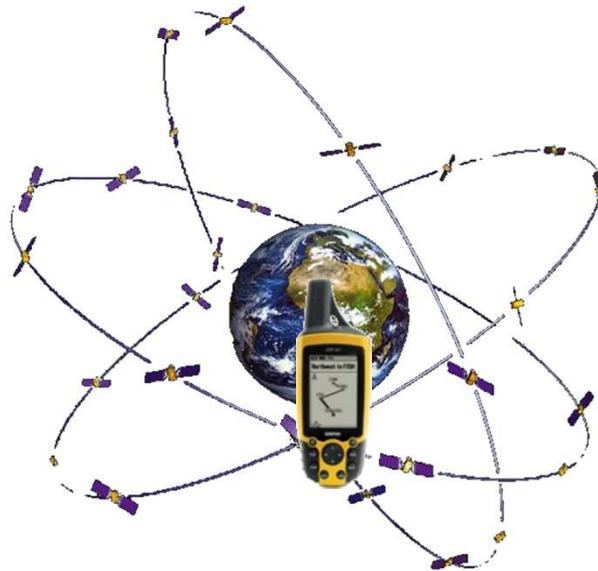


# LOCALISATION PAR SATELLITES : LE SYSTEME GPS





## Plan du cours

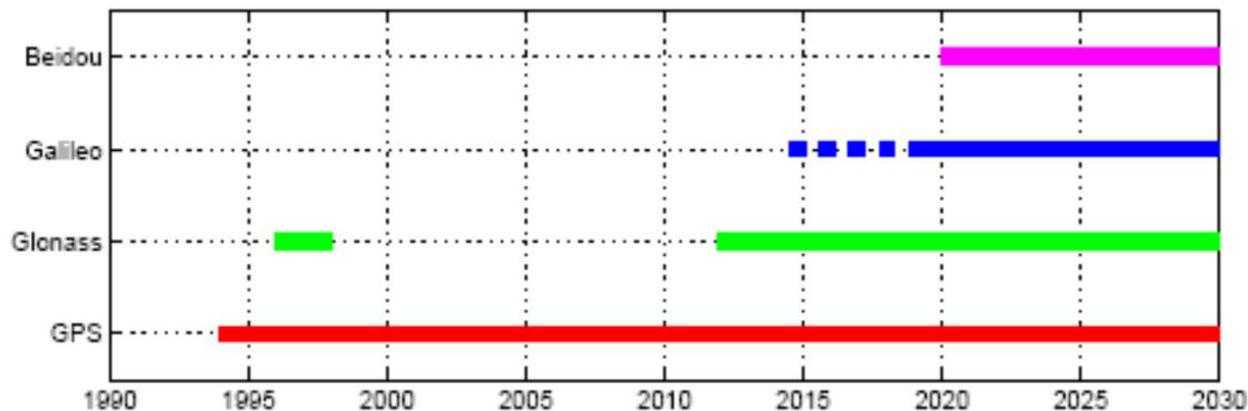
1. Généralités
2. Principes de positionnement
3. Signaux et mesure
4. Le GPS NAVSTAR
5. Positionnement par GPS
6. Les sources d'erreur
7. Sur le terrain



# 1. Généralités – les systèmes de positionnement par satellite

- Définition : On appelle **GNSS** (Global Navigation Satellite System) les systèmes de positionnement basés sur des signaux émis par des satellites en orbite autour de la Terre et fournissant une couverture mondiale.
- Objectif : fournir à un récepteur sa **position**, sa **vitesse** de déplacement et **l'heure**. Ce positionnement est réalisé de manière rapide, avec une précision d'une dizaine de mètres, n'importe quand, n'importe où sur la Terre, quelle que soit la météo et à faible coût.
- A un GNSS donné est associé
  - ✓ un **système de référence** et une **ellipsoïde de référence**, permettant de décrire un point quelconque de l'espace selon ses coordonnées géocentriques et/ou géographiques
  - ✓ une **échelle de temps**, permettant de synchroniser 2 horloges différentes (par exemple l'émetteur et le récepteur).

- Il existe actuellement trois services mondiaux de positionnement par satellite:
  - Le GPS (Global Positioning System ou système de positionnement par satellite), dispositif américain mis en service depuis 1978 et graduellement amélioré. Jusqu'en 2007, seul GNSS opérationnel. **Le système de référence associé au GPS est le WGS-84 (World Geodetic System).**
  - GLONASS, dispositif militaire russe mis en service en 1982.
  - GALILEO, dispositif civil européen mis en service en 2011, et devant être 100% opérationnel en 2019.



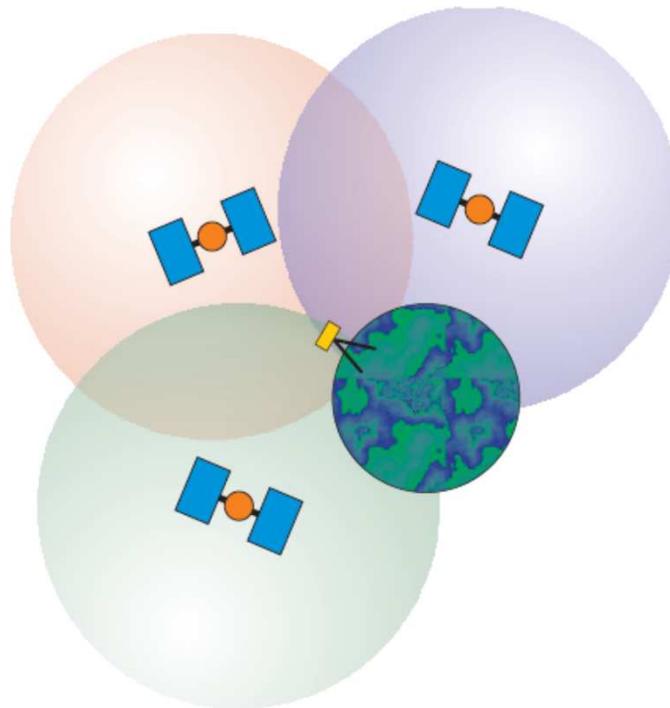
Phase d'opérationabilité des différents GNSS existants ou en projet (source : Wikipedia, 2012; Hofmann-Wellenhof et al., 2008)



## 2. Principe de positionnement

- Le fonctionnement des GNSS repose sur la mesure du temps de propagation du signal électromagnétique (micro-ondes) émis par un satellite pour arriver au récepteur. La mesure du temps de propagation du signal provenant de plusieurs satellites permet par intersection de déterminer la position du récepteur.
- Connaissant la vitesse de propagation de l'onde  $c$  (vitesse de la lumière), on peut calculer la distance  $d$  qui sépare le satellite du récepteur en connaissant la durée de propagation de l'onde  $\Delta t$  que l'onde a mis pour parcourir le trajet ( $d = c \cdot \Delta t$ ).
- La mesure précise de  $\Delta t$  est primordiale. Une erreur de  $10^{-6}$  s engendre une erreur de 300 m.

- En théorie 3 satellites avec des horloges parfaitement synchronisées entre elles et avec le récepteur suffisent pour un positionnement GNSS. C'est ce que l'on appelle la **trilatération**.



Trilatération : positionnement GNSS avec 3 horloges parfaitement synchronisées

(source : Pierre Bosse, cours, ENSG, 2013)



➤ Sur les satellites : horloges atomiques (précision  $> 10^{-10}$  s)

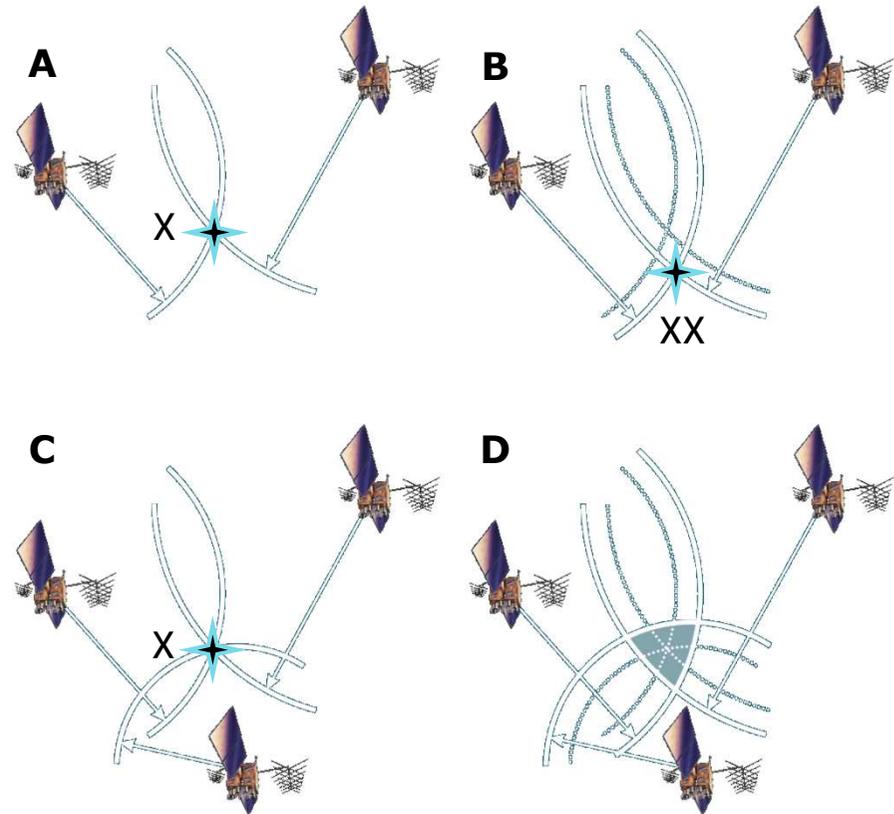
➤ Sur les récepteurs : horloges à quartz (précision  $\sim 10^{-6}$  s)

- En pratique, il existe donc une désynchronisation entre satellites et récepteurs noté  $\delta t$ . Dans ce cas on ne parle plus de distance mais de **pseudo-distance** : mesure indirecte de la distance par le repérage de l'instant de réception d'un signal daté à l'émission lorsque les horloges de l'émetteur et du récepteur ne sont pas synchronisées ( $\rho = c \cdot \Delta t + c \cdot \delta t$ ).
- Au final, pour un positionnement absolu par GNSS, il faut **au minimum 4 satellites** pour permettre de déterminer les 4 inconnues :
  - ✓ 3 inconnues de position (X, Y, Z)
  - ✓ 1 inconnue de temps liée à la désynchronisation du récepteur ( $\delta t$ )

Comment 4 mesures imprécises peuvent donner une mesure précise de positionnement?

▪ Raisons dans un espace en 2 dimensions:

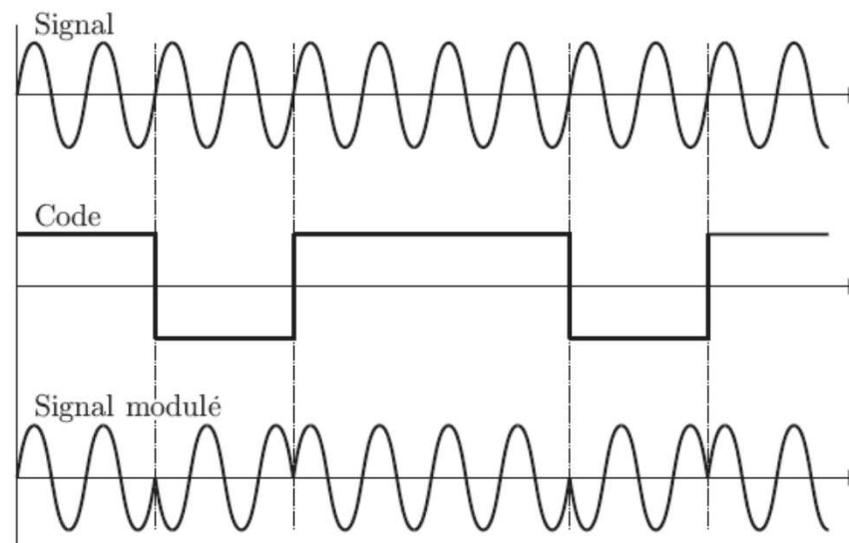
- **A.** 2 satellites nécessaires pour repérer un point X;
- **B.** Erreur commise par le récepteur: point XX;
- **C.** Si pas d'erreur de mesure, un 3<sup>ème</sup> satellite confirme le résultat des 2 autres (X);
- **D.** Avec l'erreur de mesure, le 3<sup>ème</sup> satellite permet de définir une zone dans laquelle se trouve le point X. Il suffit de chercher quelle valeur enlever à chaque mesure pour que les arcs de cercles soient coalescent.



▪ Comme il s'agit d'un espace en 3D, il faut donc recourir à un 4<sup>ème</sup> satellite.

### 3. Signaux et mesures – Codes pseudo-aléatoires

- Pour déterminer le temps de transmission du signal, le satellite et le récepteur émettent une trame pseudo- aléatoire identique. Ceux sont des séquences d'impulsions ou de bits.
- La transmission de l'information se fait par l'onde porteuse par modulation du signal.
- En GNSS, on parle de modulation du signal par la phase : la modulation consiste à augmenter la phase de  $180^\circ$  à chaque changement de parité du code transporté.

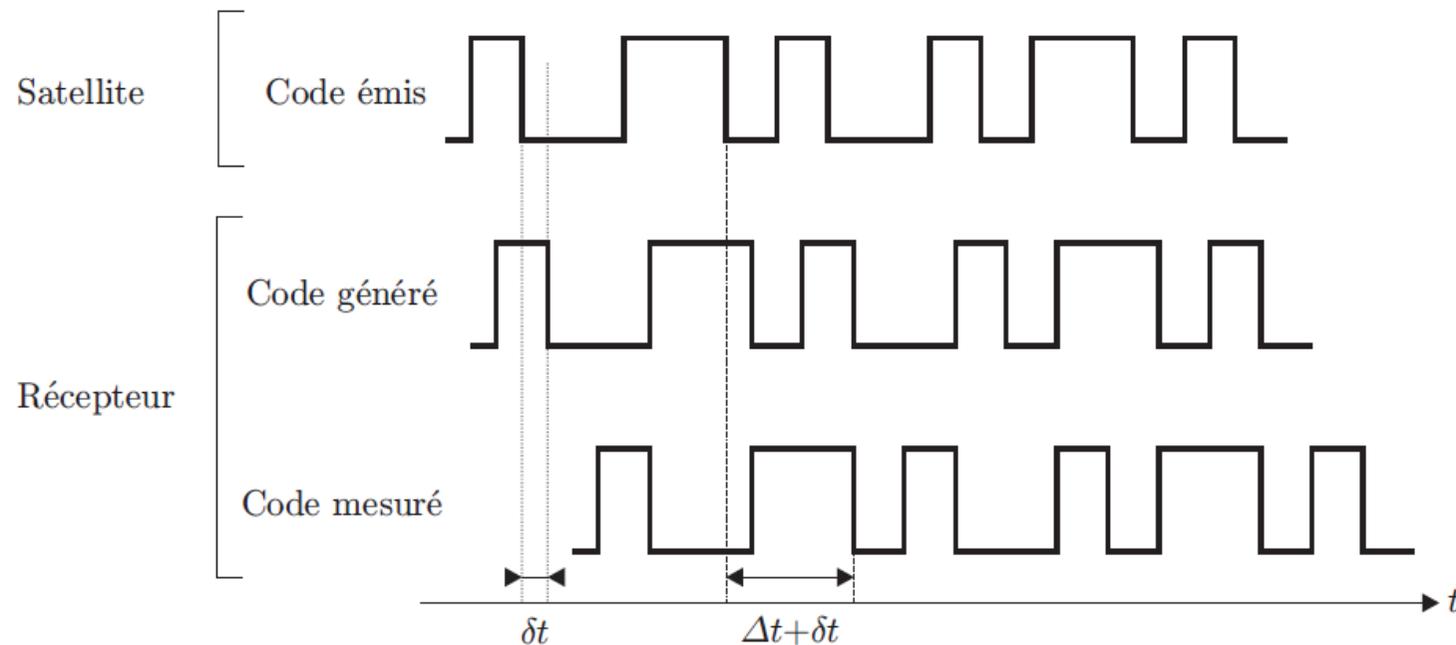


Modulation du signal par la phase à l'aide du code pseudo-aléatoire

(source : Pierre Bosse, cours, ENSG, 2013)

### 3. Signaux et mesures – Mesure de code

- Le décalage temporel entre le codes reçus et générés par le récepteur ( $\Delta t + \delta t$ ) est estimé via une **boucle de code**. Cette boucle consiste à décaler les deux codes l'un par rapport à l'autre jusqu'à l'obtention d'un pic de corrélation maximal.

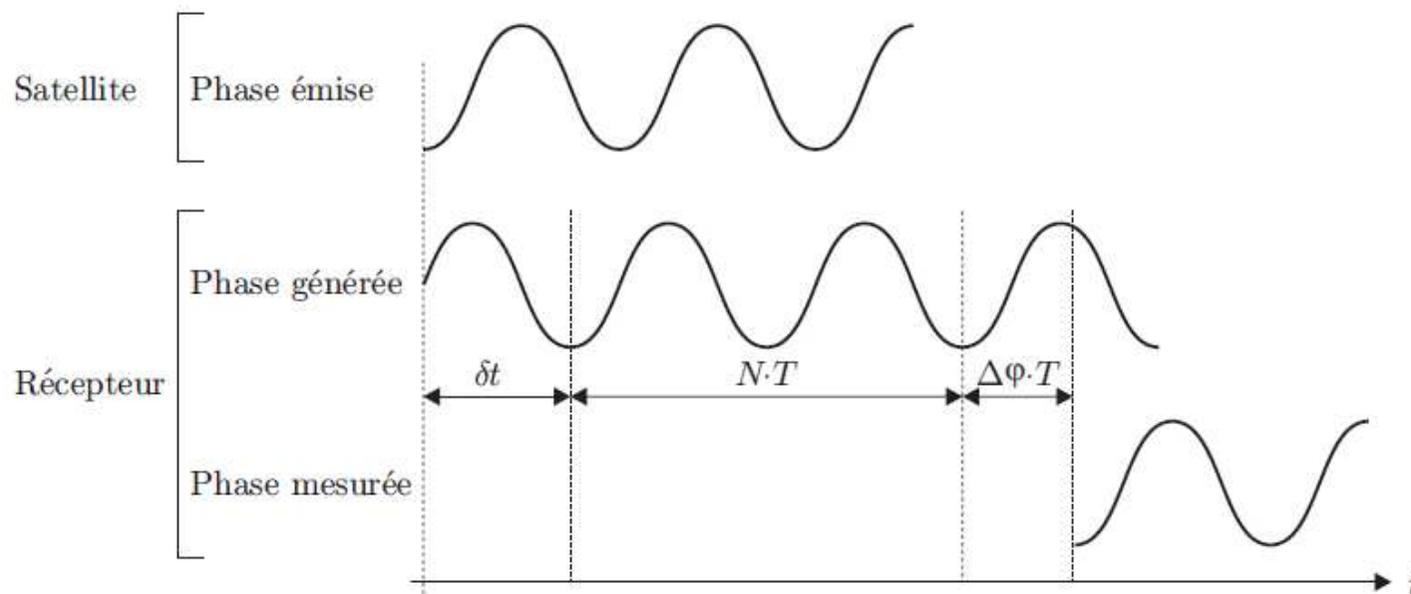


Mesure du code

(source : Pierre Bosse, cours, ENSG, 2013)

### 3. Signaux et mesures – Mesure de phase

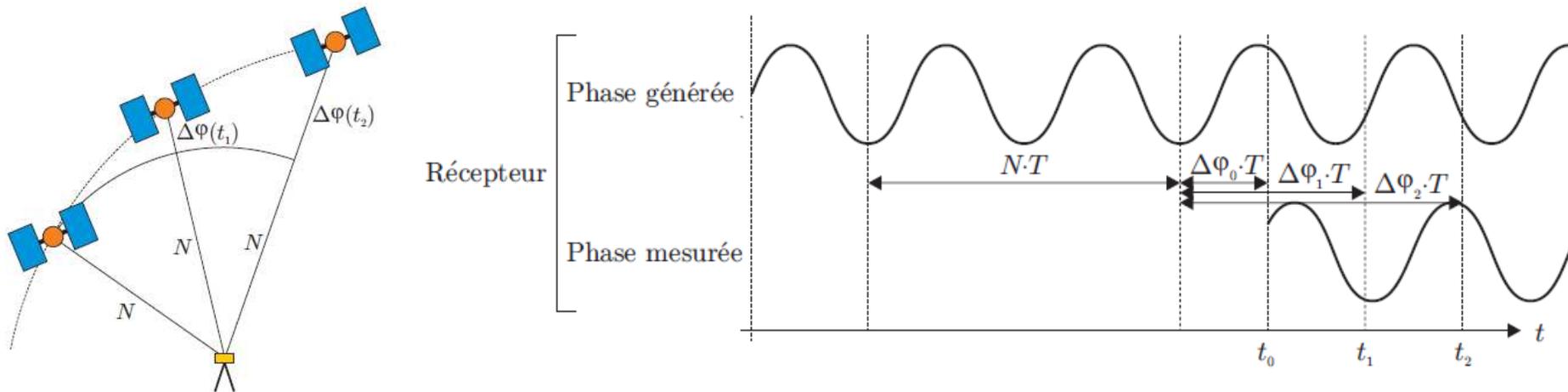
- Une autre technique utilisée pour le positionnement par GNSS repose sur la mesure du déphasage entre les signaux reçu et généré par le récepteur. Cette mesure se fait sur l'onde porteuse



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

(source : Pierre Bosse, cours, ENSG, 2013)

- Pour **déterminer le nombre de cycles  $N$**  entre le satellite et le récepteur, il y a nécessité à suivre dans le temps le signal émis par le satellite.



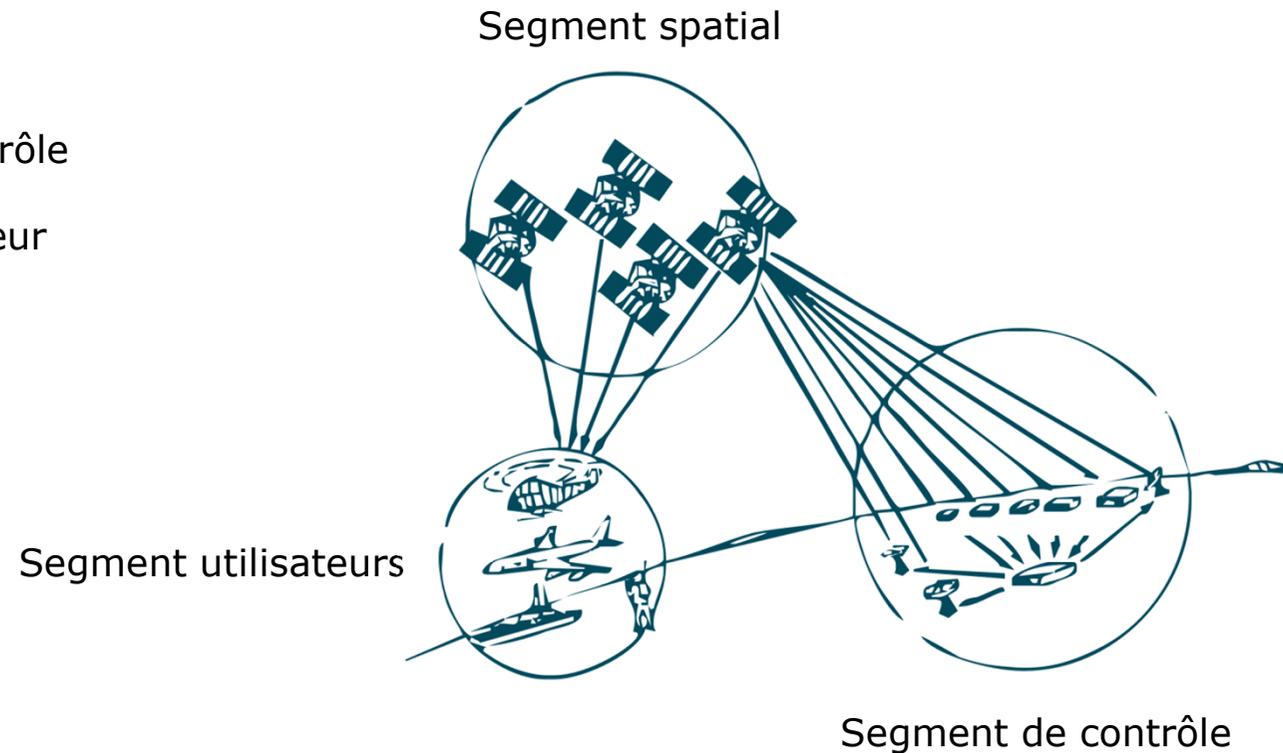
(source : Pierre Bosse, cours, ENSG, 2013)

- Le processus de calcul qui consiste à déterminer le nombre entier de cycles  $N$  entre le satellite et le récepteur est appelé **résolution des ambiguïtés**. Ces dernières sont traitées comme des inconnues dans le calcul.
- Les récepteurs actuels parviennent 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**.

## 4. Le GPS NAVSTAR

- Le système GPS, appelé officiellement NAVSTAR (NAVigation Satellite Timing And Ranging), a été déclaré pleinement opérationnel en avril 1995.
- L'exploitation civile du système GPS doit être considéré du point de vue de ses 3 composantes essentielles (appelées encore segments) :

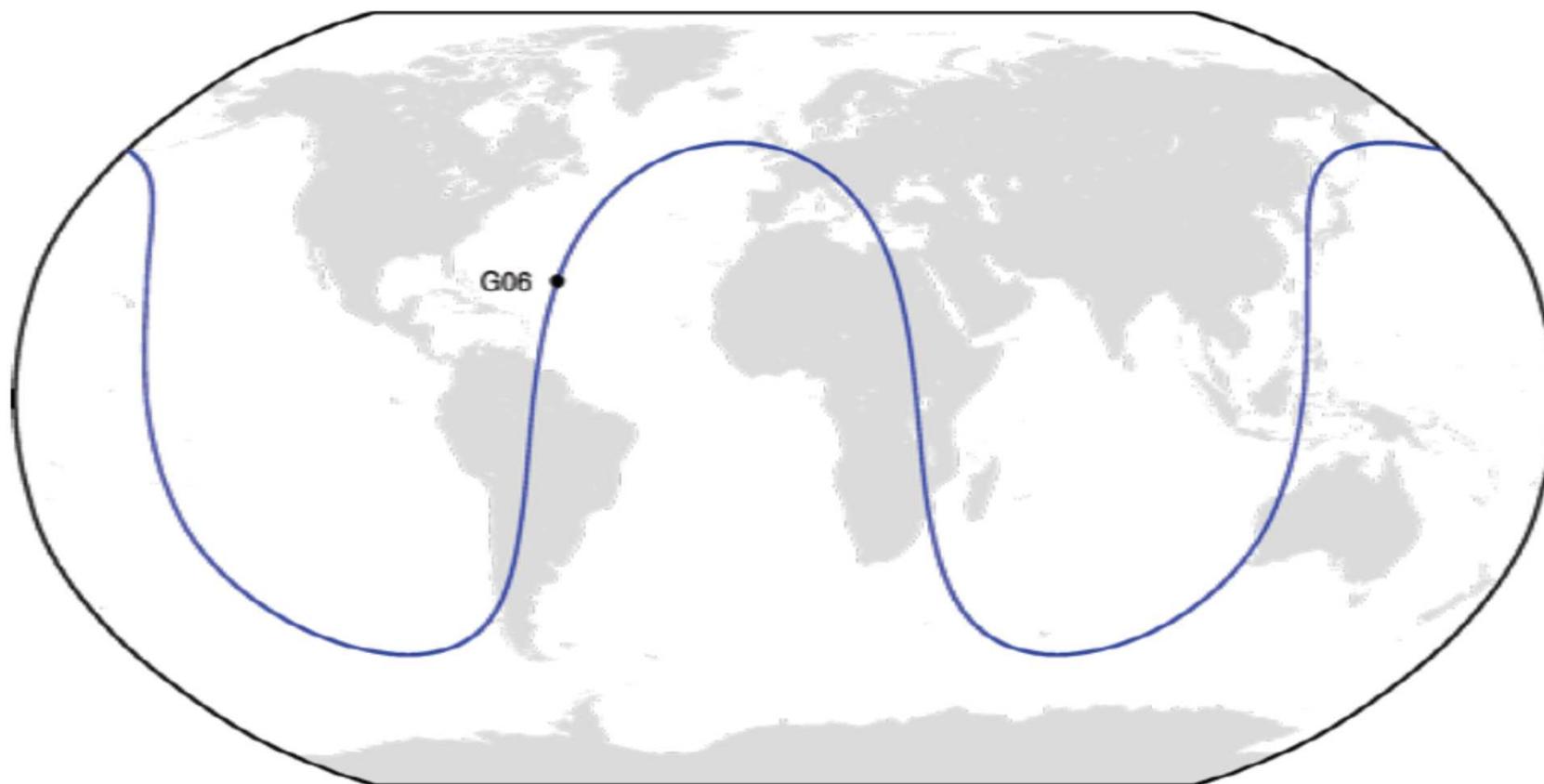
- Le segment spatial
- Le segment de contrôle
- Le segment utilisateur



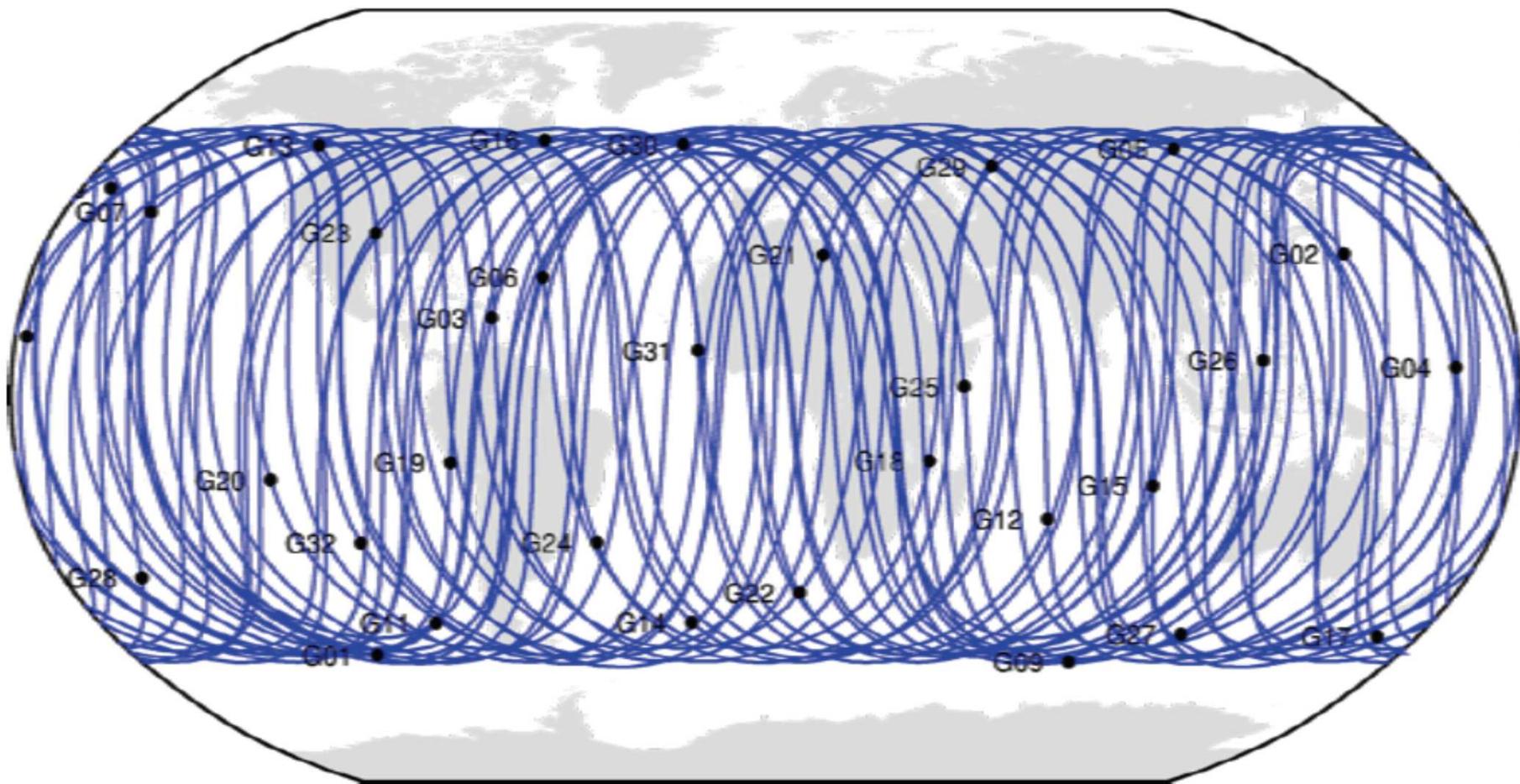


## 4. Le GPS NAVSTAR – Le segment spatial

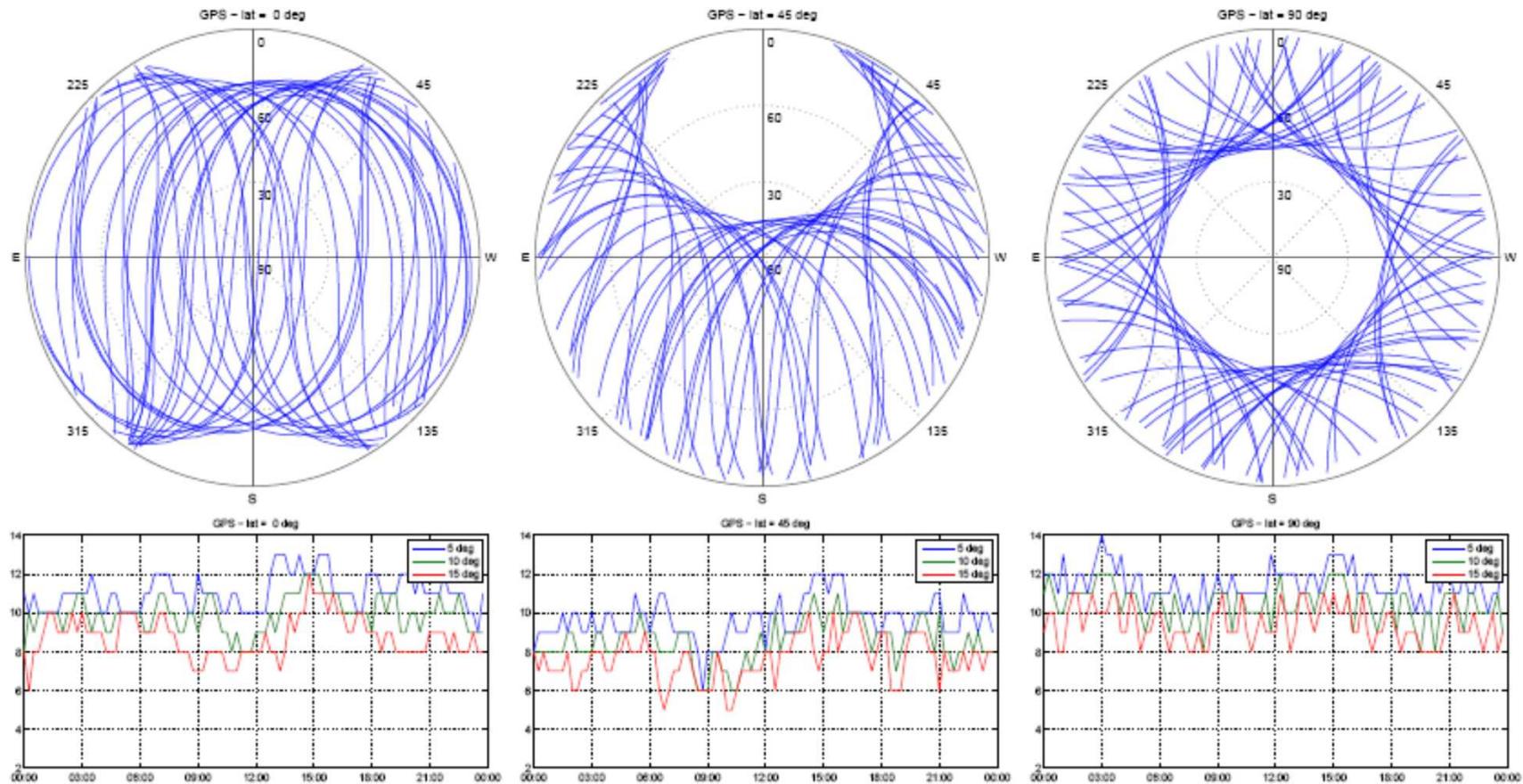
- Constellation de 30 satellites situés à environ 20000 km d'altitude et placés sur 6 orbites quasi-circulaires parcourus en 11h58mn.
- Cette constellation permet d'assurer la visibilité de 4 à 8 satellites avec une élévation supérieur à 15° en tout point du globe.
- Les générations successives de satellites sont désignées sous le nom de Blocs (amélioration des satellites en termes d'autonomie, de mesure du temps – horloges atomiques, de communication...) :
  - ✓ Bloc I (pré-opérationnelle) : 11 satellites lancés entre 1978 et 1985
  - ✓ Bloc II et IIA : 28 satellites lancés entre 1989 et 1997.
  - ✓ Bloc IIR : 12 satellites mis en place depuis 1997.
  - ✓ Bloc IIR-M : 8 satellites mis en place depuis 2005.
  - ✓ Bloc IIF : 12 satellites à partir de 2010.
  - ✓ Bloc III : en phase de développement. Premier lancement pour 2014.



Trace au sol pour le satellite GPS G06 pour 1 jour  
(source : Rolf Dach, école d'été 2012, GRGS)



Traces au sol pour l'ensemble des satellites GPS pour 1 jour  
(source : Rolf Dach, école d'été 2012, GRGS)



Carte du Ciel et nombre de satellites GPS pour 3 latitudes :  
 équateur, moyenne latitude et pôle (source : Pierre Bosse,  
 cours, ENSG, 2013)

## 4. Le GPS NAVSTAR – Le segment de contrôle

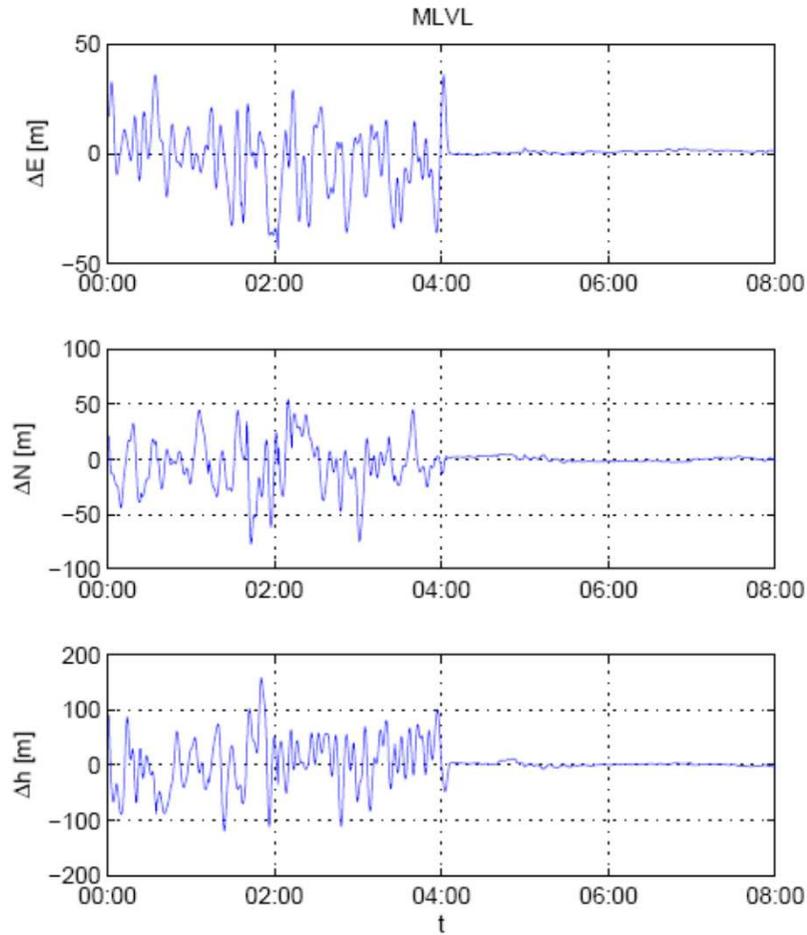
- Segment composé de 5 stations chargées de maintenir le système opérationnel de façon permanente.
- Ces stations assurent la construction, le lancement, la position orbitale, et la surveillance de chacun des satellites du système et de la constellation dans son ensemble.
- La station Master Control (Colorado Springs) fournit le temps de référence, contrôle et programme le repositionnement éventuel des satellites.





## 4. Le GPS NAVSTAR – Le segment utilisateur

- Le plus connu : 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 la **phase** et la datation précise d'évènements.
- Il existe 2 types de services basés sur la mesure de code :
  - ✓ le SPS (Standard Positioning Service): service gratuit et anonyme accessible à tout utilisateur disposant d'un récepteur GPS.
  - ✓ le PPS (Precise Positioning Service): service de positionnement précis nécessitant des clés de décodage.
- Il existe 2 processus permettant de dégrader les signaux envoyés par les satellites :
  - ✓ le SA (Selective Availability) permettant de limiter l'utilisation civile. Aujourd'hui le SA est désactivé.
  - ✓ le AS (Anti Spoofing) pour éviter tout brouillage volontaire du système par un tiers. L'anti-leurrage est actuellement actif.



Désactivation de la dégradation volontaire SA sur les signaux GPS le 2 mai 2000 : effet induit sur les positions instantanées estimées à partir du code pour la station MLVL ( variations des composantes E, N et h par rapport à la position moyenne) (source : Pierre Bosse, cours, ENSG, 2013)

## 4. Le GPS NAVSTAR – Les signaux GPS

- Les satellites émettent chacun 3 ondes porteuses sinusoïdales L1, L2 et L5.

Porteuse	Facteur ( $f_0$ )	Fréquence [MHz]	Longueur d'onde [cm]
L1	154	1 575,42	19,0
L2	120	1 277,60	24,4
L5	115	1 176,45	25,5

Les différentes fréquences du système GPS

- Ces porteuses sont modulées par des codes de pseudo-distance et le message de navigation:

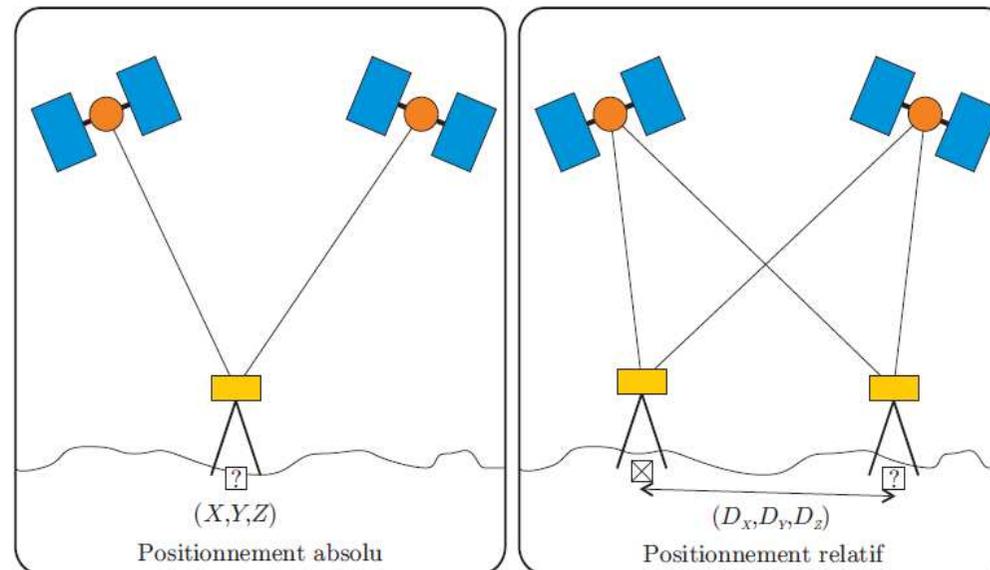
Code	Porteuse	Nombre de bits	Durée	Répétition
C/A	L1	1 023	1 ms	1,023 Mbps
P	L1 + L2	$2,3527 \cdot 10^{14}$	1 semaine	10,23 Mbps
L2C	L2	767 250	1,5 s	1,023 Mbps
M	L1 + L2	?	?	5,115 Mbps
L5C-I	L5	$10\,230 \times 10$	10 ms	10,23 Mbps
L5C-Q	L5	$20\,460 \times 20$	20 ms	10,23 Mbps

Les différents codes du système GPS

## 5. Positionnement par GPS

On distingue 2 modes de positionnement

- ✓ Positionnement absolu ou ponctuel : la position du récepteur est déterminée de manière directe à partir des observations et de la position des satellites
- ✓ Positionnement relatif ou différentiel : la position du récepteur est déterminée par mesure du vecteur (**ligne de base**) séparant le récepteur et une ou plusieurs stations de référence est estimée.



(source : Pierre Bosse, cours, ENSG, 2013)

- Ces 2 modes de positionnement peuvent être réalisés à partir de mesures sur le code et/ou la phase, en temps réel ou en temps différé.

## 5. Positionnement par GPS – positionnement absolu

- Positionnement absolu sur le code : mode de positionnement standard. L'exactitude du positionnement est de l'ordre de 5 à 20 m.
- L'exactitude sur le positionnement est caractérisée par **les facteurs de dilution de précision** nDOP (Dilution Of Precision):

$$\sigma_n = nDOP \cdot \sigma_0$$

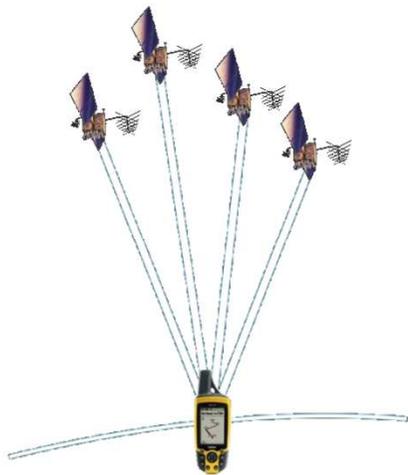
avec  $\sigma_n$  la précision du positionnement et  $\sigma_0$  la précision de la mesure.  $n$  désigne les différentes composantes du positionnement :

- HDOP (*Horizontal Dilution Of Precision*) pour le positionnement planimétrique
- VDOP (*Vertical Dilution Of Precision*) pour le positionnement altimétrique
- TDOP (*Time Dilution Of Precision*) pour la détermination du temps
- PDOP (*Position Dilution Of Precision*) pour le positionnement 3D

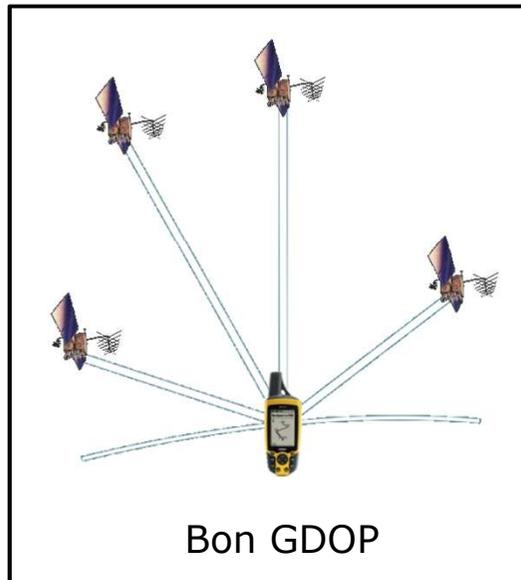


GDOP (*Geometric Dilution Of Precision*)

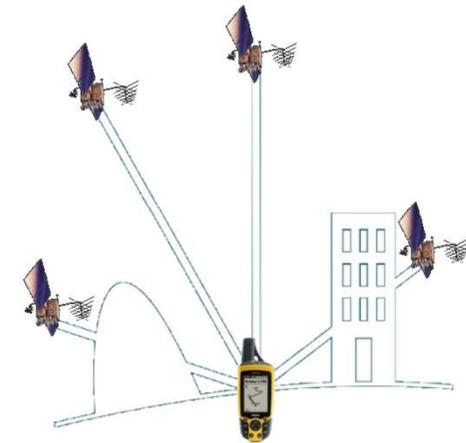
- Le GDOP n'est accessible le plus souvent que sur des récepteurs géodésiques et nécessite la visibilité de 4 satellites au minimum.
- Le GDOP est inversement proportionnel au volume du tétraèdre formé par le récepteur et les 4 satellites.



Mauvais GDOP



Bon GDOP

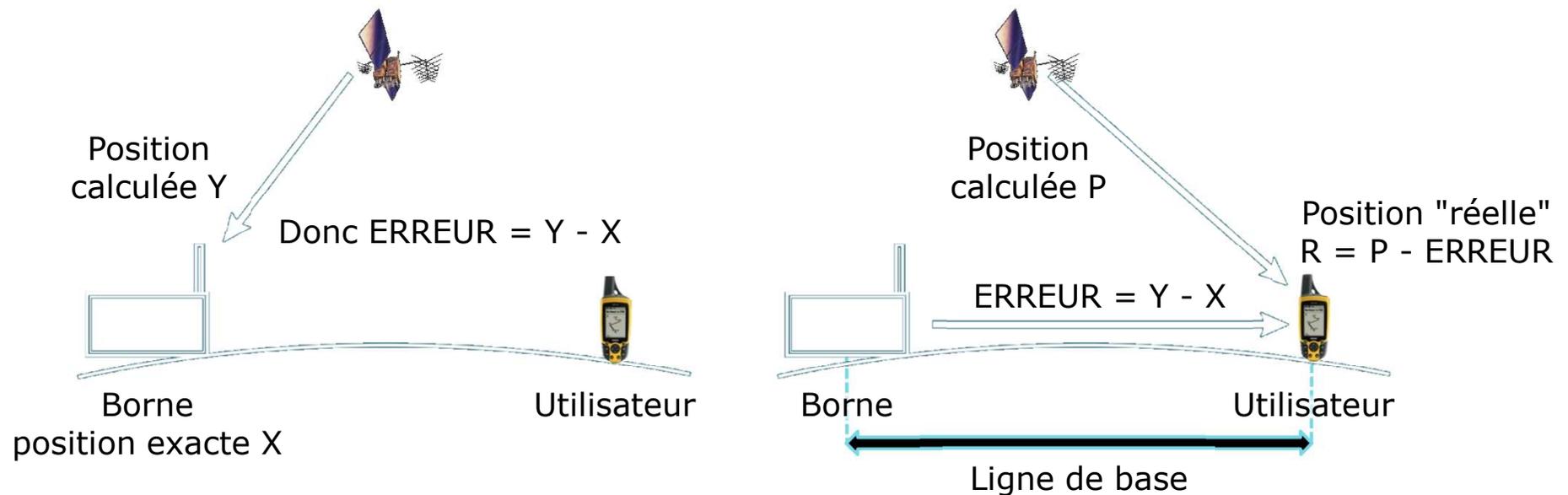


Mauvais GDOP

- En général, pour un positionnement par pseudo-distance, et si plus de 4 satellites sont visibles, les paramètres du DOP servent à choisir les 4 satellites les mieux placés, de façon à proposer les meilleurs résultats.

## 5. Positionnement par GPS – positionnement différentiel

- On parle de mode différentiel parce qu'on travaille par différence sur deux récepteurs (utilisateur/station) placés sur 2 points distincts et observant au même instant les mêmes satellites. L'utilisateur est muni d'un dispositif lui permettant de recevoir des informations provenant de la station dont la position est connue, et ainsi d'appliquer les corrections nécessaires pour calculer sa position.



- 
- Le GPS différentiel par la phase est une méthode principalement utilisée en topographie et mise en œuvre au minimum avec 2 récepteurs, dont 1 fixe. Son principe est simple:
    - C'est l'analyse des données GPS reçues par les 2 récepteurs, au même moment, qui permettra de calculer précisément la ligne de base.
    - Les données GPS des 2 capteurs pour être analysées doivent être juxtaposées. Cette juxtaposition consiste à comparer les données GPS prises aux récepteurs fixe et mobile pendant une période commune qui a pour nom la session.
    - Cette méthode permet une précision de mesure de position de l'ordre de 0,5 à 5 m, pouvant atteindre 2 cm avec l'utilisation de 4 récepteurs.

Les réseaux de stations fixes et permanentes:

- Le Réseau GPS Permanent (RGP) est une densification sur le territoire français de réseaux internationaux de stations permanentes, comme l'*International GPS Service* (IGS) et l'*EUREF Permanent Network* (EPN), auxquels sont intégrées certaines stations du RGP.
- Ce réseau est constitué d'un ensemble de stations de référence qui émettent en permanence les messages de correction dans la bande radio des 285 à 325 kHz.





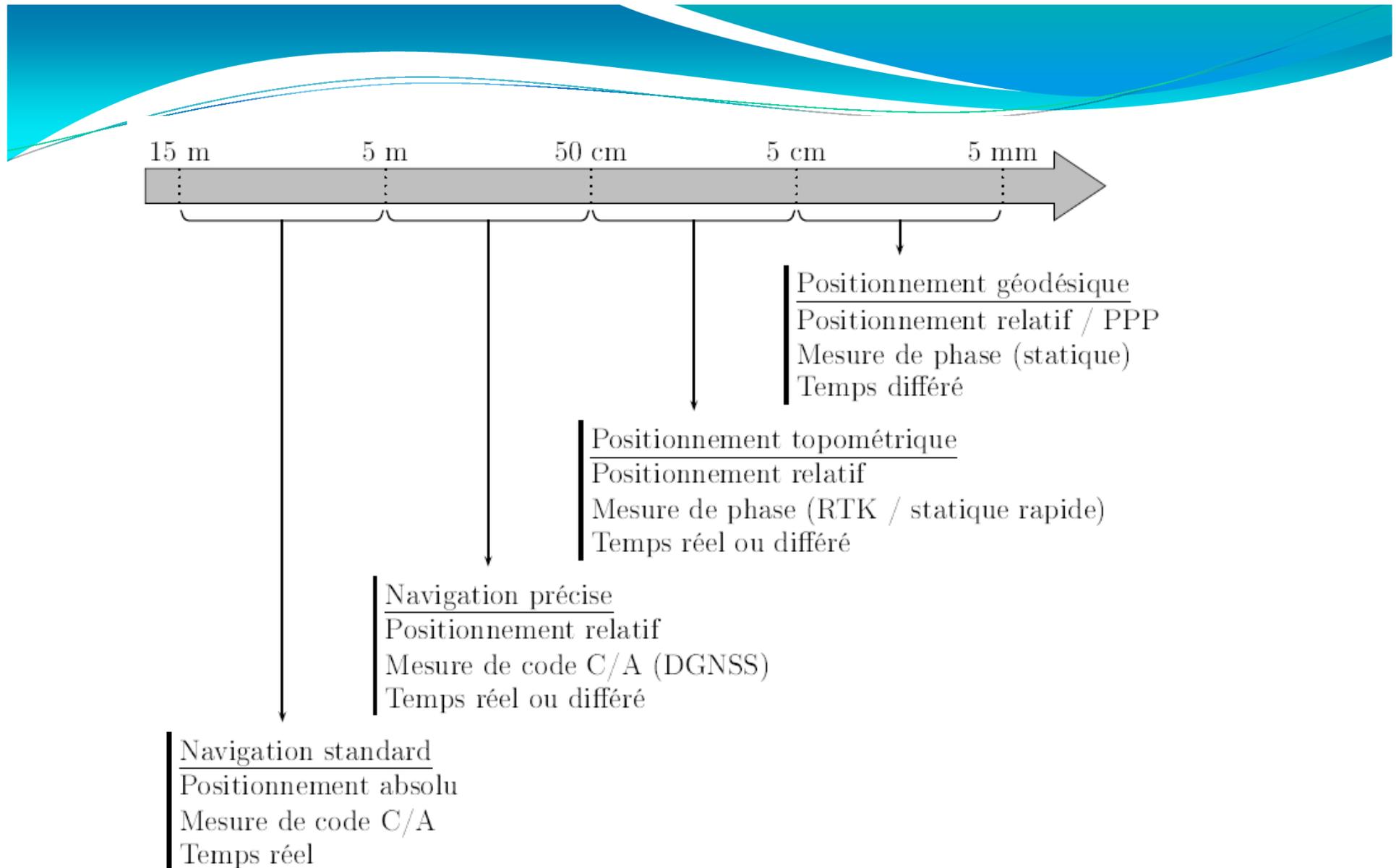
2 grands types de traitement du positionnement différentiel :

- Le **temps différé** ou post-traitement, simple et peu coûteux. Il consiste à récupérer les données GPS inscrites sur une mémoire de masse insérée dans le récepteur.
- Le **temps réel**, complexe et nécessitant un système de communication pour transmettre les données. Les données GPS du récepteur fixe sont transmises au récepteur mobile par liaison radio ou GSM (Global System for Mobile Communications). Cette méthode permet d'afficher en continu sur le terrain les coordonnées du récepteur mobile.



Les différentes techniques de mesure en mode différentiel :

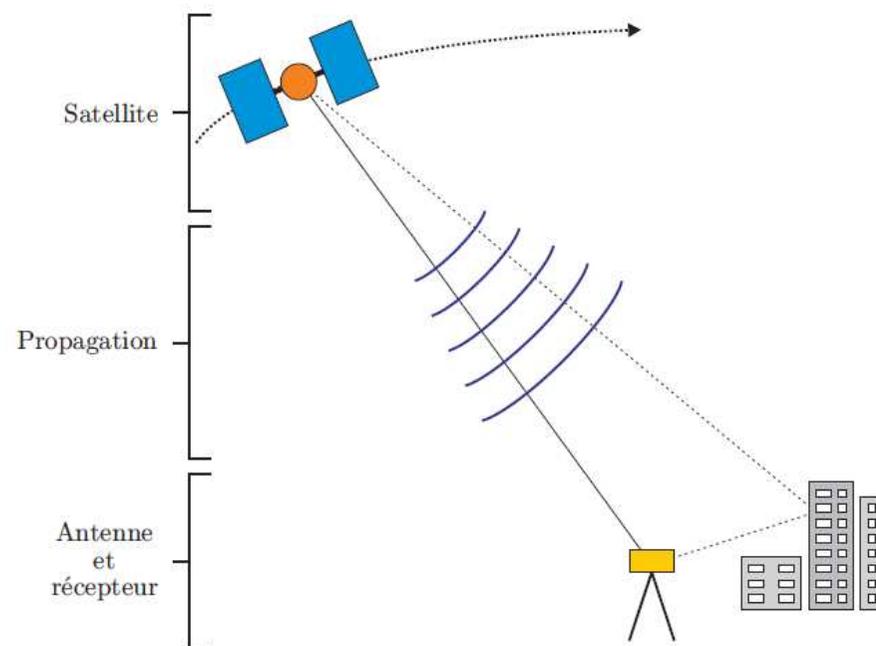
- Le **mode statique**: adapté aux chantiers de grande précision sur de grandes lignes de base telle la géodésie, la tectonique des plaques. La nécessité de cette gamme de précision oblige à une certaine lenteur.
- Le **mode statique rapide** : configuration favorable des satellites. Diminution de la durée de station. Ligne de base modérée ( $\sim 20$  km). Sert à l'établissement de canevas locaux, à la densification de réseaux, etc... Il fournit une précision élevée. Le topographe l'utilise largement
- Le **mode cinématique** : utilisé pour les levés de détails et la saisie d'un grand nombre de points proches les uns des autres. Dans certaines conditions, à peine 2s par point sont nécessaires. Le mode le plus connu : **RTK** (Real Time Kinematic pour cinématique temps réel). recourt à une liaison radio entre la base et le mobile pour juxtaposer les données GPS prises au même moment aux 2 extrémités de la ligne de base. Les levés de détails et surtout les implantations s'en trouvent facilités. Cependant, la liaison radio impose parfois des limitations.



Précision des différents modes d'utilisation du GPS

(source : Pierre Bosse, cours, ENSG, 2013)

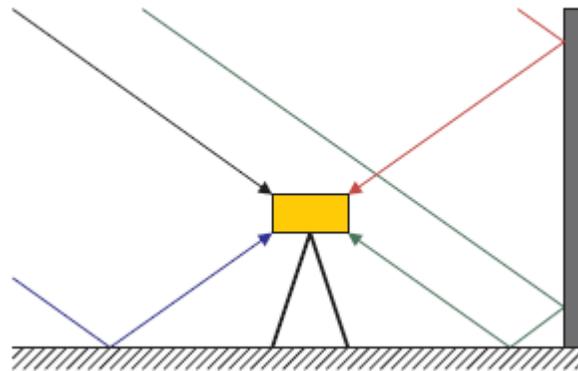
## 6. Les sources d'erreur sur les mesures GNSS



(source : Pierre Bosse, cours, ENSG, 2013)

- Erreurs liées aux satellites (orbite et horloges des satellites)
- Erreurs liées à la propagation du signal dans l'ionosphère et la troposphère
- Erreurs liées à la station (le trajet multiple, les masques, horloges des récepteurs)

- Le trajet multiple : tout objet réflecteur placé au voisinage de l'antenne du récepteur peut renvoyer une partie du signal provenant du satellite sur cette antenne. Ce sont les phénomènes les plus difficiles à appréhender, le sol lui-même étant un réflecteur potentiel. Peut entraîner des erreurs de plusieurs centimètres.



(source : Pierre Bosse, cours, ENSG, 2013)

- Les masques : des éléments de l'environnement de la station peuvent former des obstacles qui représentent des masques pour les signaux GPS, empêchant la réception du signal. Il n'existe aucun moyen de corriger l'effet des masques. La seule solution est de choisir judicieusement la situation de la station.

Source		Impact de l'erreur	
		Pos. standard	Pos. précis
Satellite	Horloge	3 m	5 mm
	Orbite	2 m	
	Bruit de code	3 m	-
Propagation	Ionosphère	3 m	1 mm
	Troposphère	1 m	5 -25 mm
Station	Trajet multiple	1 m	2 -15 mm
	Bruit de mesure	1 m	2 mm
	Centre de phase	1 m	2 mm
	Horloge	0,5 m	1 mm
Erreur totale typique		10-15 m	5 -20 mm

Impact des erreurs sur 2 modes de positionnement par GPS :  
 Positionnement absolu par mesure du code (Pos. Standard) et  
 positionnement différentiel par mesure de phase (Pos. Précis).

(source : Pierre Bosse, cours, ENSG, 2013)

## 7. Sur le terrain – Préparation d'une mission

- La liste des méthodes d'utilisation des signaux GPS montre qu'il faut impérativement mettre en adéquation le type de récepteur employé, la méthodologie de mesure avec les objectifs de la mission de terrain.
- Pour mener une campagne de mesures efficace, il faut récolter un certain nombre d'informations (absence d'obstacles, de sources d'interférences, vérifier l'existence de points géodésiques, formuler les besoins logistiques...).
- La préparation consiste également à prévoir les plannings. Des logiciels adaptés peuvent alors se révéler utiles.

