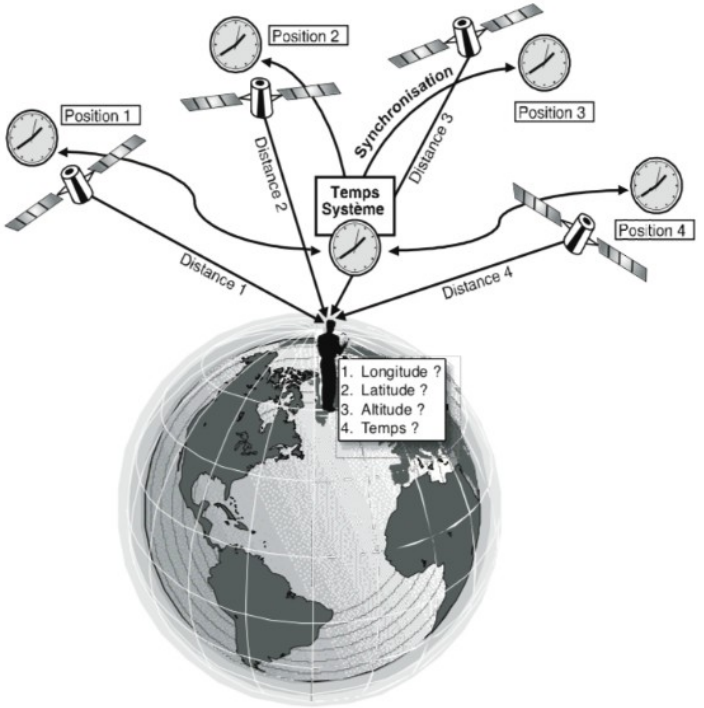
# 1.2. Principe du positionnement

- **Une constellation de satellites en orbite autour de la Terre :**
  - Chaque satellite diffuse en permanence un signal vers la Terre
  - Chaque satellite envoie sa position
  - Couverture mondiale
- **Un nombre illimité de récepteurs utilisateur :**
  - Réception des signaux provenant d'au moins 4 satellites
  - Mesure des distances récepteur-satellites
  - Calcul de la position et du temps récepteur
  - Performances homogènes sur l'ensemble du globe

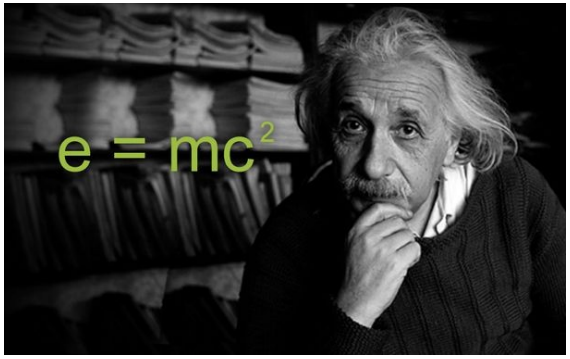


# 1.3. Temps GNSS

- **Exemple d'applications :**
  - Synchronisation instrumentale.
  - Réseaux mobiles (GSM, UMTS, LTE) : horloges de référence primaires.
  - Synchronisation des réseaux d'émetteurs en Télévision numérique terrestre ;
  - Synchronisation de la phase dans les systèmes de distribution d'électricité ;
  - Datation des ordres en bourse pour les transactions à haute fréquence.




- **Relativité du temps**



# 02. Signaux et mesures GNSS

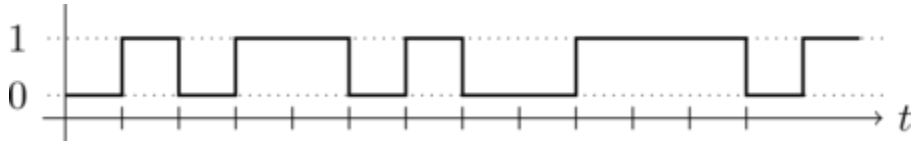
# Signaux GNSS

- Émission : quelques dizaines de watts
- Réception sur terre : 10e-16 watts, quelques millionièmes de milliardième de Watt

# 2.1. Codes pseudo-aléatoires

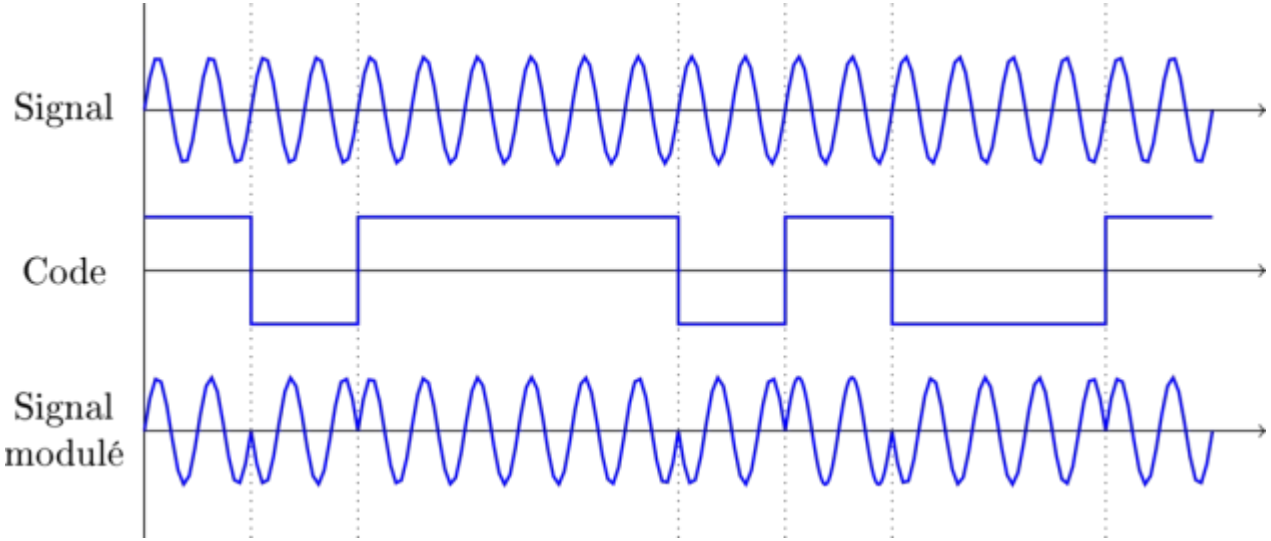
- **Les satellites GNSS et le récepteur utilisent un code pseudo-aléatoire pour déterminer le temps de propagation.**
- **L'étude au niveau du récepteur de la corrélation du code émis par le satellite et de la réplique qu'il génère permet une estimation de ce temps de propagation.**

*Allure du code émis par un satellite GNSS*



# 2.2. 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 électromagnétiques : les ondes porteuses.
- Le signal est modulé.

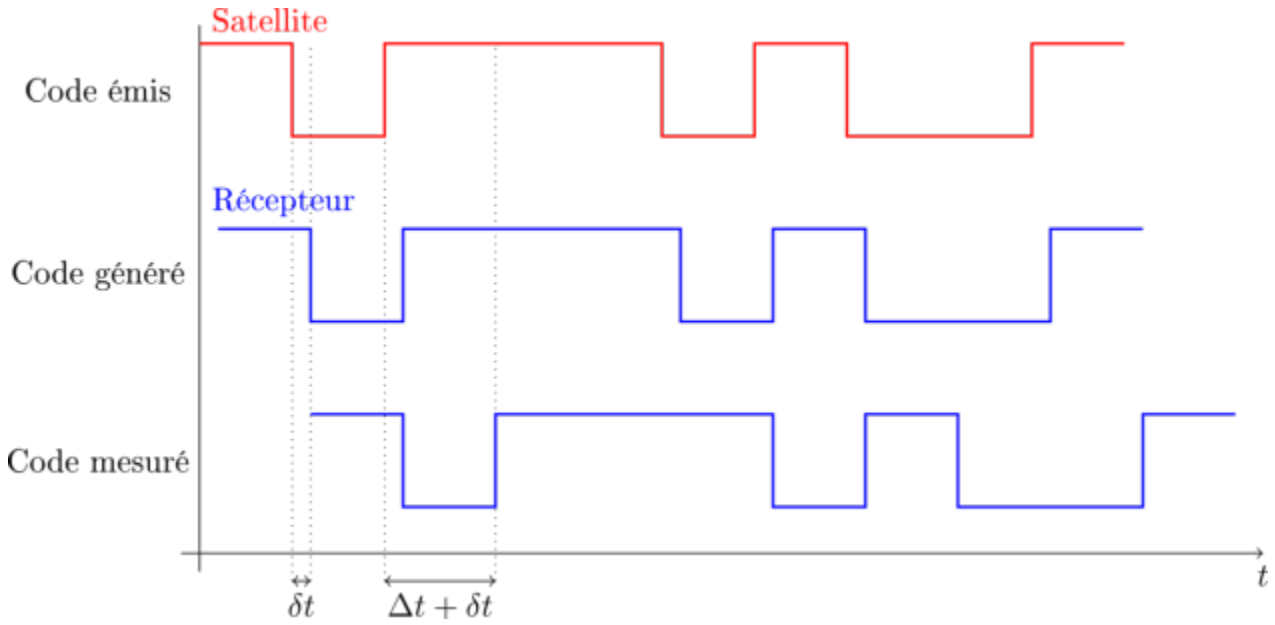


# 2.3. Message de navigation

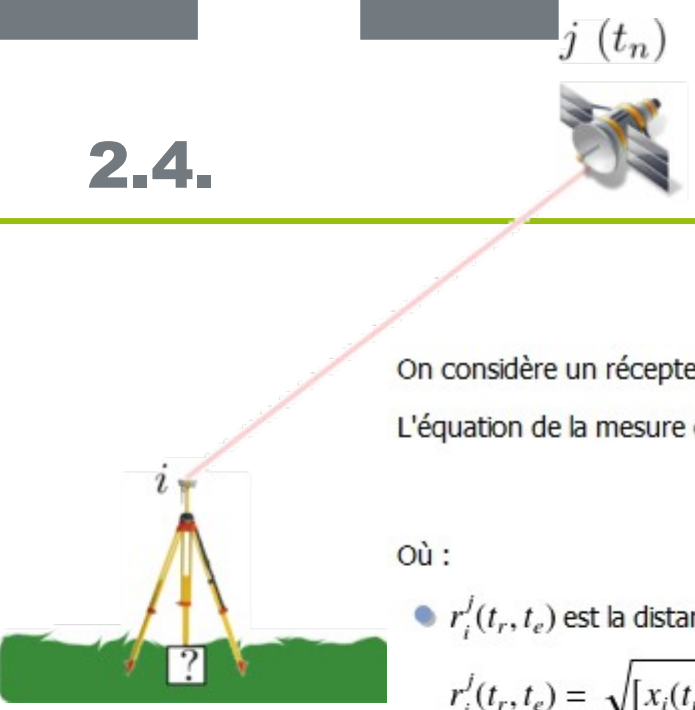
- **En plus d'être modulé par la phase à l'aide du code, les signaux GNSS sont également modulés à l'aide du message de navigation. Le message de navigation contient des informations qui sont exploitées par le récepteur, citons entre autres :**
  - La position des satellites (éphémérides) et des informations 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.
  - Des informations plus générales : modèle paramétrique global de l'ionosphère (pour la correction de son effet), almanach de tous les satellites (santé, position approchée).

# 2.4. La mesure de code

- Le récepteur reçoit en continu le code provenant du satellite avec un retard 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 , 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 synchronisés, l'écart de temps est entaché d'une erreur qu'il est nécessaire d'estimer.



# 2.4.




On considère un récepteur $i$ mesurant le temps de propagation du signal émis par le satellite $j$ à l'instant GNSS $t_e$.

L'équation de la mesure de code s'écrit sous la forme :

$$P_i^j(t_r) = r_i^j(t_r, t_e) + \tau_i^j(t_e, t_r) + c(\delta t_i - \delta t^j) + \varepsilon_i^j(t_r)$$

Où :

- $r_i^j(t_r, t_e)$ est la distance géométrique séparant émetteur et récepteur :

$$r_i^j(t_r, t_e) = \sqrt{[x_i(t_r) - x^j(t_e)]^2 + [y_i(t_r) - y^j(t_e)]^2 + [z_i(t_r) - z^j(t_e)]^2}$$

- $\tau_i^j(t_e, t_r)$ regroupe les retards à la propagation liés à l'atmosphère, à l'environnement de l'antenne du récepteur.
- $\delta t_i$ et $\delta t^j$ sont les erreurs d'horloge récepteur et satellite.
- $\varepsilon_i^j(t_r)$ est le bruit de la mesure du décalage temporel.

Dans l'équation de mesure de code :

- *Est mesurée* : la pseudo-distance $P_i^j(t_r)$.
- *Sont connus (ou modélisés)* : les retards à la propagation $\tau_i^j(t_r)$, l'erreur d'horloge de l'émetteur (satellite) à l'instant $t_e$, $\delta t^j$ ainsi que la position du satellite à l'instant $t_e$, $(x^j(t_e), y^j(t_e), z^j(t_e))$.
- *Sont inconnus (et doivent être estimés)* : l'erreur d'horloge du récepteur à l'instant $t_r$, $\delta t_i$, la position du récepteur à l'instant $t_r$, $(x_i(t_r), y_i(t_r), z_i(t_r))$.

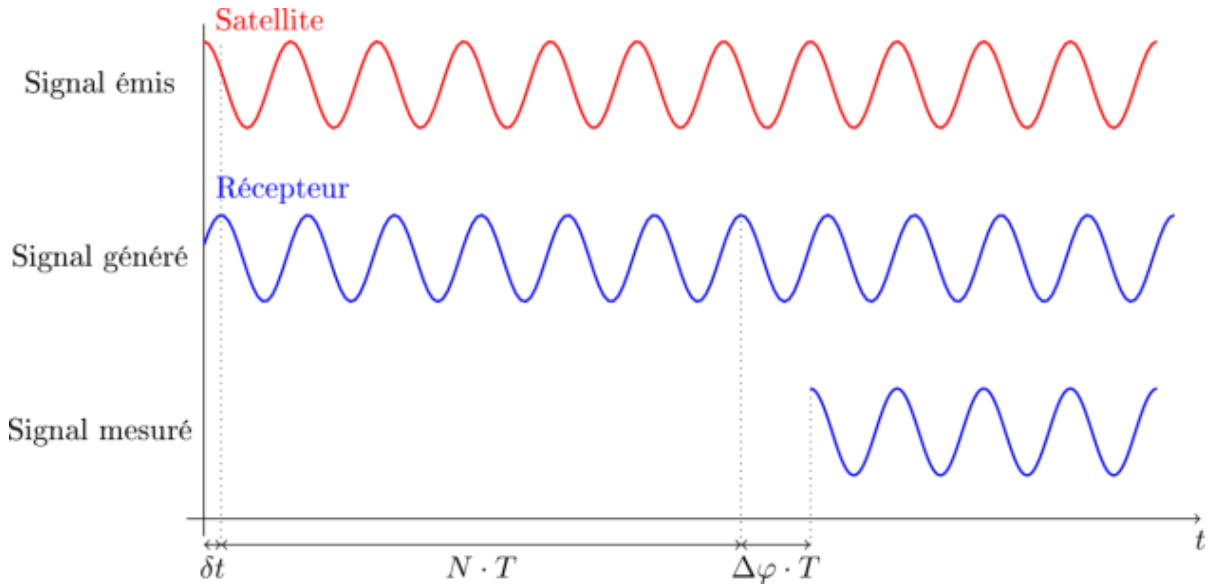
# 2.4. La mesure de code

- **4 inconnues doivent donc être déterminées : pour un positionnement instantané, la mesure de 4 distances au minimum est donc nécessaire.**

- **Les récepteurs utilisés actuellement permettent de réaliser la mesure de code avec une précision de l'ordre du centième de cycle (longueur d'un bit).**
  - Pour GPS, on appelle C/A code (Coarse/Acquisition) le code utilisé pour le positionnement standard. La largeur d'un bit de C/A code (longueur d'onde du code) est de 300 m, la précision ce cette mesure est donc de l'ordre de 3 m.

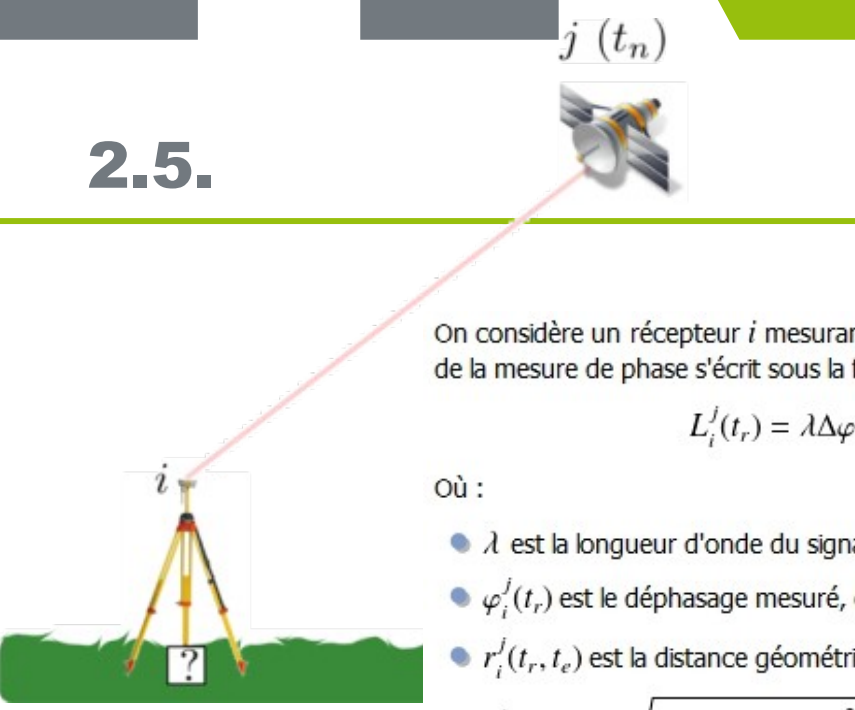
# 2.5. La mesure de phase

- 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.




- Cependant, 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.

# 2.5.




On considère un récepteur $i$ mesurant le temps de propagation du signal émis par le satellite $j$ à l'instant GNSS$t_e$. L'équation de la mesure de phase s'écrit sous la forme :

$$L_i^j(t_r) = \lambda\Delta\varphi_i^j(t_r) = r_i^j(t_e, t_r) + c(\delta t_i - \delta t^j) + \tau_i^j(t_e, t_r) - \lambda N_i^j(t_r) + \varepsilon_i^j(t_r)$$

Où :

- $\lambda$ est la longueur d'onde du signal étudié.
- $\varphi_i^j(t_r)$ est le déphasage mesuré, en ombre de cycles.
- $r_i^j(t_r, t_e)$ est la distance géométrique séparant émetteur et récepteur :

$$r_i^j(t_r, t_e) = \sqrt{[x_i(t_r) - x^j(t_e)]^2 + [y_i(t_r) - y^j(t_e)]^2 + [z_i(t_r) - z^j(t_e)]^2}$$

- $\tau_i^j(t_e, t_r)$ regroupe les retards à la propagation liés à l'atmosphère, à l'environnement de l'antenne du récepteur.
- $\delta t_i$ et $\delta t^j$ sont les erreurs d'horloge récepteur et satellite.
- $N_i^j(t_r)$ est l'ambiguïté de la mesure.
- $\varepsilon_i^j(t_r)$ est le bruit de la mesure.

Où $\varepsilon_i^j(t_r)$ est maintenant le bruit de la mesure de pseudo-distance (pour simplifier les notations).

Dans l'équation de mesure de phase :

- *Est mesuré* : la partie décimale du déphasage $\Delta\varphi_i^j(t_r)$.
- *Sont connus (ou modélisés)* : les retards à la propagation $\tau_i^j(t_r)$, l'erreur d'horloge de l'émetteur (satellite) à l'instant $t_e$ $\delta t^j$ ainsi que la position du satellite à l'instant $t_e(x^j(t_e), y^j(t_e), z^j(t_e))$.
- *Sont inconnus (et doivent être estimés)* : l'erreur d'horloge du récepteur à l'instant $t_r$ $\delta t_i$, la position du récepteur à l'instant $t_r(x_i(t_r), y_i(t_r), z_i(t_r))$ et le nombre entier de cycle $N_i^j(t_r)$.

# 2.5. La mesure de phase

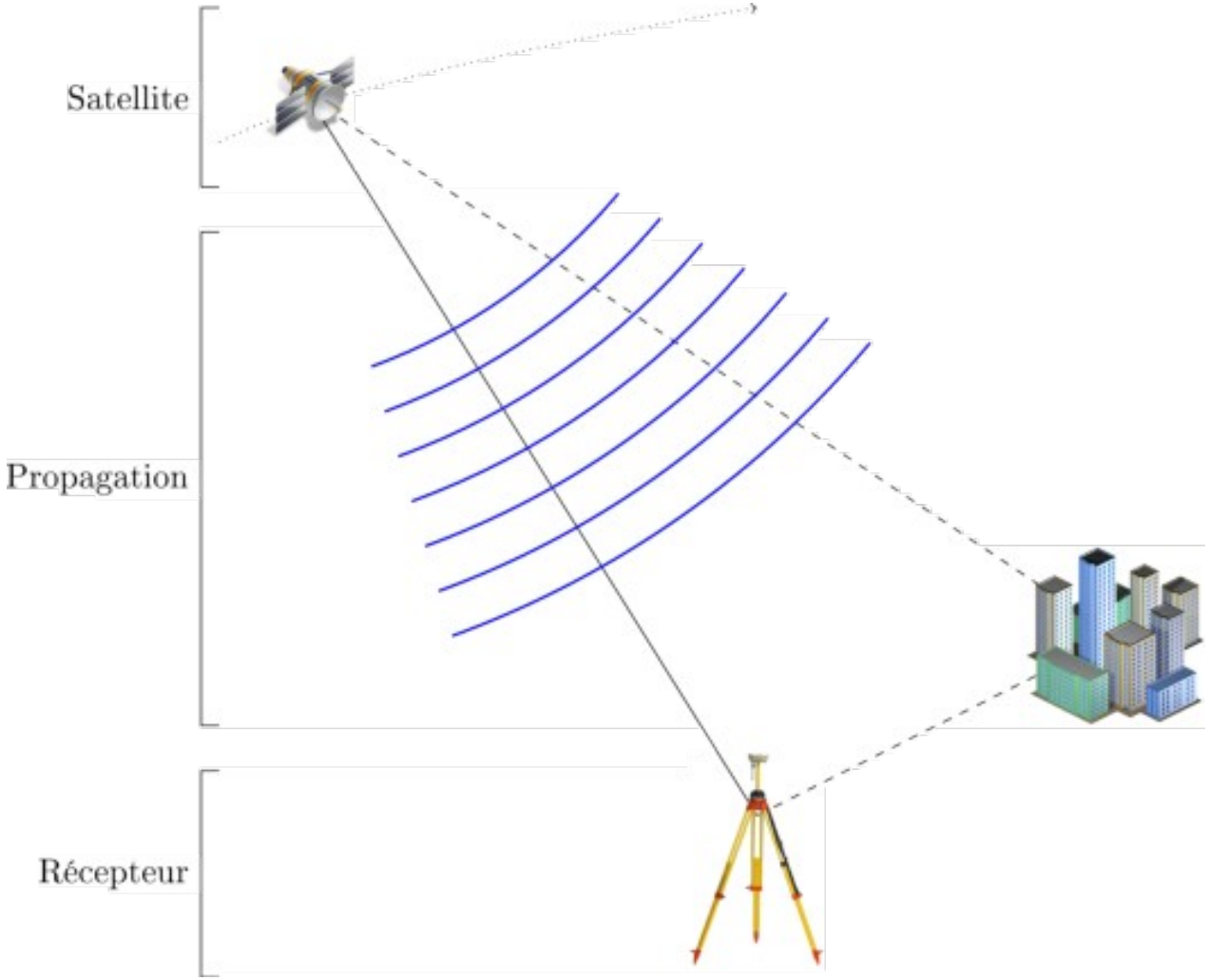
- **Les récepteurs actuels parviennent désormais à mesurer le décalage de phase avec une précision de l'ordre de 3 millièmes de cycle. Le bruit sur la mesure de phase atteint alors pour les différents GNSS des valeurs de l'ordre de 1 mm ce qui rend les mesures de phase beaucoup plus précises que les mesures de code.**

- **La détermination de l'ambiguïté - non triviale - en tant que valeur entière lors de l'analyse GNSS est une étape cruciale pour un positionnement précis. On parle alors de fixation des ambiguïtés. La résolution des ambiguïtés de phase est une étape cruciale pour un positionnement GNSS précis.**

  - Pour GPS les longueurs d'onde associées aux porteuses L1 et L2 sont respectivement L1=19,0 cm et L2=24,4 cm. La précision sur la mesure de phase est donc sub-millimétrique.

# 03. Erreurs sur les mesures GNSS

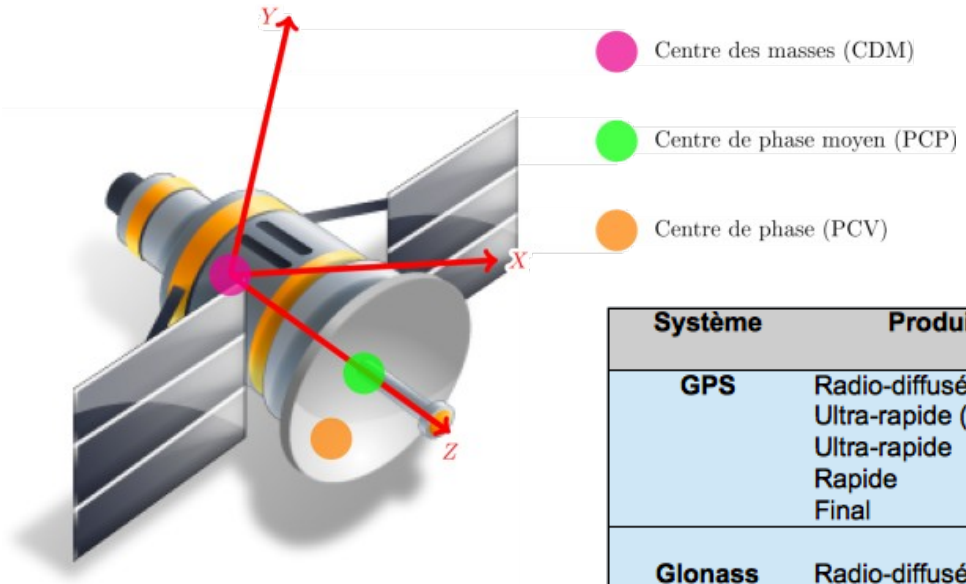
# 3.1 Origines des erreurs




*Origine des erreurs affectant les mesures GNSS*

# 3.2 Erreurs liées aux satellites

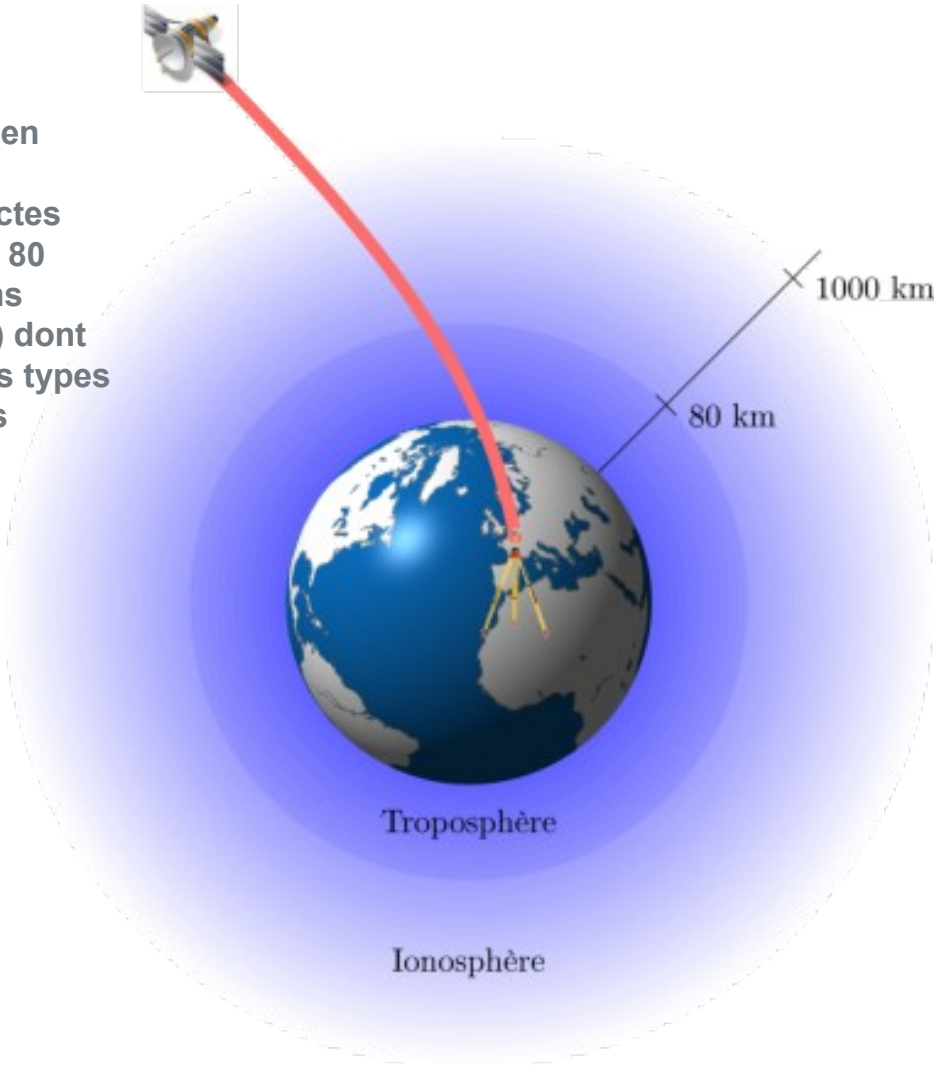
- **Pour se positionner, il est nécessaire de connaître :**
  - les positions des satellites (orbites ou éphémérides),
  - le comportement des horloges (correction d'horloge) qu'ils embarquent,
  - la position physique du point d'émission du signal (centre de phase).




| Système | Produit | Précision | Disponibilité | Résolution |
|---|---|---|---|---|
| GPS | Radio-diffusé | 1 m / 5 ns | temps réel | 1 jour |
| | Ultra-rapide (Prev.) | 5 cm / 3 ns | temps réel | 15 min |
| | Ultra-rapide (Obs.) | 3 cm / 150 ps | 3 – 9 h | 15 min |
| | Rapide | 2,5 cm / 75 ps | 17 – 41 h | 15min / 5 min |
| | Final | 2,5 cm / 75 ps | 12 – 18 jours | 15min / 30 s |
| Glonass | Radio-diffusé | 2 m / 20 ns | temps réel | |
| | Final | 3 cm / ? ns | 12 – 18 jours | 15 min |

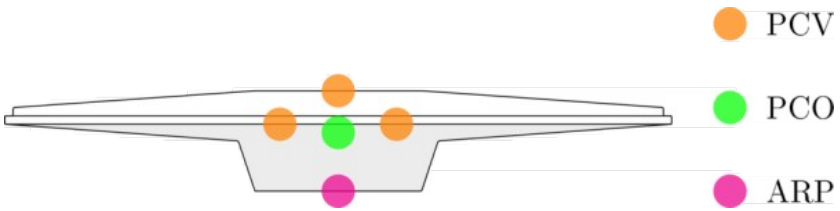
# 3.3. Erreurs liées à la propagation

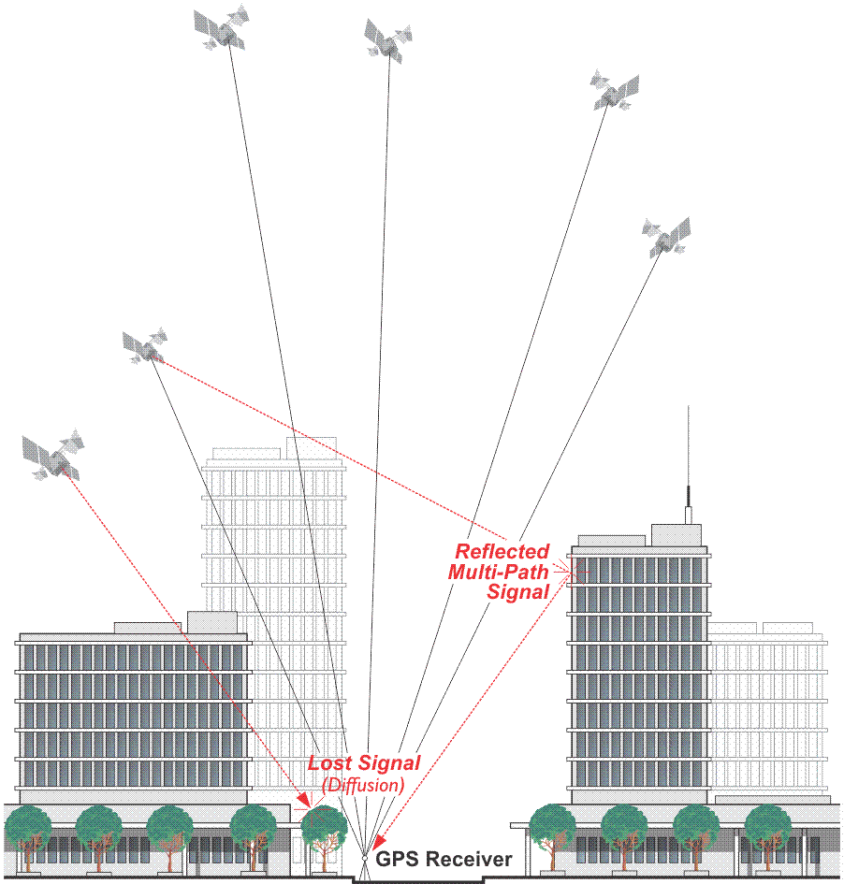
- La propagation des signaux GNSS va être modifiée en raison de la traversée de l'atmosphère. On sépare usuellement la contribution de deux couches distinctes car leur impact va être différent : la troposphère (0 - 80 km), dont l'effet est principalement lié aux conditions météorologiques, et l'ionosphère (au-delà de 80 km) dont l'effet est lié à la présence de charge libre. Différents types de correction de ces erreurs peuvent être envisagés (utilisation de modèles empiriques ou physiques, combinaison des mesures, calcul différentiel, etc.).



# 3.4. Erreurs liées à la station

- Des précautions doivent être prises au niveau du point stationné pour éviter des phénomènes physiques risquant d'affecter la mesure (masque, trajet multiple). Pour un niveau de précision millimétrique on utilise une carte de centre de phase qui modélise la position physique du point de mesure de l'antenne réceptrice.



# 3.4. Estimations des erreurs

**Ces sources d'erreur peuvent être réduites grâce à l'utilisation de modèles, de données externes, mais aussi via la mise en pratique de différentes méthodes de positionnement.**

| Source | | Impact de l'erreur | |
|---|---|---|---|
| | | Pos. Standard | Pos. Précis |
| Satellite | Horloge | 3 m | < 5 mm |
| | Orbite | 2 m | < 5 mm |
| | Centre de phase | 1 m | < 2 mm |
| 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 |

*Impact des erreurs sur 2 méthodes de positionnement par GNSS (ces méthodes de positionnement sont détaillés par la suite) 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.*

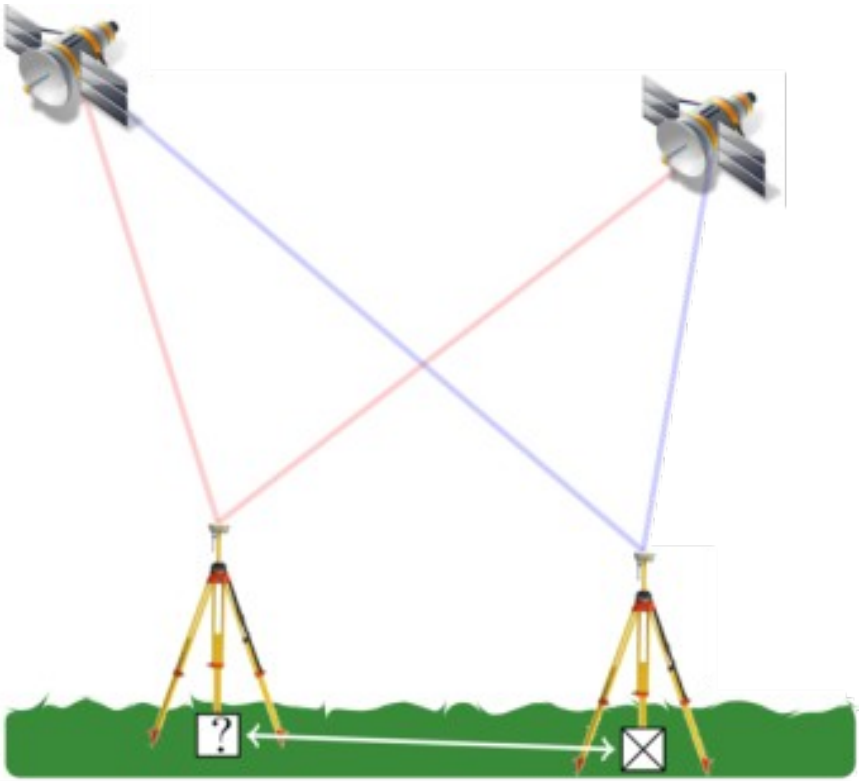
# 04. Méthodes de positionnement

# 4.1. Deux classes de positionnement

- **On distingue deux grands modes de positionnement à l'aide du GNSS :**
  - Positionnement absolu ou ponctuel
  - Positionnement relatif ou différentiel

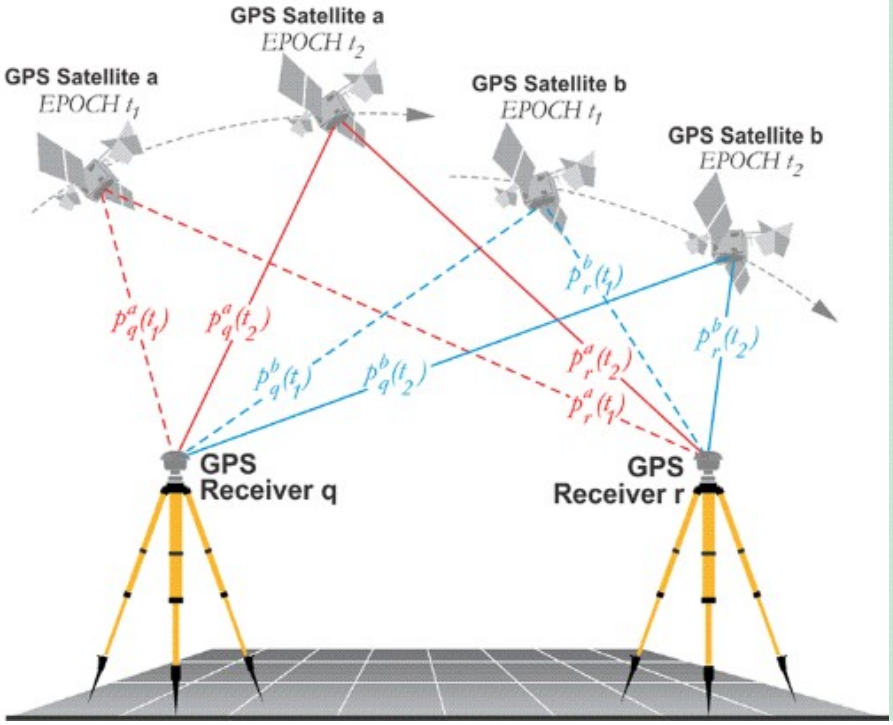
$(X, Y, Z)$

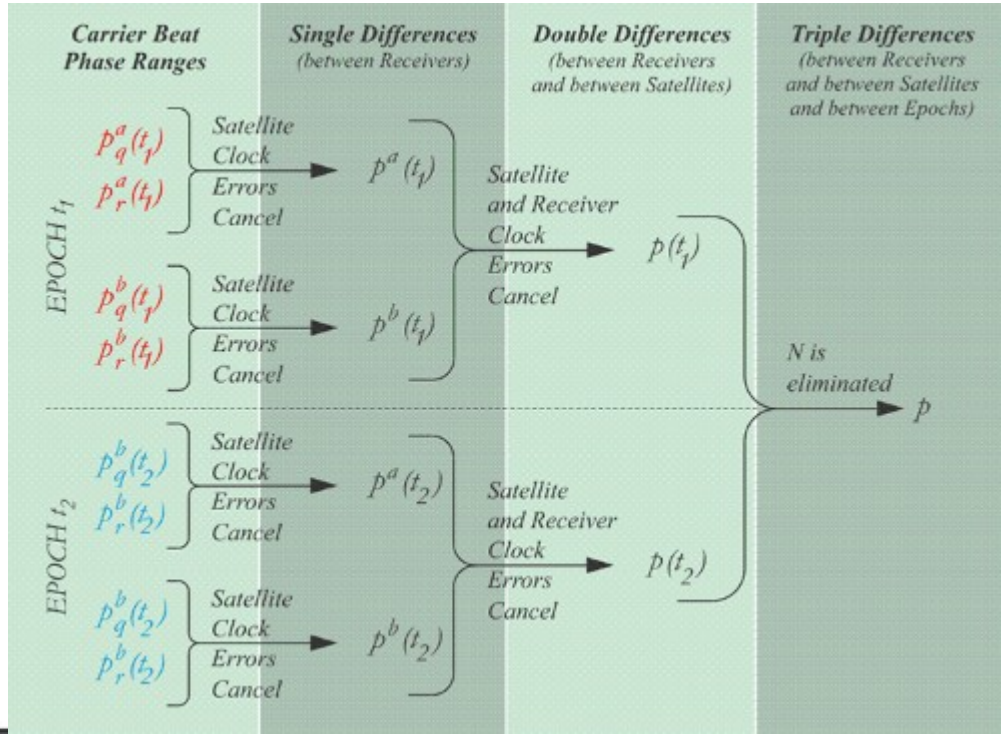
Positionnement absolu



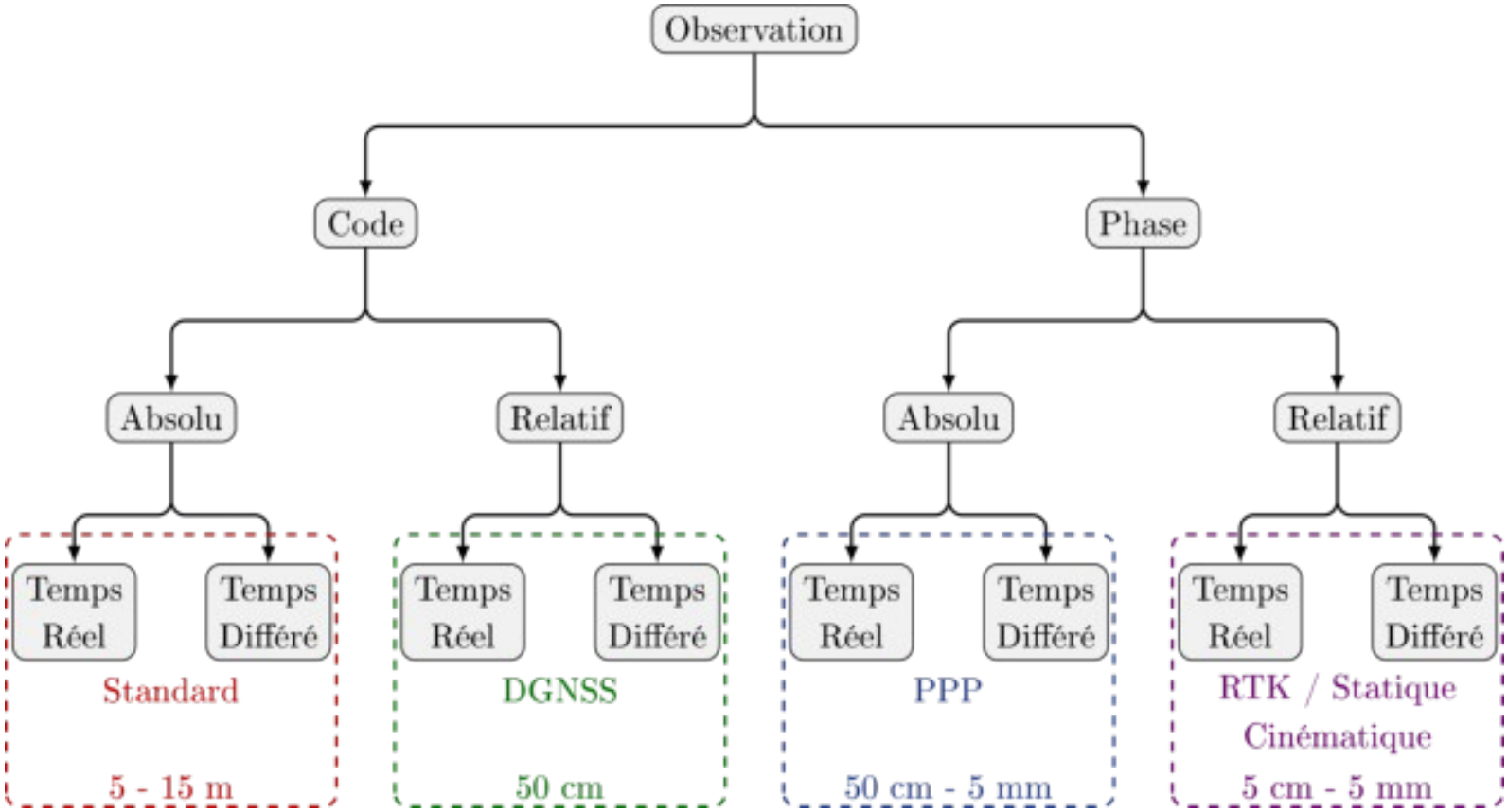

$(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)$

Positionnement relatif

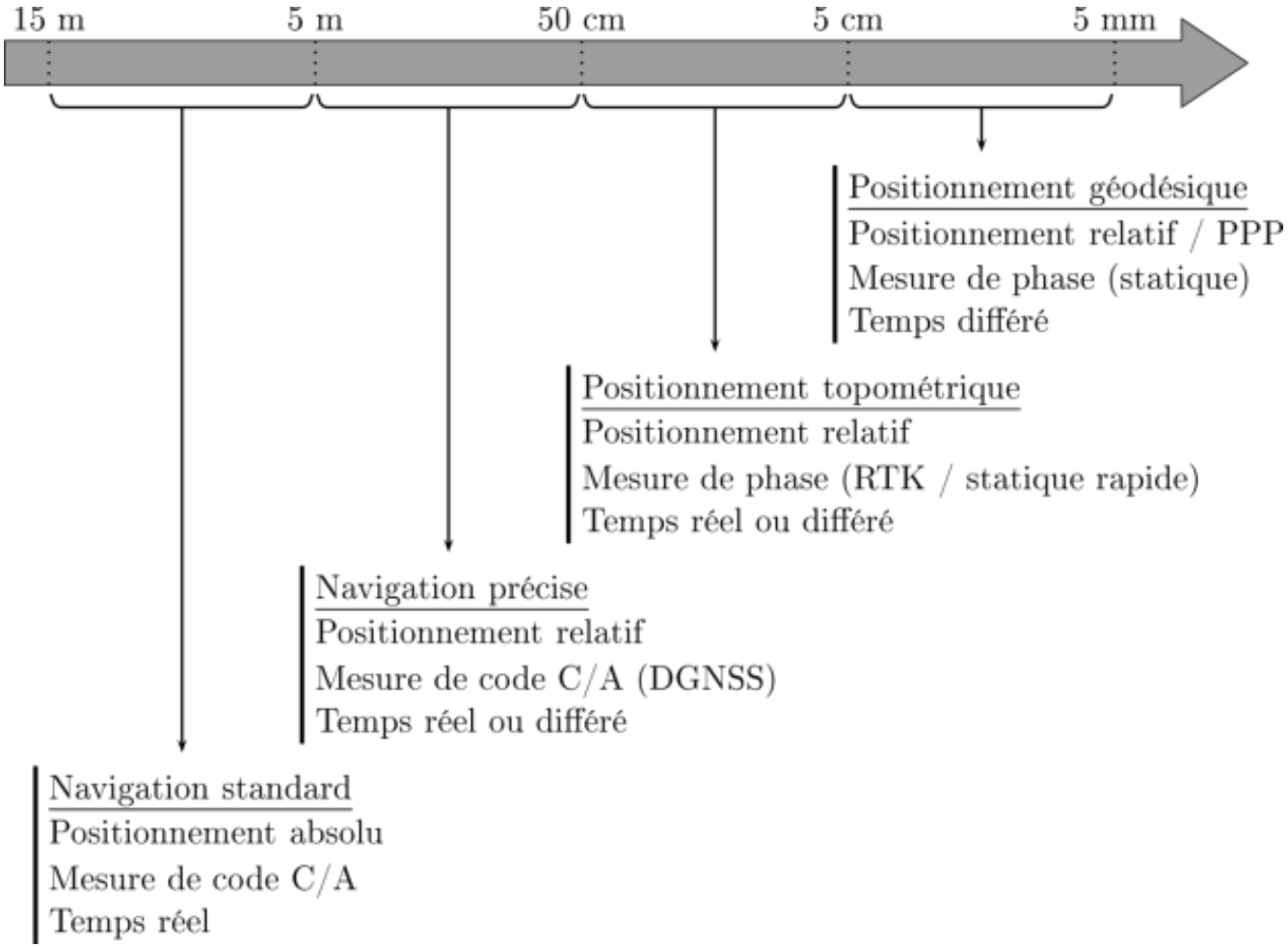

GPS Satellite a
EPOCH $t_2$
GPS Satellite a
EPOCH $t_1$
GPS Satellite b
EPOCH $t_1$
GPS Satellite b
EPOCH $t_2$
$p_q^a(t_1)$
$p_q^a(t_2)$
$p_r^b(t_1)$
$p_r^b(t_2)$
$p_q^b(t_1)$
$p_q^b(t_2)$
$p_r^a(t_2)$
$p_r^a(t_1)$
GPS
Receiver q
GPS
Receiver r


Carrier Beat Phase Ranges
Single Differences (between Receivers)
Double Differences (between Receivers and between Satellites)
Triple Differences (between Receivers and between Satellites and between Epochs)
EPOCH $t_1$
EPOCH $t_2$
$p_q^a(t_1)$
$p_r^a(t_1)$
$p_q^b(t_1)$
$p_r^b(t_1)$
$p_q^b(t_2)$
$p_r^b(t_2)$
$p_q^a(t_2)$
$p_r^a(t_2)$
Satellite Clock Errors Cancel
$p^a(t_1)$
$p^b(t_1)$
$p^a(t_2)$
$p^b(t_2)$
Satellite and Receiver Clock Errors Cancel
$p(t_1)$
$p(t_2)$
N is eliminated
$p$

# 4.4. Méthodes de positionnement



# 4.5. Classes de précision des différentes méthodes de positionnement



# 05. Réseaux GNSS Permanents

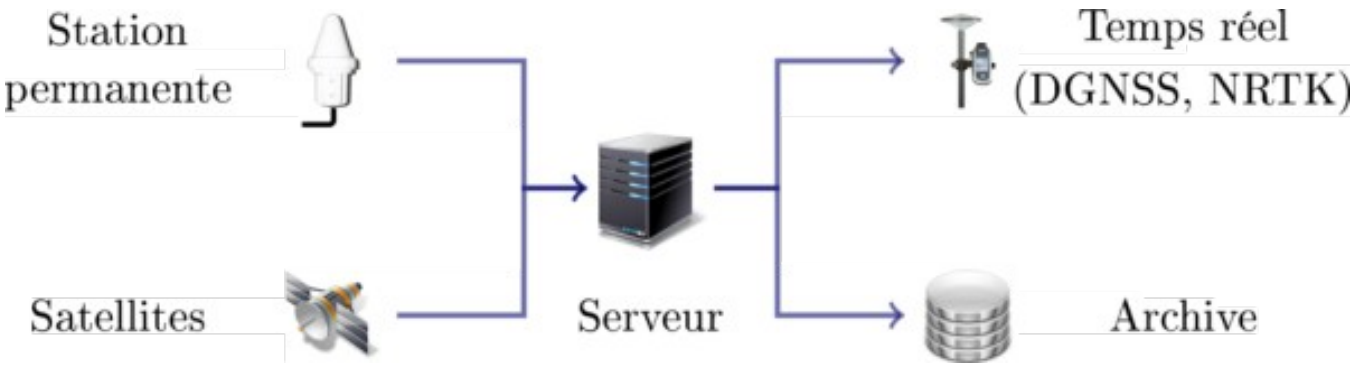
# 5.1. Utilité des Réseaux GNSS Permanents

- **Le positionnement précis par GNSS nécessite la connaissance :**
  - Des orbites et des corrections d'horloge satellite précises,
  - Des paramètres d'orientation de la Terre,
  - Un système de référence précis.

Le message de navigation GNSS ne donne pas accès à ces éléments avec le niveau de précision requis ses informations sont insuffisantes pour les activités scientifiques.

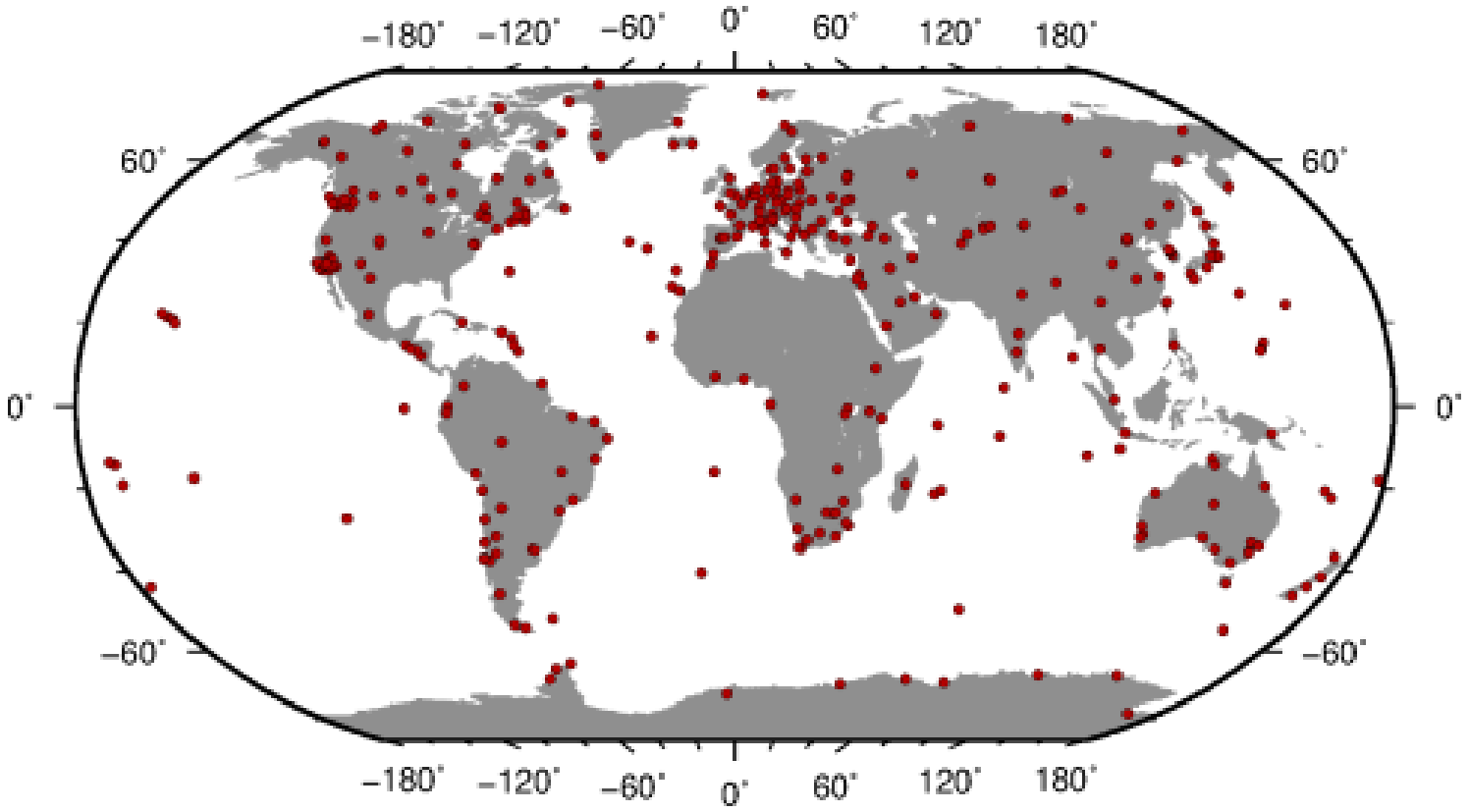
De plus, le positionnement précis par GNSS nécessite l'utilisation d'au moins deux récepteurs pour effectuer une seule mesure (ligne de base) : il est donc nécessaire de positionner un récepteur sur un point de coordonnées connues pour déterminer les coordonnées d'autres points.

# 5.1. Réseaux GNSS Permanents



# 5.3. Le Réseau institutionnel de l'IGS

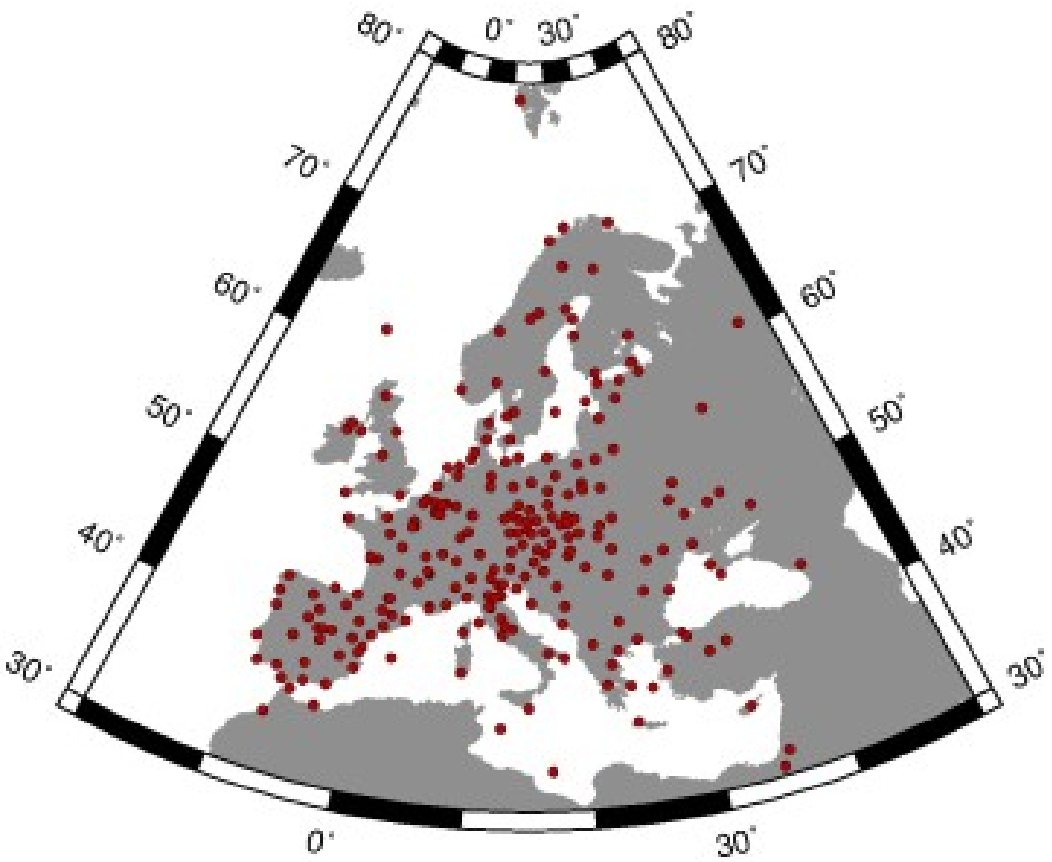
IGS INTERNATIONAL GNSS SERVICE




*Réseau GNSS Permanent de l'IGS mai 2013 (International GNSS Service).*

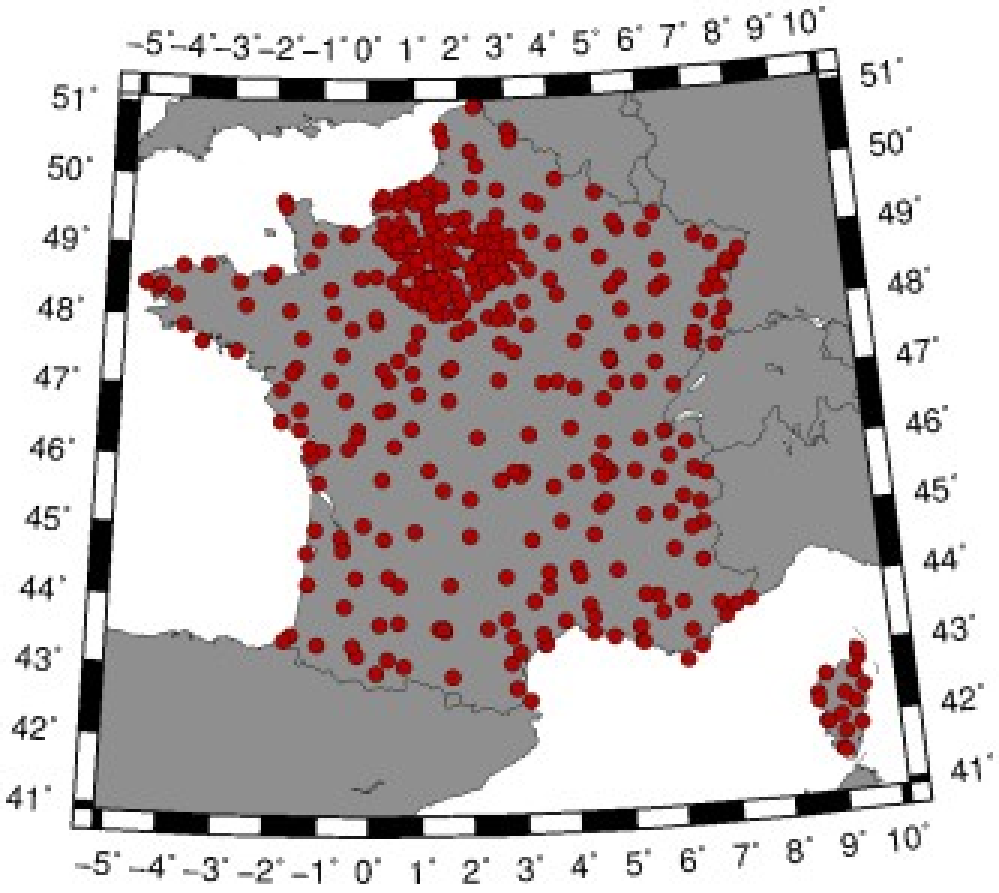
IGN

# 5.4. Le Réseau institutionnel de l'EUREF




*Réseau GNSS Permanent de l'EUREF mai 2013 (EUREF GNSS Permanent Network).*

# 5.5. Le Réseau institutionnel du RGP




*Réseau GNSS Permanent français mai 2013*

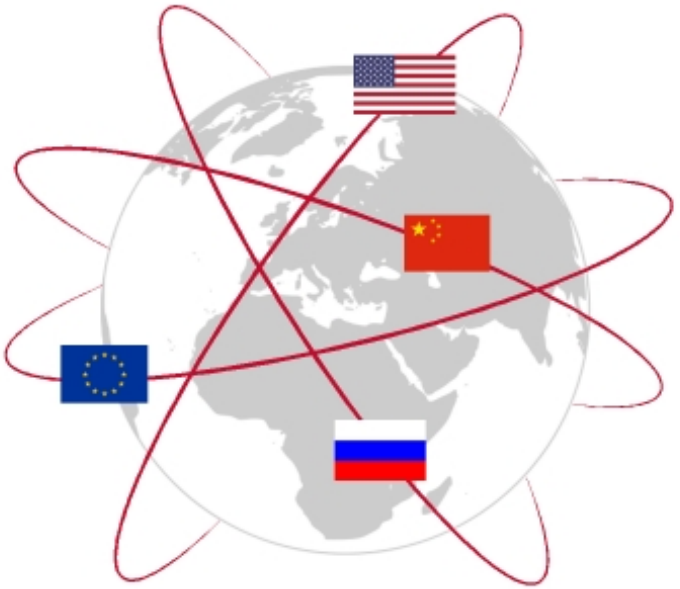
# 5.5. Réseaux privés

- *Orpheon*
- *Teria*
- *Sat info*
- *Omnistar...*

# 06 . Les différents GNSS

# 6.1. Les différents systèmes

- GPS
- Glonass
- Galileo
- Beidou
- QZSS
- IRNSS
- SBAS



- GPS

# 6.2. GPS, quelques dates

- GPS : Global Positioning System

- Appelé officiellement NAVSTAR (Navigation System by Timing And Ranging) est le système militaire américain de radio positionnement par satellite conçu et mis en service par la NGA (National Geospatial Intelligence Agency), service de l'US DoD (United States Department of Defense) ; il est géré par l'USAF (US Air Force). C'est le premier système global de positionnement par satellite opérationnel.

- Entre 1973 et 1978 : conception
- Entre 1978 et 1985 : phase pré-opérationnelle
- Phase d'opérationnabilité atteinte en décembre 1993.
- Système déclaré opérationnel en avril 1995 avec 28 satellites en orbites.
- Mai 2000 : désactivation de la dégradation volontaire SA (Selective Availability)
- 2005 : nouveaux satellites émettant un nouveau signal civil

Dernier lancement d'un satellite GPS : le 23 décembre 2018

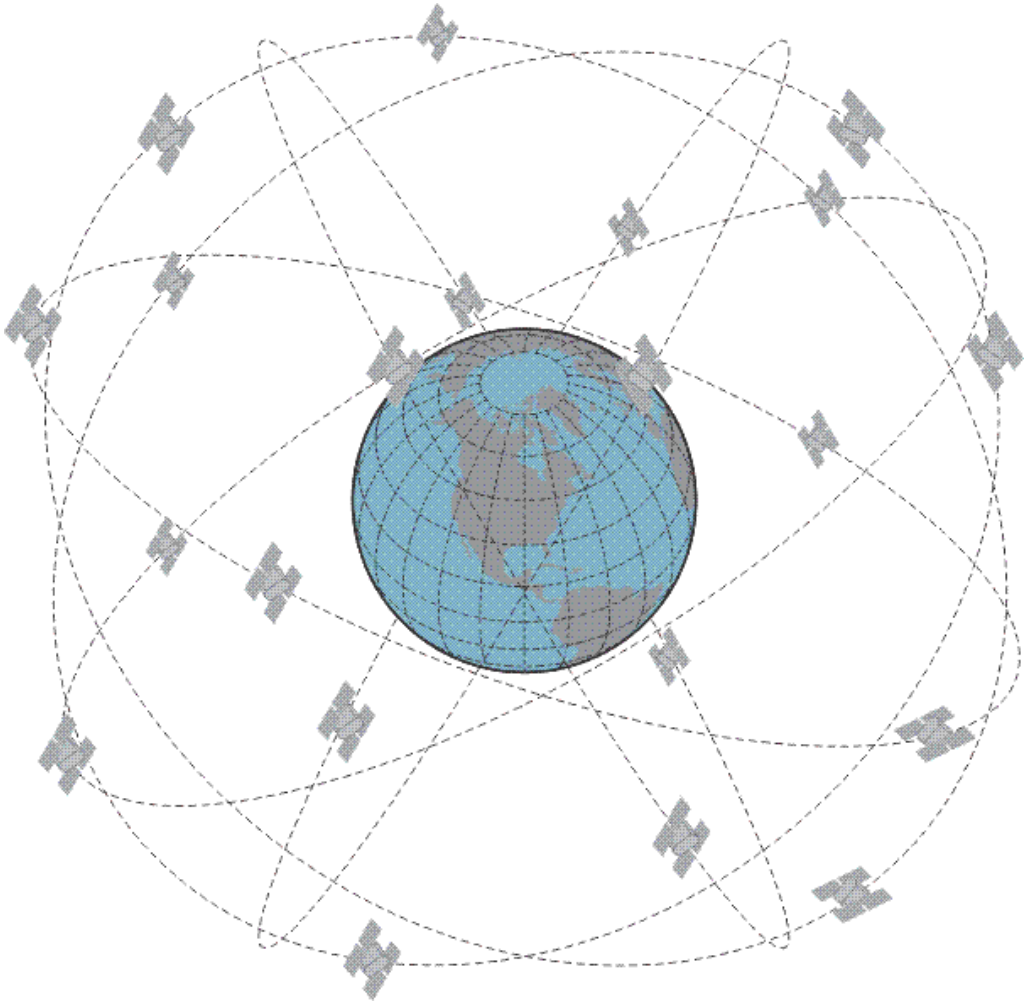
# 6.3. GPS, organisation

- **Interface spatiale**
  - La constellation GPS est composée de 31 satellites placés sur des orbites quasi-circulaires d'altitude de l'ordre de 20 200 km et de période légèrement inférieure à 12 h. Elle permet d'assurer la visibilité de 4 à 8 satellites avec une élévation supérieure à 15° en tout point du globe. On distingue plusieurs classes de satellites, en fonction de leur génération (Bloc I en 1978 au Bloc 3, 2014).
- **Interface de contrôle**
  - Elle permet de piloter et de surveiller la constellation GPS. Il est composé d'une quinzaine de stations réparties sur toute la planète.
- **Interface utilisateur**
  - Elle 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'événements.

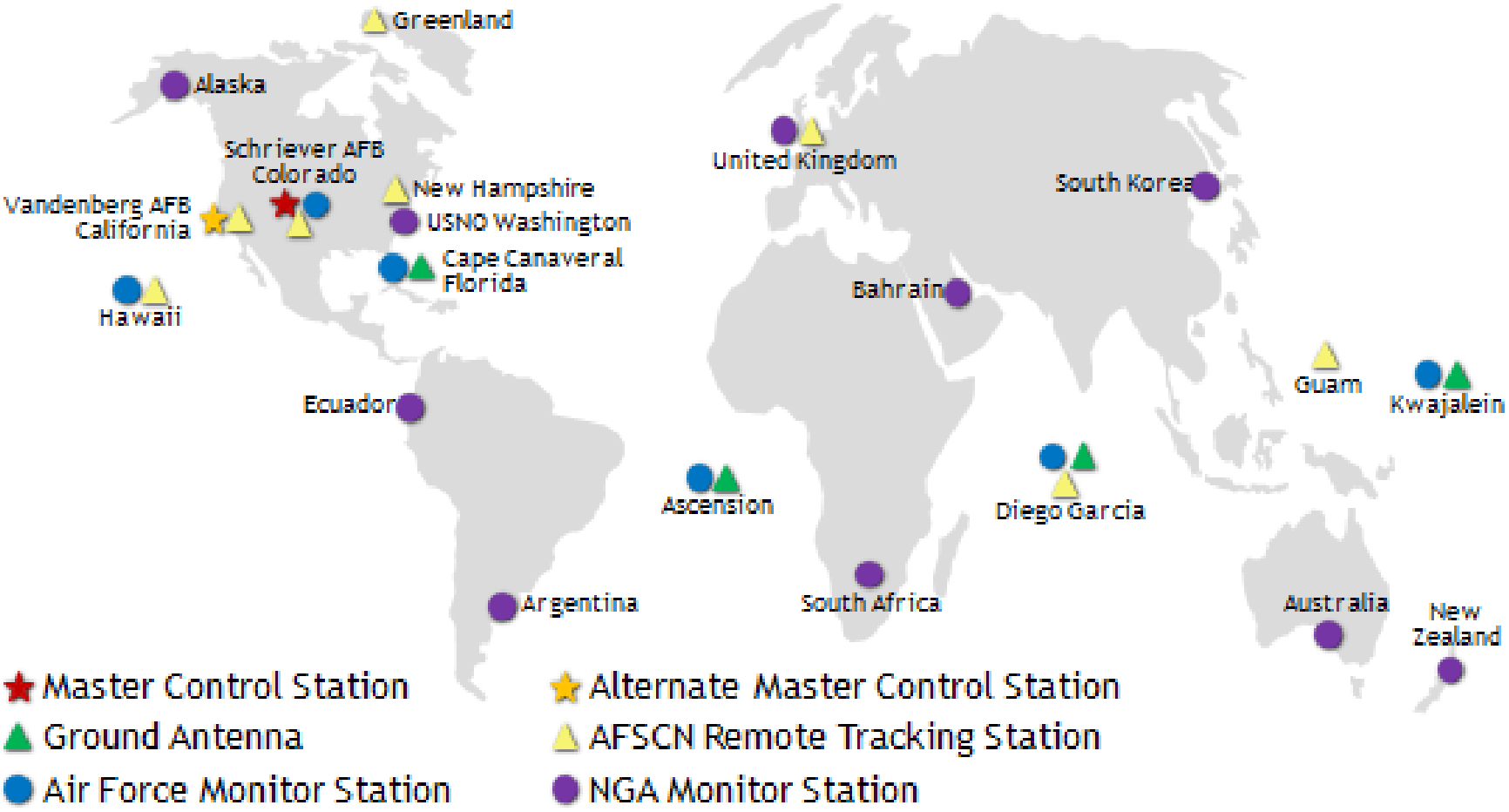
# 6.3. GPS, interface spatiale

- orbites :
  - quasi circulaires
  - de rayon 26 500 km
  - parcourues en environ 12 heures
  - contenues dans six plans inclinés de 55° par rapport à l'équateur.

# 6.3. GPS, interface spatiale



# 6.3. GPS, interface de contrôle



# 6.3. GPS, organisation

- **Interface utilisateur**

**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.

# 6.4. Signaux GPS

- **Ondes porteuses :**
  - L1 (1 575,42 MHz)
  - L2 (1 277,60 MHz).
  - L5 (1 176,45 MHz).
- **Code :**
  - Code civil (le C/A-code)
  - Code destiné aux militaires (le P(Y)-code)
  - Nouveau code civil L2C
  - Nouveau code militaire M-code
  - Nouveaux codes L5C et L1C
- **Message de navigation :**

  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, sera émis sur L1 avec le nouveau code L1C. Ces messages contiennent des données plus précises que le message de navigation standard.

# 6.5. Référentiels spatio-temporel

- **Système de référence :**
  - WGS-84 (World Geodetic System). Différentes réalisations de ce système se sont succédées pour améliorer son exactitude.
- **Le temps GPS :**
  - Echelle de temps continue, basée sur l'analyse des données des horloges atomiques. Elle est uniquement utilisée pour des besoins de synchronisation du système.
  - Elle est reliée à l'échelle de temps international UTC.

- Glonass

# 6.6. Glonass, quelques dates

- Glonass: GLObal'naya NAvigatsionnaya Sputnikovaya Sistema en russe romanisé ou GLObal NAvigation Satellite System en anglais

- **système de positionnement global par satellite développé par l'URSS durant la guerre froide et maintenu par la Russie depuis la chute du bloc soviétique. Tout comme GPS, ce système a été développé dans un cadre militaire.**

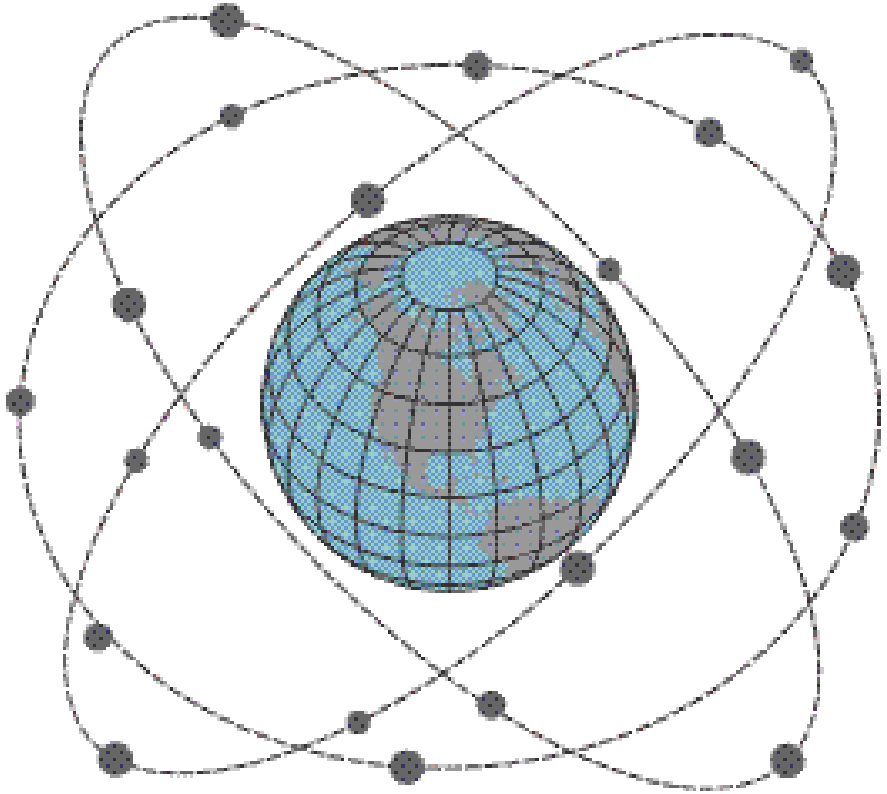
- 1976 : début du projet
- 1982 : premier satellite en orbite
- 1991 : Couverture globale atteinte avec 12 satellites.
- 1995 : mesures du code ouverte ouvertes aux civils.
- Novembre 1995 : Constellation complète avec 24 satellites en orbites.
  Chute du bloc soviétique
- Octobre 2000 : il ne reste plus que 6 satellites en orbite.
- 2001: réactivation du programme
- 2011 : système de nouveau opérationnel avec une constellation de 24 satellites

Dernier lancement d'un satellite Glonass: le 7 juin 2018

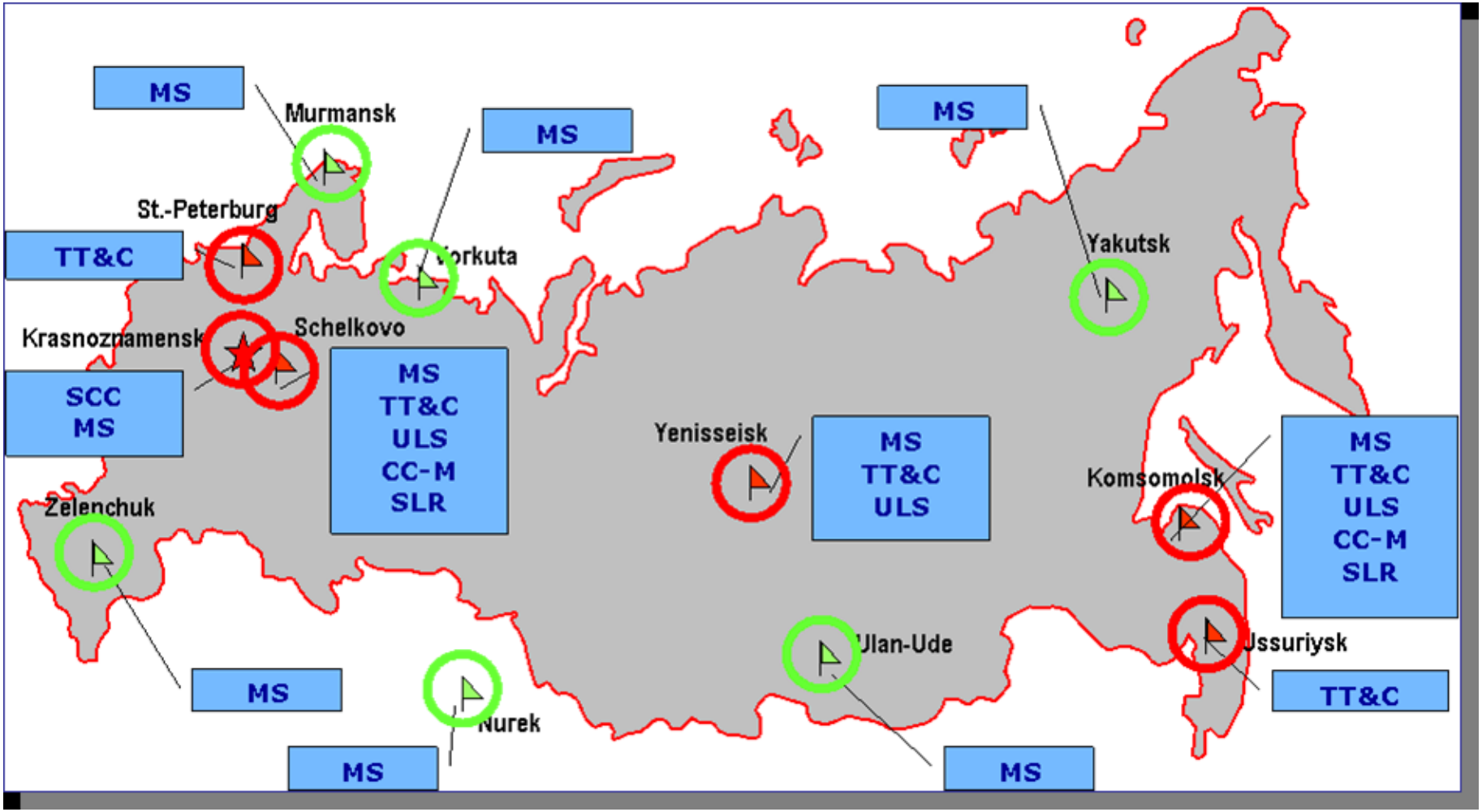
# 6.7. Glonass, organisation

- **Interface spatiale**
  - La constellation Glonass est composée de 27 satellites placés sur des orbites quasi-circulaires d'altitude de l'ordre de 19 000 km et de période légèrement inférieure à 12 h. Cette constellation permet d'assurer la visibilité d'au moins 5 satellites sur 99% de la surface de la Terre.
  - Différentes génération de satellites se sont succédé depuis 1982, avec les satellites Ouragan, puis Ouragan M, K1 et K2 (à partir de 2014).
- **Interface de contrôle**
  - La composante sol de Glonass est actuellement constituée d'une dizaine de stations situées principalement sur le territoire russe
- **Interface utilisateur**
  - Elle regroupe l'ensemble de tous les utilisateurs civils et militaires du système Glonass. Les utilisations principales sont le positionnement absolu ou relatif par le code et/ou par la phase et la datation précise d'événements.

# 6.7. Glonass, interface spatiale



# 6.7. Glonass, organisation




Interface de contrôle Glonass

IGN

# 6.7. Glonass, organisation

- **Interface utilisateur**

**Deux types de services 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 Glonass. C'est un service gratuit et anonyme.
- 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.

# 6.8. Signaux Glonass

- **Ondes porteuses :**
  - G1  (1 602,0 MHz)
  - G2  (1 246,0 MHz).
  - G3  (1 207,704 MHz).
- **Code :**
  - C/A-code
  - P-code.

- **Message de navigation :**
  - Message civil et militaire

# 6.9. Référentiels spatio-temporel

- **Système de référence :**
  - Le PZ-90 (Parametry Zemli - 1990) ou PE-90 (Parameters of the Earth – 1990).
  - L'ellipsoïde associé est l'ellipsoïde éponyme.
- **Le temps Glonass :**
  - Maintenu à partir de l'analyse d'un ensemble d'horloges atomiques.
  - Il est relié à l'UTC à une constante de 3 h près (décalage horaire entre Greenwich et Moscou) avec un écart inférieur à 1 ms.

- Galileo

# 6.10. Galileo, quelques dates

- Galileo est le futur système européen de navigation par satellite, lancé par l'UE (Union Européenne) et l'ESA (European Space Agency, l'agence spatiale européenne). L'objectif pour l'Europe est donc de disposer de son propre système global de navigation par satellite et donc d'être indépendant vis à vis des systèmes GPS et GLONASS.

- **Notons qu'une différence majeur de Galileo vis à vis de GPS et Glonass est son placement sous le contrôle d'autorités civiles et non militaires.**

- 1999 : début du projet
- 2001: premier développement
- 2005: premier satellite d'essai en orbite, GIOVE-A (Galileo In-Orbit Validation Element)
- 2008 : Un second satellite, GIOVE-B a été lancé
- Octobre 2011 : lancement des deux premiers satellites
- Octobre 2012 : lancement de deux nouveaux satellites
- Août 2014 : lancement de deux satellites, n'ont pas atteint l'orbite cible.

Dernier lancement : 25 juillet 2018

# 6.10. Galileo, quelques dates

| Satellite | Type | Autre appellation | Date lancement | Lanceur | Identifiant Cospar | Commentaire |
|---|---|---|---|---|---|---|
| GIOVE A | GIOVE | - | 28/12/2005 | Soyouz-Fregat | 2005-051A [archive] | décommissionné le 30 juin 2012 |
| GIOVE B | GIOVE | - | 26/04/2008 | Soyouz-Fregat | 2008-020A [archive] | décommissionné le 23 juillet 2012 |
| IOV PFM | IOV | Thijs | 21/10/2011 | Soyouz-Fregat | 2011-060A [archive] | |
| IOV FM2 | IOV | Natalia | | | 2011-060B [archive] | |
| IOV FM3 | IOV | David | 12/10/2012 | Soyouz-Fregat | 2012-055A [archive] | |
| IOV FM4 | IOV | Sif | | | 2012-055B [archive] | non disponible depuis le 27 mai 2014 |
| Galileo 5 (FOC-FM1) | FOC | Doresa | 22/08/2014 | Soyouz-Fregat | 2014-050A [archive] | Échec partiel, placés sur orbite alternative, réservés pour test uniquement |
| Galileo 6 (FOC-FM2) | FOC | Milena | | | 2014-050B [archive] | |
| Galileo 7 (FOC-FM3) | FOC | Adam | 27/03/2015 | Soyouz-Fregat | 2015-017A [archive] | |
| Galileo 8 (FOC-FM4) | FOC | Anastasia | | | 2015-017B [archive] | |
| Galileo 9 (FOC-FM5) | FOC | Alba | 11/09/2015 | Soyouz-Fregat | 2015-045A [archive] | |
| Galileo 10 (FOC-FM6) | FOC | Oriana | | | 2015-045B [archive] | |
| Galileo 11 (FOC-FM9) | FOC | Liene | 17/12/2015 | Soyouz-Fregat | 2015-079B [archive] | |
| Galileo 12 (FOC-FM8) | FOC | Andriana | | | 2015-079A [archive] | |

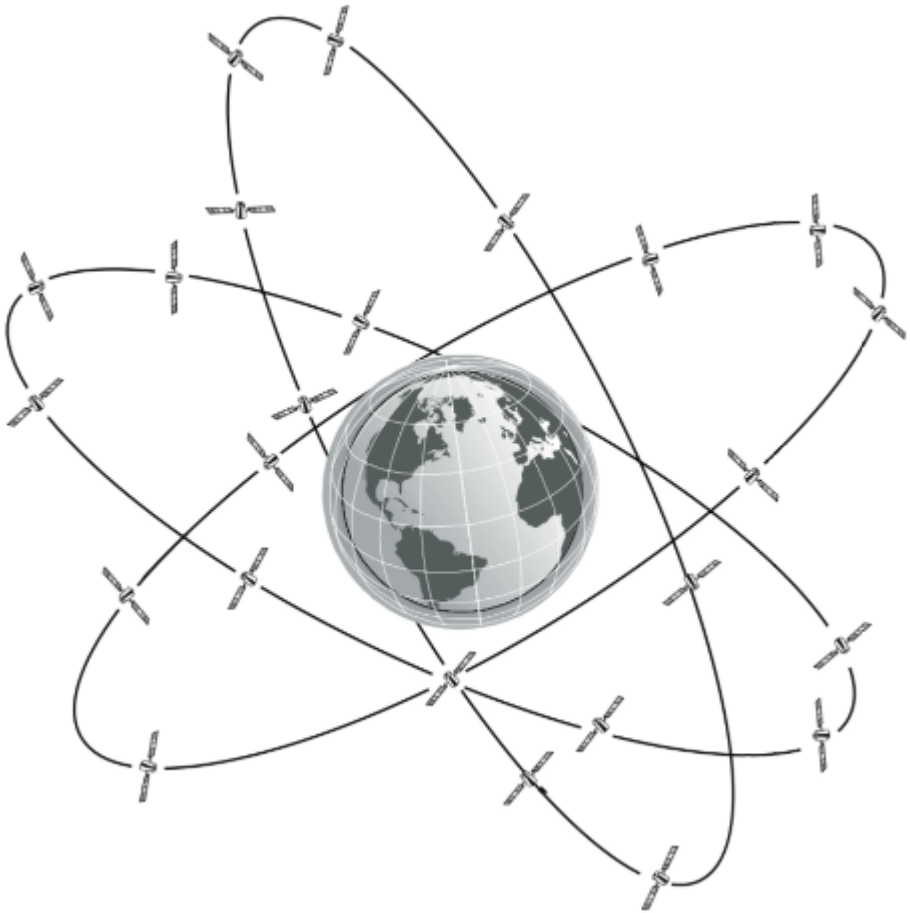
# 6.10. Galileo, quelques dates

| Satellite | Type | Autre appellation | Date lancement | Lanceur | Identifiant Cospar |
|---|---|---|---|---|---|
| Galileo 13 (FOC-FM10) | FOC | Danielè | 24/05/2016 | Soyouz-Fregat | 2016-030B [archive] |
| Galileo 14 (FOC-FM11) | FOC | Alizée | | | 2016-030A [archive] |
| Galileo 15 (FOC-FM7) | FOC | Antonianna | 17/11/2016[53] | Ariane 5-ES | 2016-069A [archive] |
| Galileo 16 (FOC-FM12) | FOC | Lisa | | | 2016-069B [archive] |
| Galileo 17 (FOC-FM13) | FOC | Kimberley | | | 2016-069C [archive] |
| Galileo 18 (FOC-FM14) | FOC | Tijmen | | | 2016-069D [archive] |
| Galileo 19 (FOC-FM15) | FOC | Nicole | 12/12/2017 | Ariane 5-ES | 2017-079A [archive] |
| Galileo 20 (FOC-FM16) | FOC | Zofia | | | 2017-079B [archive] |
| Galileo 21 (FOC-FM17) | FOC | Alexandre | | | 2017-079C [archive] |
| Galileo 22 (FOC-FM18) | FOC | Irina | | | 2017-079D [archive] |
| Galileo 23 (FOC-FM19) | FOC | Tara | 25/07/2018 | Ariane 5-ES | 2018-060C[54] |
| Galileo 24 (FOC-FM20) | FOC | Samuel | | | 2018-060D |
| Galileo 25 (FOC-FM21) | FOC | Anna | | | 2018-060A |
| Galileo 26 (FOC-FM22) | FOC | Ellen | | | 2018-060B |
| Futurs lancements | | | | | |
| Seconde Génération | | | | | |
| Galileo 27 (FOC-FM23) | FOC | Patrick | 2020 | | |
| et 7 également commissionnés en avril 2017 | FOC | *n/a* | *non connue* | | |
| 4 autres commandés en octobre 2017 | FOC | *n/a* | *non connue* | | |

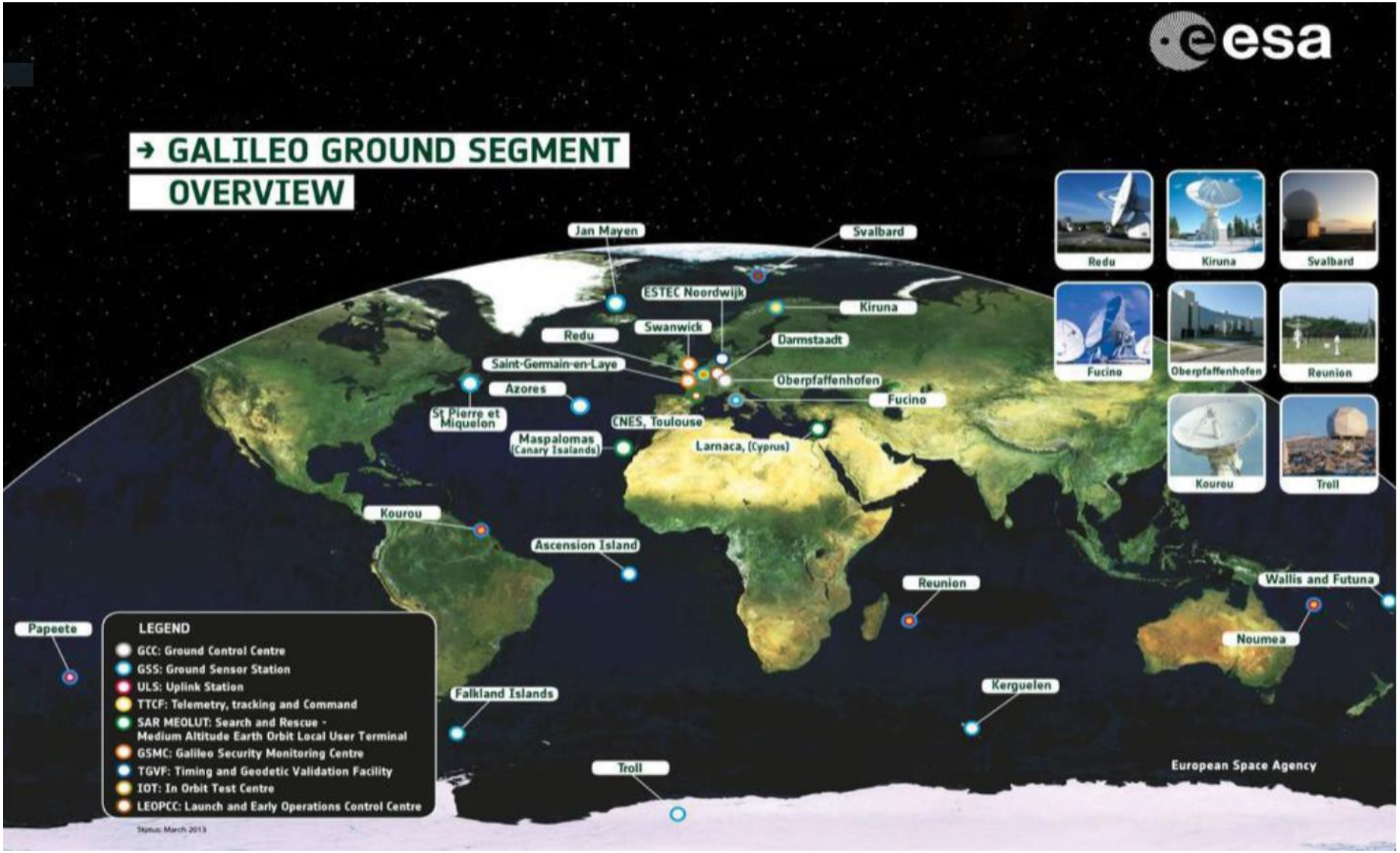
# 6.11. Galileo, organisation

- **Interface spatiale**
  - La constellation Galileo est composée de 30 satellites placés sur des orbites quasi-circulaires d'altitude de l'ordre de 23 000 km et de période légèrement supérieure à 14 h.
- **Interface de contrôle**
  - Il sera composé d'une cinquantaine de stations réparties sur toute la planète.
- **Interface utilisateur**
  - 5 niveaux de services sont 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 Service) : en échange d'une redevance, il offrira de nombreux services à valeur ajoutée (garantie du service, intégrité et continuité du signal, données de navigation métrique).
    - Le service de sûreté de la vie, SoL (Safety-of-Life) : il délivrera un service sécurisé et intègre pour des 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.

# 6.12. Interface spatiale



# 6.12. Interface de contrôle



# 6.12. Signaux Galileo

- **Ondes porteuses :**
  - E1 (1 575,42 MHz)
  - E5
    - E5a (1176,45 MHz)
    - E5b (1201,5 MHz)
  - E6 (1278,75 MHz)
- **Code :**

  Galileo propose un grand nombre de codes de positionnement en raison de la variété des services existants (cf. section précédente).
- **Message de navigation :**

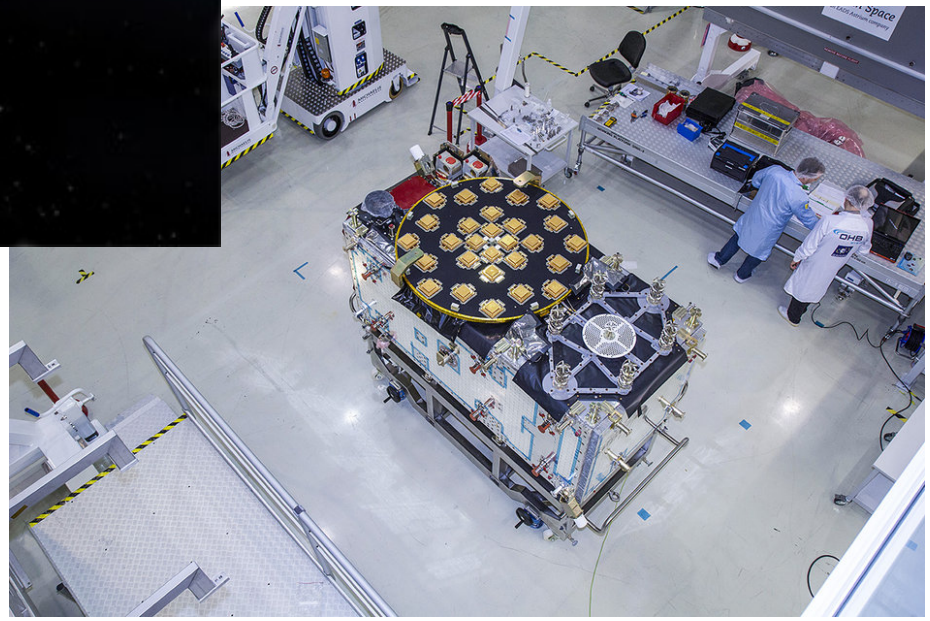
  On distingue 4 types de message de navigation :
  - F/NAV : le message de navigation d'accès libre, contenant toutes les informations nécessaires au positionnement. Il faudra 20 min pour disposer des informations de l'ensemble de la constellation.
  - I/NAV : le message d'intégrité, assurant la fiabilité du système. Il contient également les informations nécessaires au positionnement.
  - C/NAV : le message commercial, contenant les corrections nécessaires à un positionnement sub-métrique.
  - G/NAV : le message réglementé, contenant les informations d'intégrité, de positionnement ainsi que des informations actuellement peu documentées, relatives au positionnement via le service public réglementé.

# 6.13. Référentiels spatio-temporel

- **Système de référence :**
  - Le GTRF (Galileo Terrestrial Reference Frame).
  - 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 :**
  - Echelle de temps continue calée sur le TAI.
  - Les écarts de cette échelle de temps avec les temps TAI et UTC sont transmis dans le message de navigation.

# 6.13. Satellites Galileo



- Beidou

# 6.14. Beidou, quelques dates

- Beidou, appelé officiellement BNSS (pour Beidou Navigation Satellite System) et appelé anciennement COMPASS, est le GNSS actuellement développé par la Chine depuis le milieu des année 1980. C'est l'évolution du système régional Beidou-1 mis en place depuis le début des années 2000. Deux types de services seront disponibles : l'un civil, l'autre militaire (de précision et de fiabilité plus intéressantes).

- 1980 : étude de faisabilité
- 2000 : premiers satellites en orbite
- 2012 : première exploitation des mesures sur le territoire chinois (système initialement régional).
- 2018 : 16 satellites mis en orbite.

Dernier lancement : 01 novembre 2018

# 6.15. Beidou, organisation

- **Interface spatiale**
  - Elle devrait être composée de 35 satellites possédant différents types d'orbite (géostationnaires, géosynchrones et "GNSS").
- **Interface de contrôle**
  - Elle est composée de 2 stations principales, 2 stations de télétransmission et 30 stations de surveillance.
- **Interface 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 10 m).

# 6.16. Signaux Beidou

- **Ondes porteuses :**

  Le système utilise 3 ondes porteuses (B1 à 1 561.098 MHz, B2 à 1 207,14 MHz et B3 à 1 268,52 MHz). Une autre porteuse, voisine de B1, devrait permettre une inter-opérabilité avec GPS, Glonass et Galileo.

- **Code :**

  Trois codes modulent les différentes porteuses du système.

- **Message de navigation :**

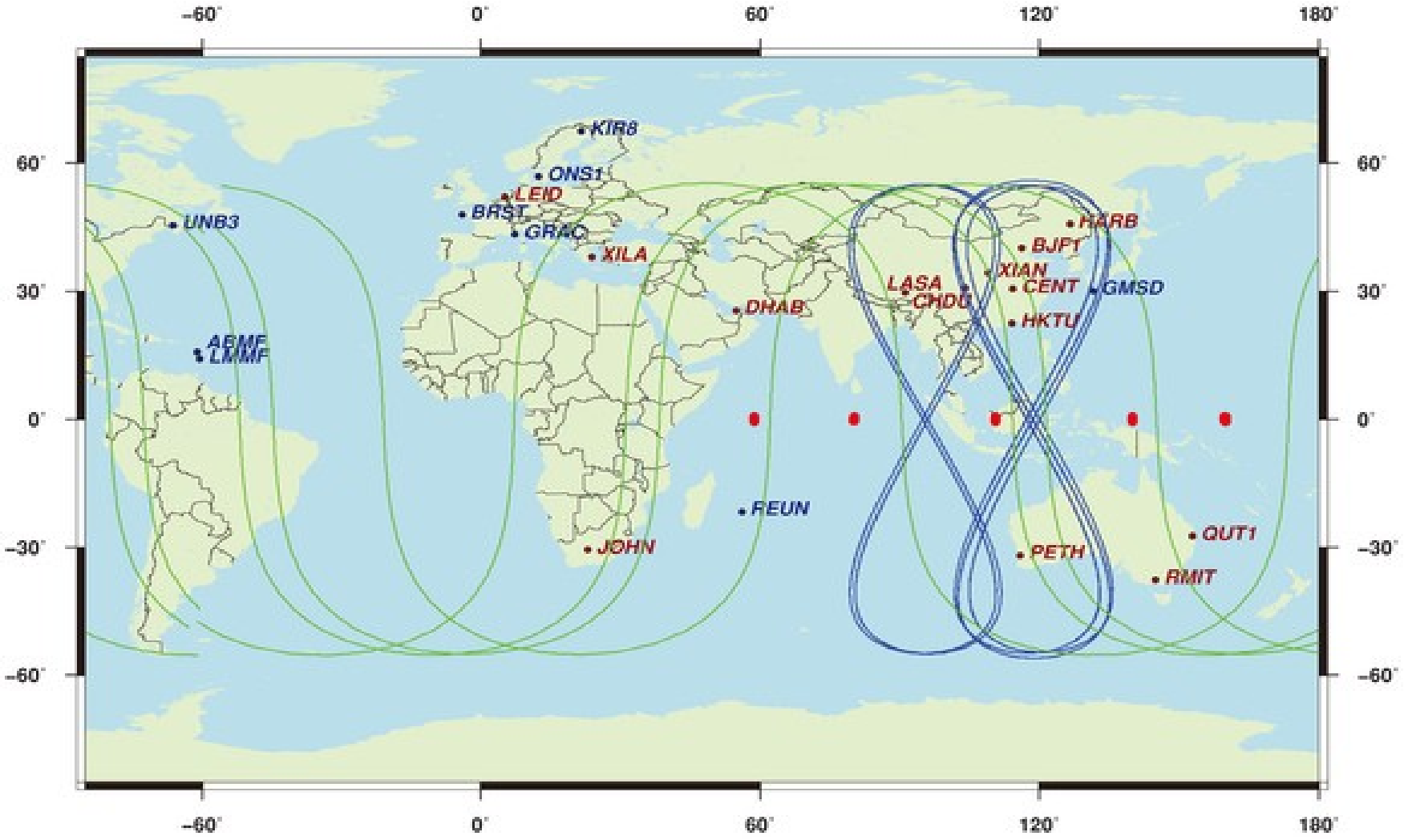
  Actuellement, deux types de message de navigation sont documentés :

  - D1 : C'est le message contenant les informations standard nécessaires au positionnement. D'une taille de 36 000 bits et émis sur 12 min.
  - D2 : ce message comporte les informations standards mais aussi des informations supplémentaires : intégrité du signal, corrections différentielles, grille de correction ionosphérique et troposphérique. Il est émis sur 6 min.

# 6.17. Référentiels spatio-temporel

- **Système de référence :**
  - China Geodetic Coordinate System 2000 (CGCS2000)
  - Cohérent avec l'ITRF97 au niveau centimétrique
- **Le temps Beidou :**
  - Le BDT (Beidou Time System) est basé sur le TAI

# 6.18. Constellation Beidou



# 6.18. Constellation Beidou

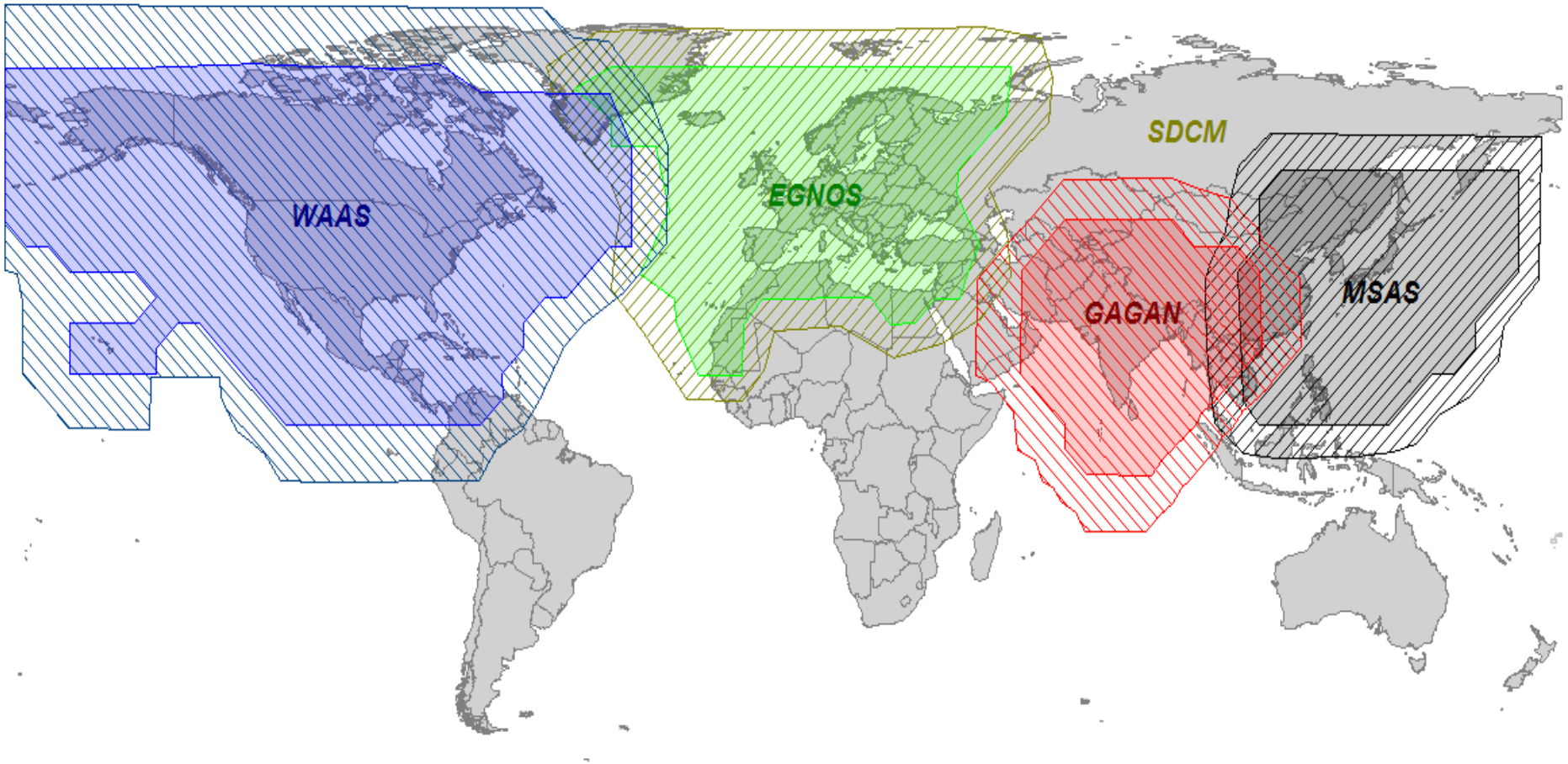
- **Aujourd'hui :**
  - 36 satellites opérationnels
    - 5 géostationnaires
    - 9 géosynchrones
    - 22 orbites terrestres

- SBAS

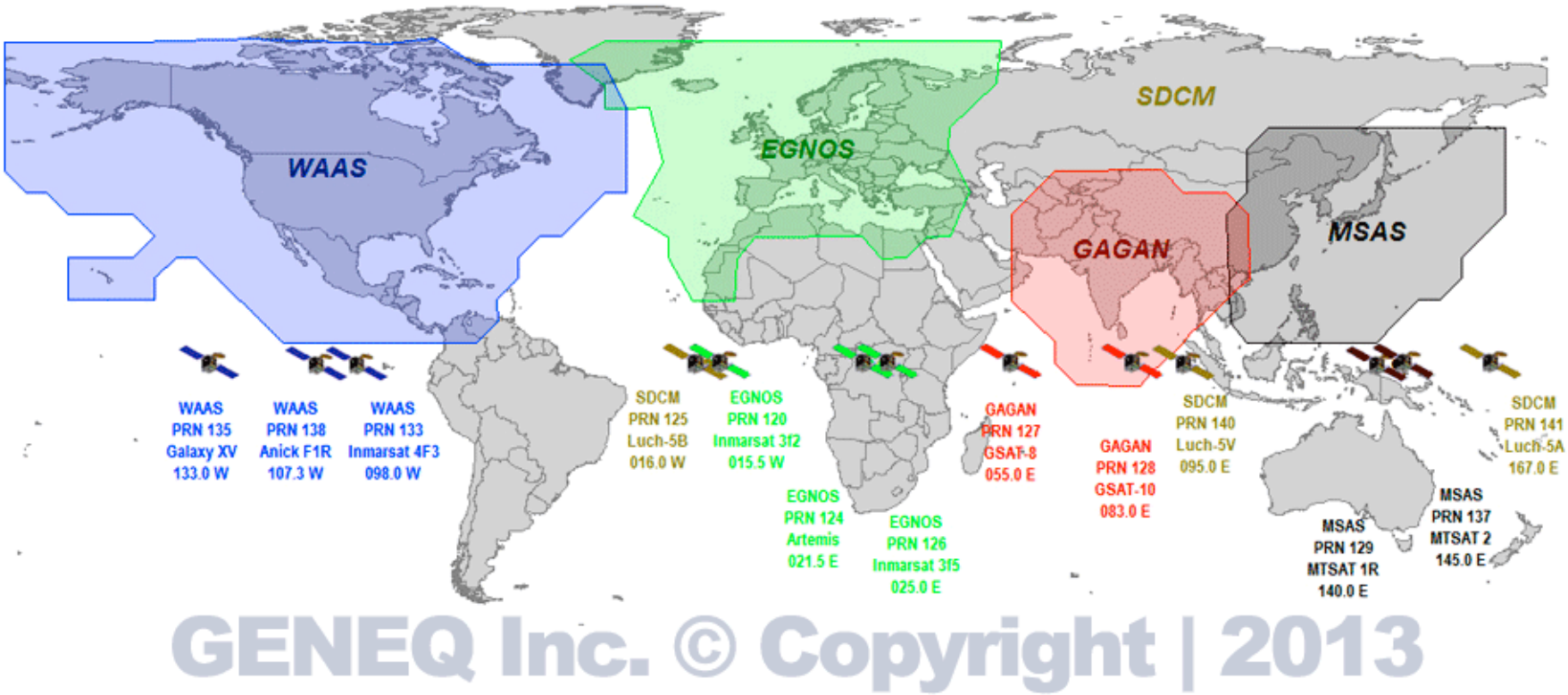
# 6.19. SBAS, définition

- SBAS pour *Satellite Based Augmentation System*
- Un système d'augmentation de performance par satellite permet d'améliorer la navigation GNSS (performance, disponibilité et fiabilité) via l'utilisation d'informations complémentaires aux observations classiques.
- Ces systèmes proposent en pratique un service de WADGNSS présenté précédemment. Ils reposent sur un réseau de stations GNSS aux sol. Des corrections sont dérivées de ces observations, envoyées à un satellite composant le système d'augmentation qui les transmets à des utilisateurs sol.

# 6.20. Convertures des SBAS



# 6.20. Couvertures des SBAS




GENEQ Inc. © Copyright | 2013

# 6.21. Constellation SBAS

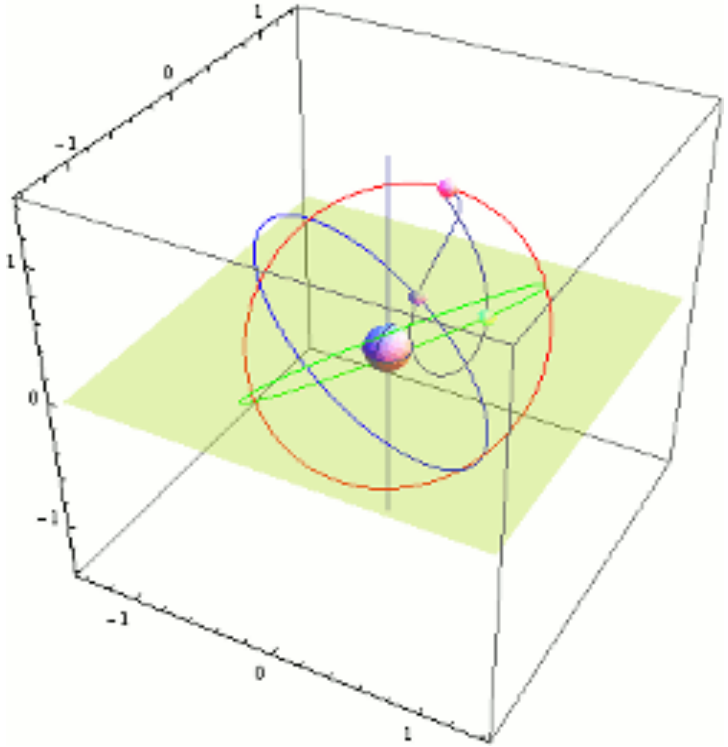
| SBAS Constellation | PRN Number | NMEA Number | Satellite Name | Longitud |
|---|---|---|---|---|
| WAAS | 133 | 46 | Immarsat 4F3 | 98.0° W |
| WAAS | 135 | 48 | Galaxy XV | 133.0° W |
| WAAS | 138 | 51 | Anik F1R (Telesat) | 107.3° W |
| EGNOS | 120 | 33 | Inmarsat 3f2 (AOR-E) | 15.5° W |
| EGNOS | 124 | 37 | ESA (Artemis)* | 21.5° E |
| EGNOS | 126 | 39 | Immarsat 3F5 (IND-W) | 25.0° E |
| MSAS | 129 | 42 | MTSAT 1R | 140.0° E |
| MSAS | 137 | 50 | MTSAT 2 | 145.0° E |
| GAGAN | 127 | 40 | GSAT-8 | 55.0° E |
| GAGAN | 128 | 41 | GSAT-10 | 83.0° E |
| SDCM | 125 | 38 | Luch-5B * * | 16.0° W** |
| SDCM | 140 | 53 | Luch-5V * * | 95.0° E** |
| SDCM | 141 | 54 | Luch-5A * * | 167.0° E |

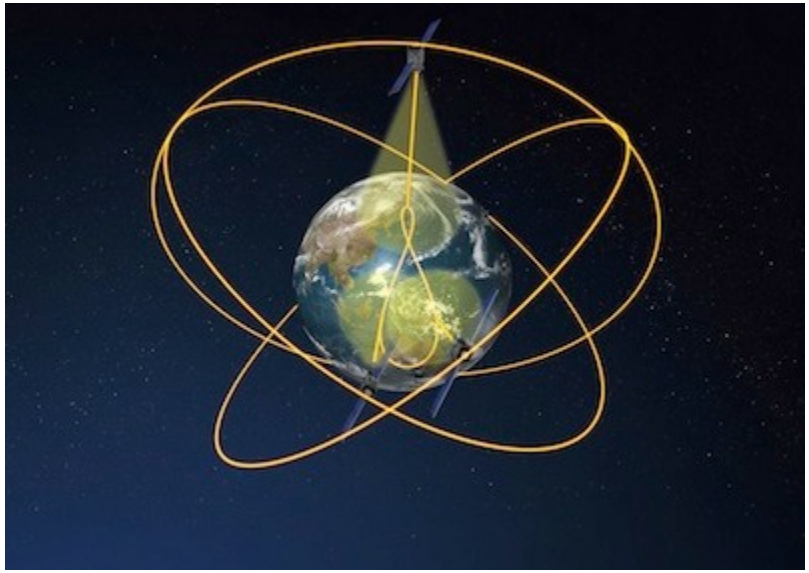
- Système régionaux de positionnement

# 6.22. QZSS

- **QZSS (Quazi-Zenith Satellite System) :**
  - le système sera composé de 3 satellites géosynchrone, dont les orbites ont été fixés de manière à disposer en continu de l'un d'entre eux proche du zénith sur le territoire japonais [JAXA, 2013]. Les fréquences utilisées sont en parti les mêmes que celles du GPS (L1, L2 et L5, mais des codes supplémentaires modulent ces différentes porteuses) avec des possibilités de WADGNSS [Rodríguez, 2008]. Le premier satellite de la constellation (Michibiki ) est actuellement en orbite (lancé en septembre 2010). L'interopérabilité et la compatibilité avec les GNSS sont assurées avec le partage de certaines bandes de fréquence identiques [ICG, 2010]. L'opérationabilité du système est envisagée à l'horizon 2017.

# 6.22. QZSS

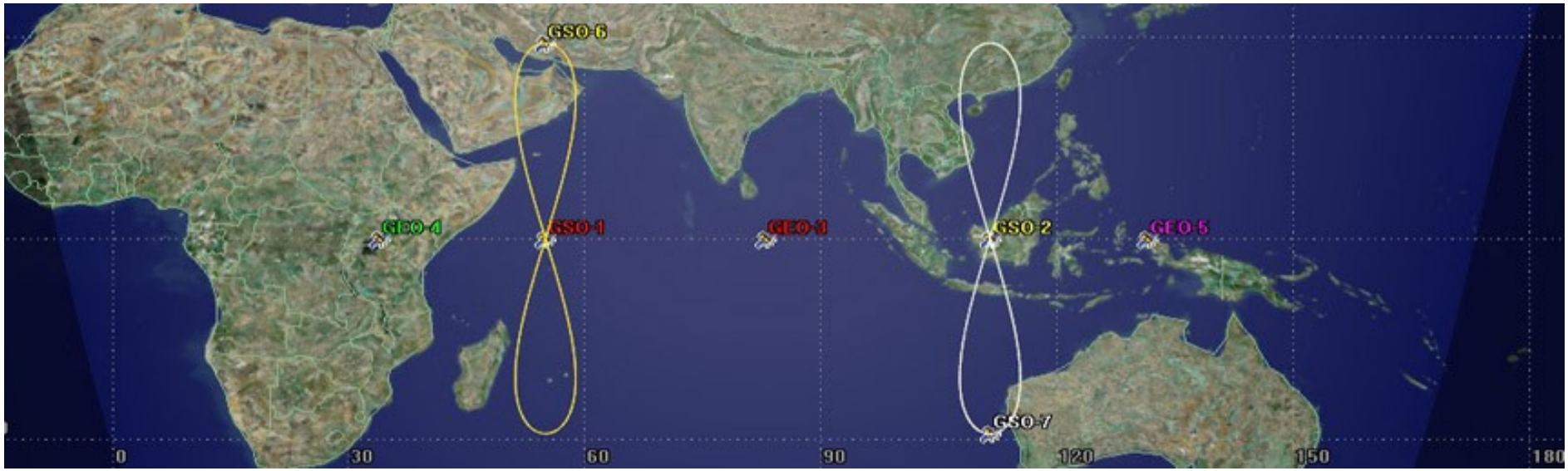


# 6.23. IRNSS

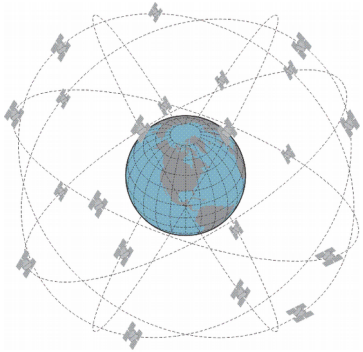
- **IRNSS (Indian Regional Navigation Satellite System)**
  - 7 satellites (3 satellites géostationnaires, 4 satellites géosynchrones). Deux porteuses seront utilisées pour le positionnement (l'une d'entre elle correspond à la porteuse L5 du GPS). Le premier satellite de la constellation a été lancé en juillet 2013 ; Aucun accord finalisé d'interopérabilité et la compatibilité avec les autres GNSS n'existe pour l'instant.

# 6.23. IRNSS



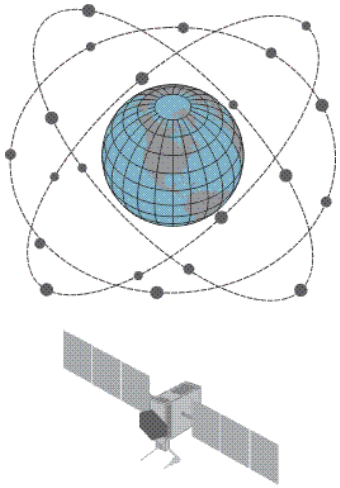
# 07 . Comparaisons des différents GNSS

# 7.1. Orbites GNSS



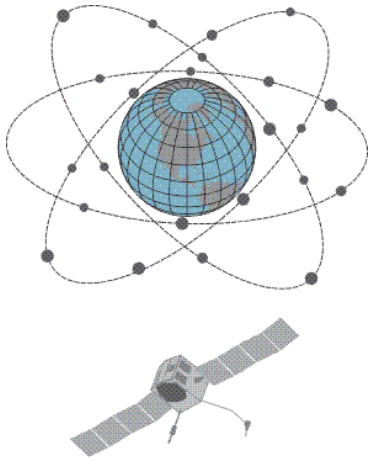
**GPS**

- 6 Orbital planes
- 24 Satellites + Spare
- 55° Inclination Angle
- Altitude 20,200km



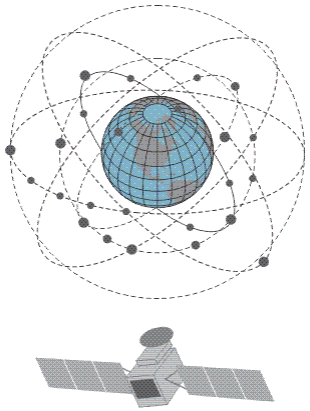
**GLONASS**

3 Orbital planes
21 Satellites + 3 Spares
64.8° Inclination Angle
Altitude 19,100km



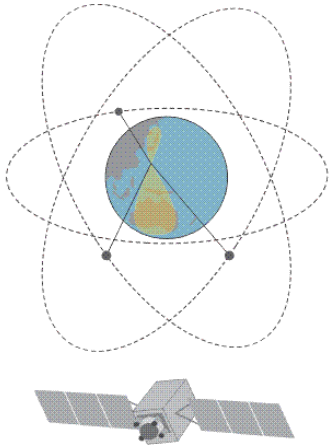
**Galileo**

3 Orbital planes
27 Satellites + 3 Spares
56° Inclination Angle
Altitude 23,222km



**BeiDou**

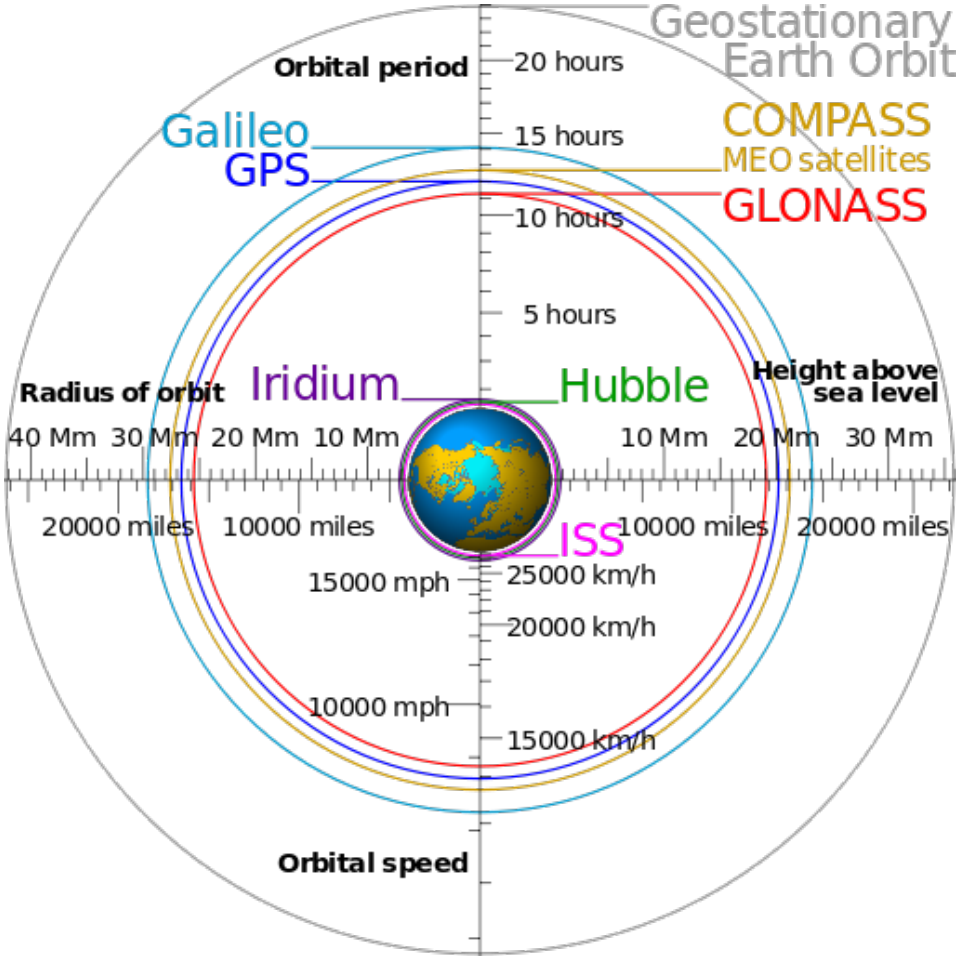
6 Orbital planes
Satellites + 5 GEO + 27 MEO + 3 IGSO
55° Inclination Angle
Altitude 38,300 km, 21,500 km



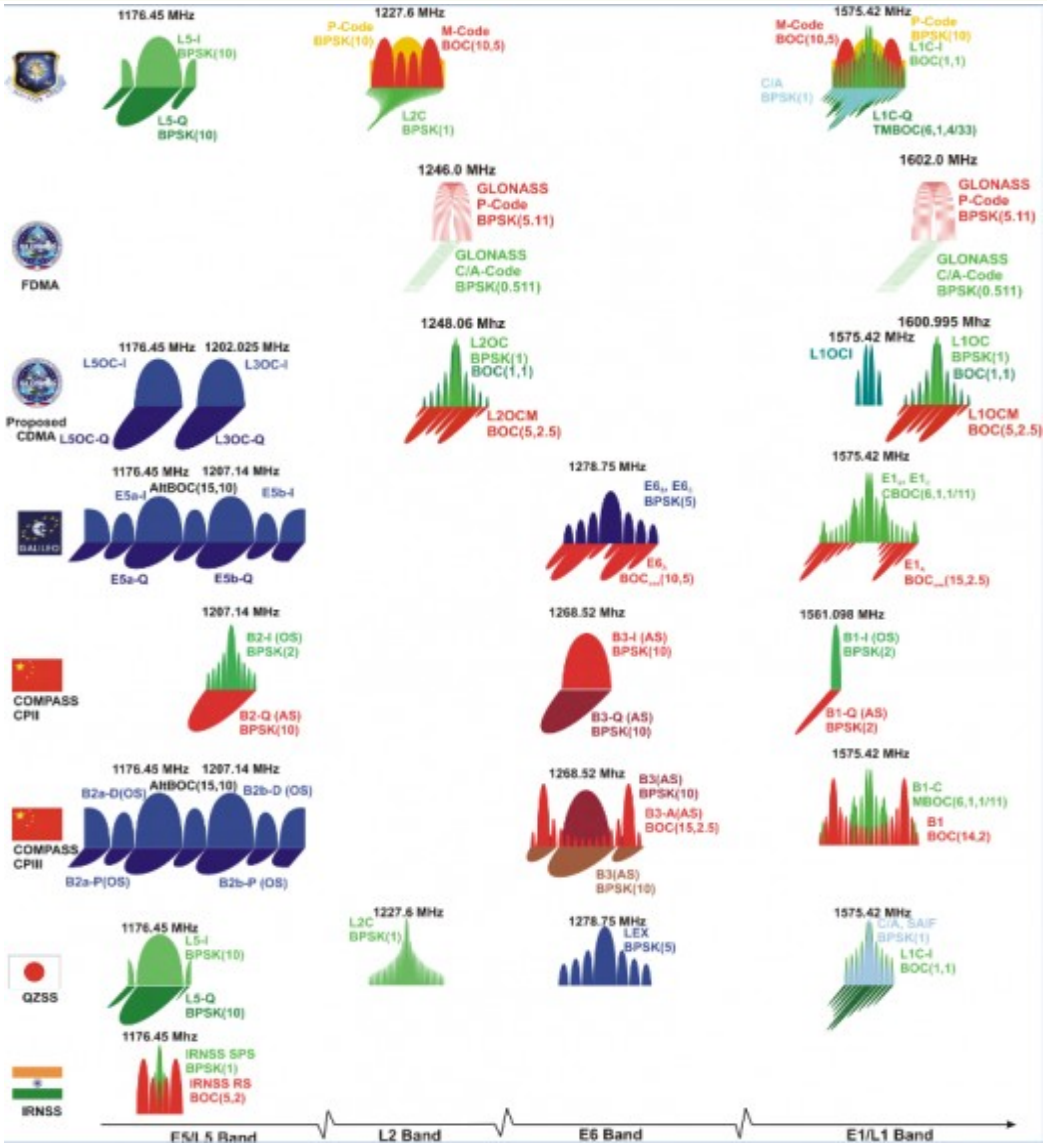
**Quasi-Zenith Satellite System (QZSS)**

3 Orbital Planes
3 Satellites
~40° Inclination Angle
Altitude 32,000 km to 40,000 km

# 7.1. Orbites GNSS

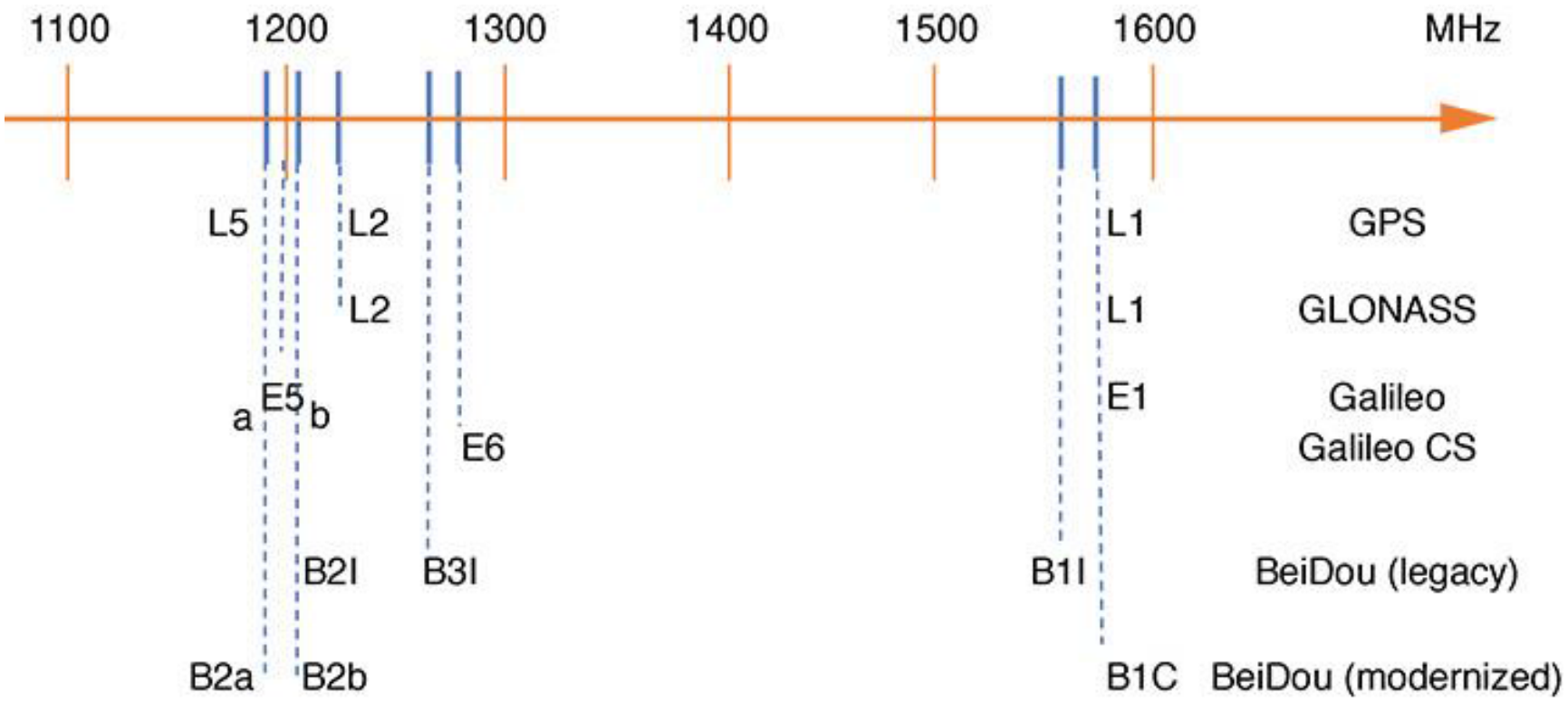


# 7.2. Signaux GNSS



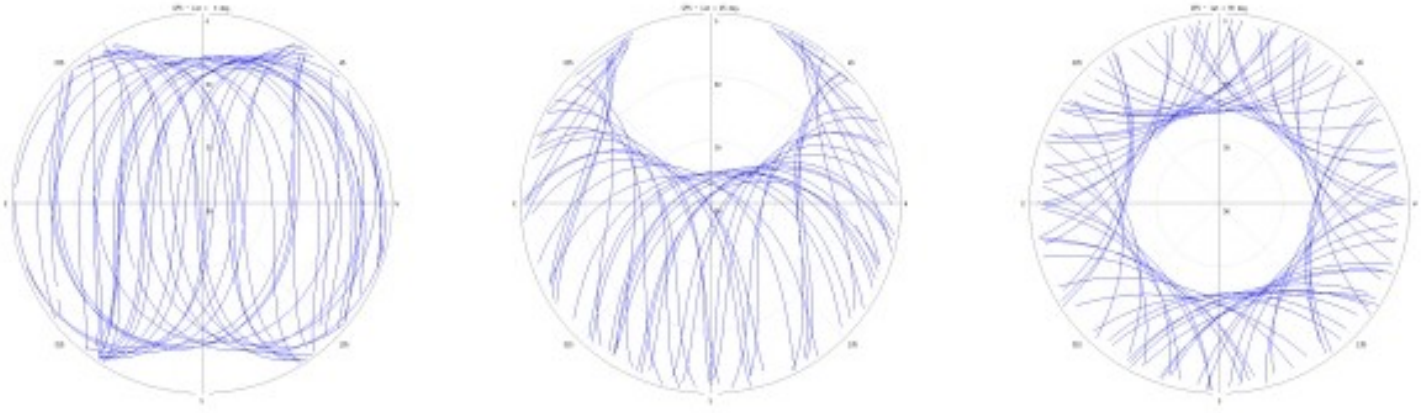

*source : [ESA Navipedia, Stephan Walner]*

# 7.2. Signaux GNSS

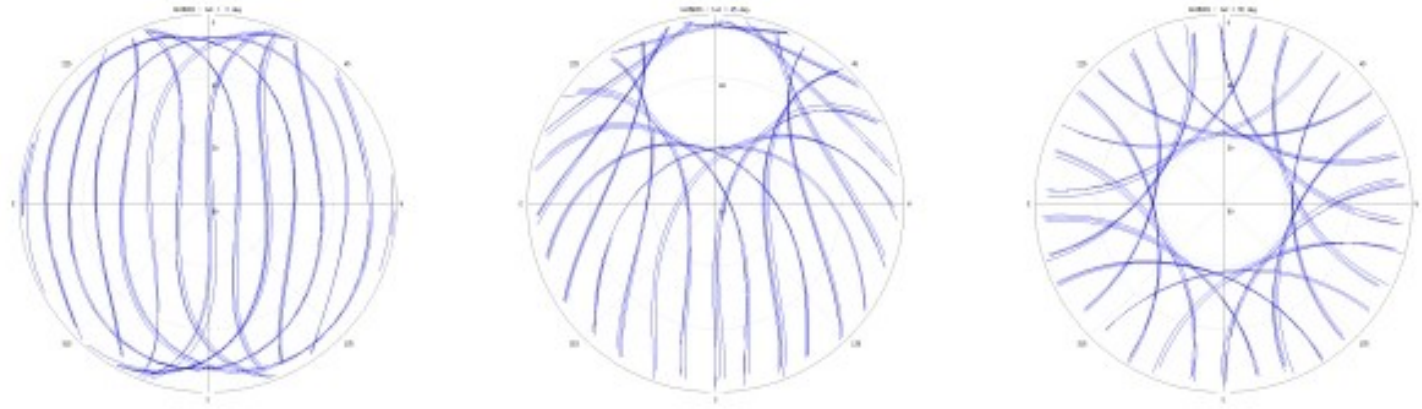



*source : [CNES]*

# 7.3. Couverture GPS/Glonass



Couverture GPS



Couverture Glonass

# 7.4. Liens utiles

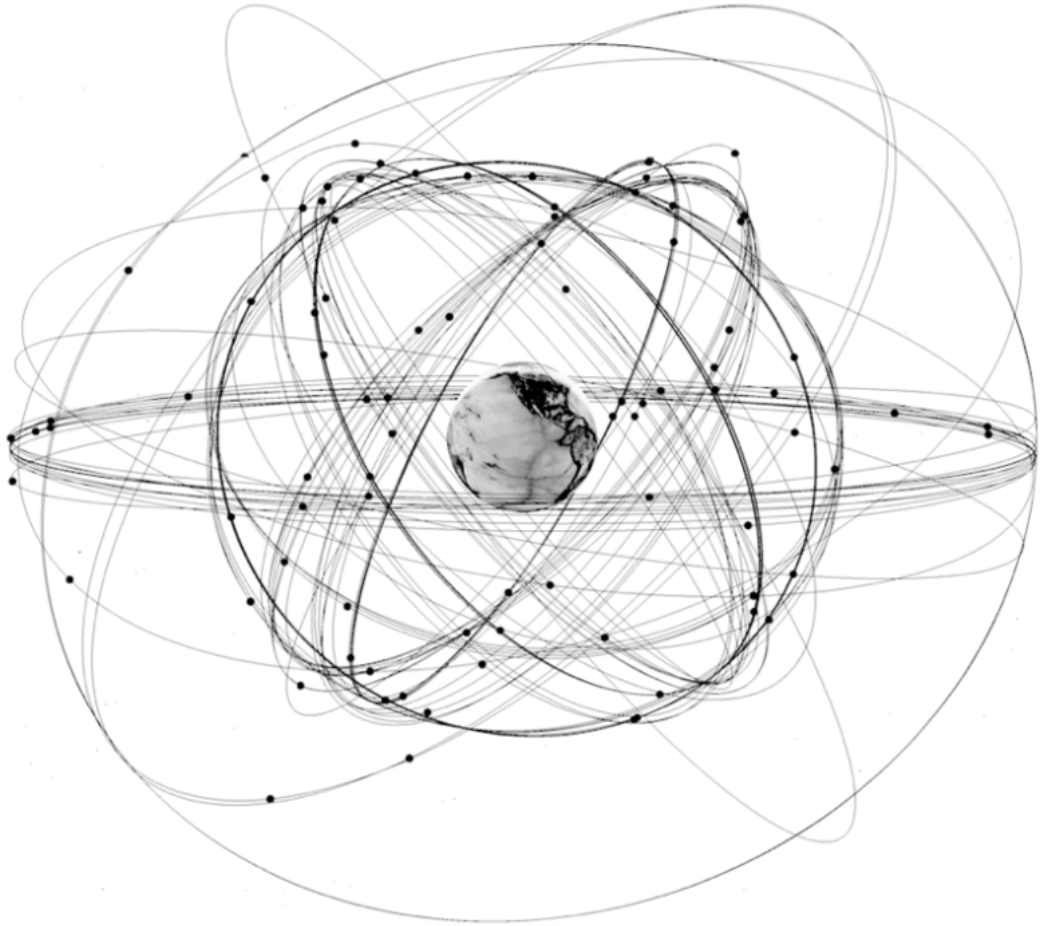
- **Liste des satellites en fonctionnement :**

- **http://gpsworld.com/the-almanac/**
- **http://qzss.go.jp/en/technical/satellites/index.html**
- **https://www.gnssplanning.com/**

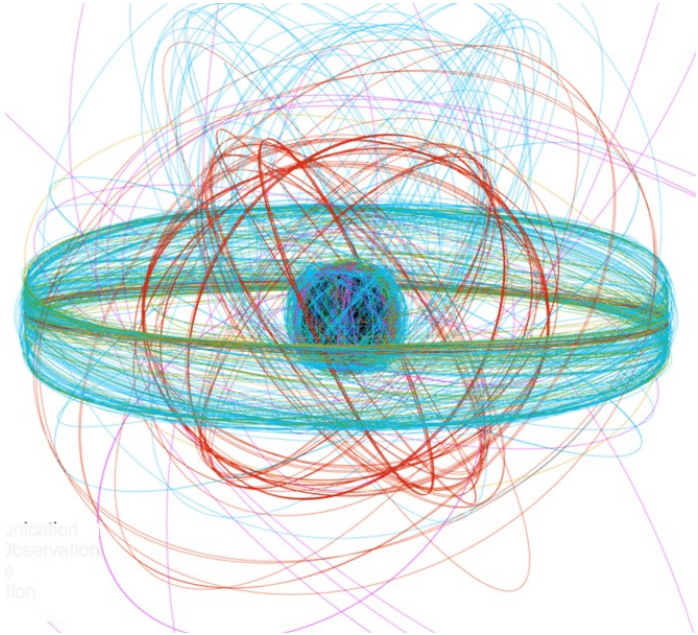
**Aujourd'hui :**

**<u>127 satellites en orbites :</u>**

- **31/32 GPS**
- **24 Glonass**
- **22/24 Galileo**
- **36 Beidou**
- **4 QZSS**
- **7 IRNSS**



# Merci pour votre attention.



## Références


- Bosser, P. (2013). GNSS : Systèmes de Positionnement par satellite. Notes de cours -
- Pieplu J-C. (2006) GPS et Galileo, systèmes de navigation par satellites
- e-education.psu.edu/geog862/