





Global Positionning System

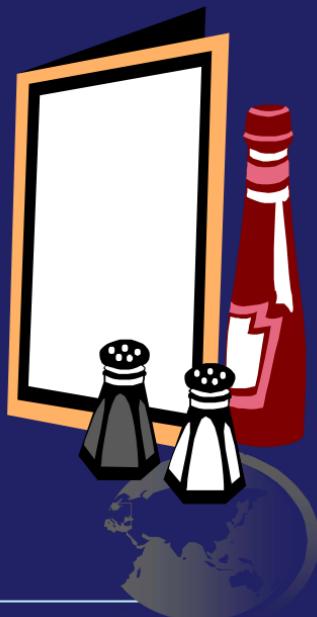
Gilles CANAUD

Chef du Département Information Géodésique

IGN France / Service de Géodésie et Nivellement

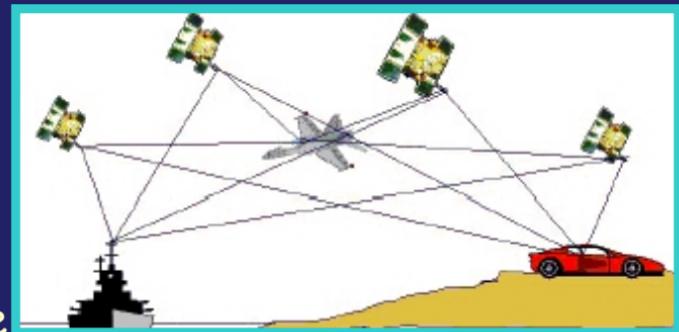
Menu

- ➡ • Présentation du système
• Signaux et mesures
• La qualité
• Les modes de positionnement
• Les réseaux permanents
• Conception d 'un chantier



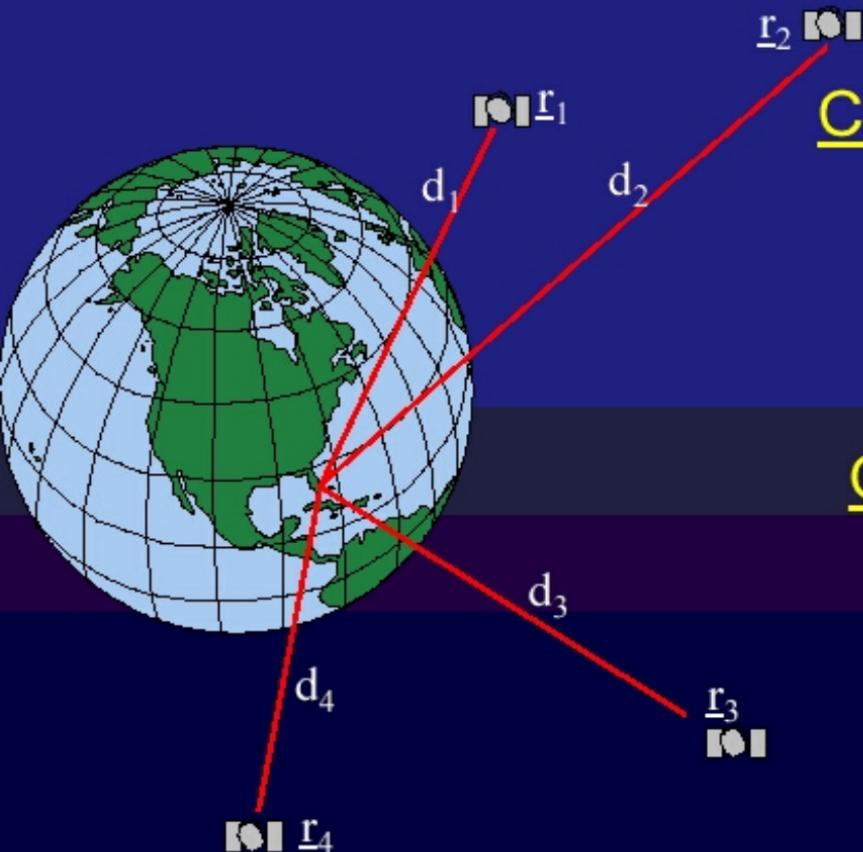
Origine du GPS

Dans les années 70, le "Department of Defense" (DoD) américain conçoit un système permettant à tous les avions, navires, véhicules blindés, troupes de se positionner de manière précise et quasi instantanée, n'importe quand et n'importe où à la surface de la Terre.



Il remplaça le système « Transit » qui fut conçu dans les années 1950 et opérationnel jusqu'au milieu des années 1980

Principe de base



Connaissant :

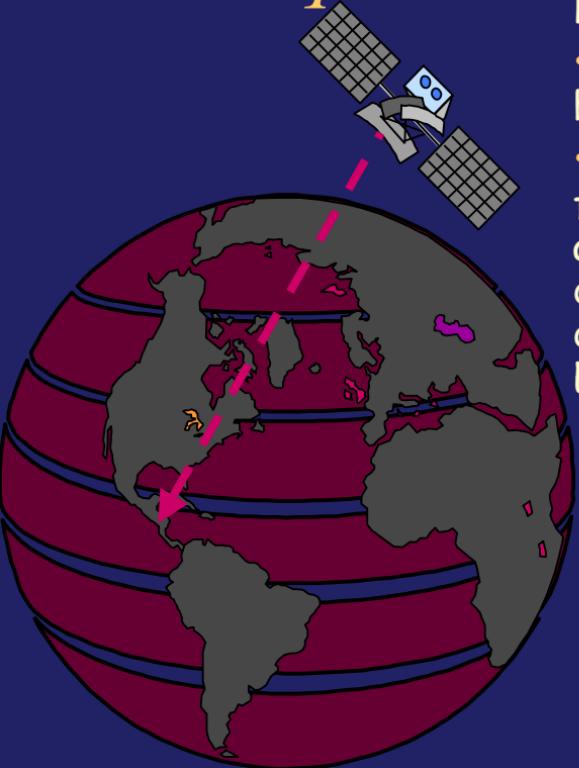
La distance d_i et position r_i
de 4 satellites au moins

On obtient :

La position du récepteur

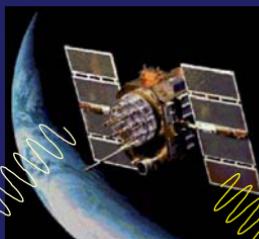
- dans l'espace (x, y, z)
- dans le temps (t)

Historique



- 1973-1978 : Mise au point du concept, lancement des appels d'offre
- 1978-1985 : Phase pré-opérationnelle avec lancement de 11 satellites du block I
- 1989-1997 : Lancement de 28 satellites du block II/IIR de la phase opérationnelle
- Le système a été déclaré opérationnel en février 1994 par le congrès américain, il est aujourd'hui sous contrôle commun du département de la défense (DOD) et du département des transports (DOT) des Etats-Unis

Composition du système GPS



3 secteurs :

- Secteur spatial
- Secteur de contrôle
- Secteur utilisateur

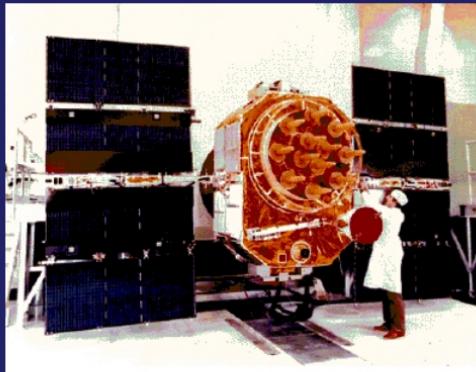


Secteur spatial: Les orbites de Walker

Actuellement :

- ◆ 28 satellites
- ◆ orbite quasi-circulaire
- ◆ à une hauteur de +/- 20200 km
- ◆ période de révolution 12 heures sidérales
- ◆ répartis sur 6 plans orbitaux inclinés à 55° par rapport à l'équateur
- ◆ partout sur Terre et à tout moment, au moins 4 satellites visibles au dessus de 15° d'élévation





Evolution de la constellation

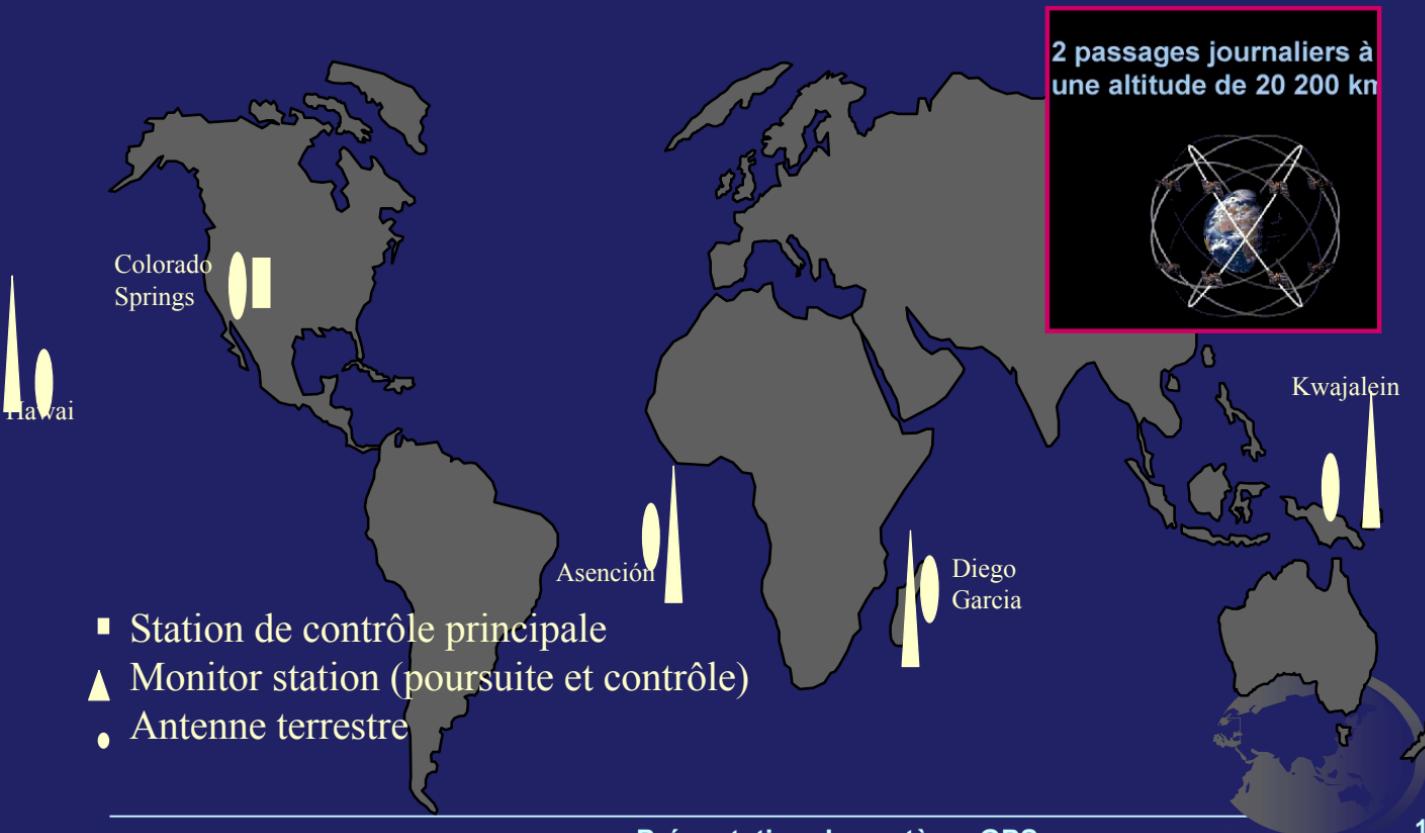
3 générations de SV

Bloc I: Lancés entre 1978 et 1985. Tous actuellement hors-service excepté un seul, qui est activé de manière périodique. Leur durée de vie est de 4,5 ans. La principale différence entre ces satellites et les générations suivantes est l'impossibilité de dégrader volontairement le signal transmis.

Bloc II et IIa: Mis sur orbite à partir de 1985. Ils ont la capacité de dégrader le signal émis. Leur durée de vie est de 7,5 ans.

Bloc IIr: Ils ont été construits pour avoir une durée de vie de 10 ans. Ils sont capables de communiquer entre eux et ont été mis sur orbite depuis 1996 afin de maintenir une constellation complète.

GPS: Secteur de contrôle



Secteur utilisateur

Utilisateurs +Matériel+Logiciels+Services

2 types de service :

- SPS (Standard Positioning Service)

Service de base accessible gratuitement à tous les utilisateurs d'un récepteur GPS.

- PPS (Precise positioning Service)

Service réservé aux militaires américains et leurs alliés munis de récepteurs à clés de décodage permettant d'éliminer les dégradations volontaires



Secteur utilisateur



 SPECTRA[®]
PRECISION



Trimble



DSNP



JAVAD
POSITIONING SYSTEMS



Leica

MADE TO MEASURE




Ashtech
Precision Products



MATERIEL : RECEPTEURS de NAVIGATION

- Types de signaux traités
- Nombre de canaux
- Nombre de satellites suivis simultanément
- Durée pour obtenir la première mesure
- Types de détermination prévus par l'équipement
- Taille et poids de l'équipement
- Consommation d'énergie
- Conditions limites de l'emploi
- Temps Réel



MATERIEL : RECEPTEURS GEODESIQUES

- Traitent le code C/A et le code P
- Traitent la phase L1 et L2
- Actuellement, la majeure partie des systèmes comprennent les algorithmes nécessaires au décodage du code Y inconnu avec la méthode du 'Z-tracking'



Logiciels

- Logiciels de recherche
 - produits ouverts au développement informatique
 - permettent le calcul dynamique
 - adaptés à la haute précision et aux réseaux globaux
- Logiciels ' constructeurs '
 - propriété des fournisseurs de matériel
 - hermétiques au développement
 - ne proposent pas systématiquement l'ajustement



Format d'échange international de données

RINEX : *Receiver Independant Exchange Format*

- Indépendant du type de récepteur
- Structure uniforme de représentation des données, connue de tous.
- Fichiers en ASCII qui peuvent facilement être publiés
- Reconnu internationalement par l'AIG et les fabricants
- tous les logiciels professionnels peuvent donc traiter des mesures de différents types de récepteurs.
- Prévu pour le statique, statique rapide, cinématique...
- Prévu pour données GPS et aussi GLONASS.



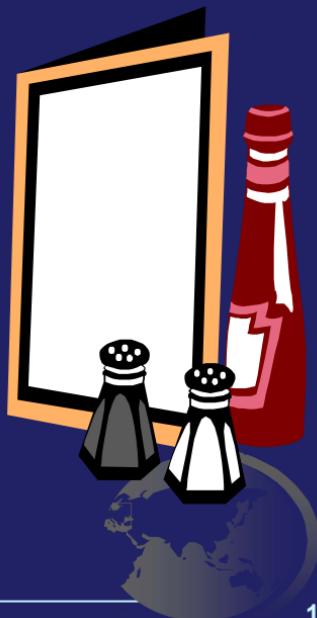
RINEX : Receiver Independant Exchange Format

2.10	OBSERVATION DATA	G (GPS)	RINEX VERSION / TYPE			
teqc	2002Mar14	20021012 22:59:15UTCPGM	/ RUN BY / DATE			
BARA			MARKER NAME			
			MARKER NUMBER			
	SCJ, Republica Dominicana		OBSERVER / AGENCY			
5555-1122A0	Ashtech UZ-12	CJ00	REC # / TYPE / VERS			
T001234578	Ashtech Choke Ring		ANT # / TYPE			
2148602.2314	-5656235.2950	2010942.2059	APPROX POSITION XYZ			
0.0000	0.0000	0.0000	ANTENNA: DELTA H/E/N			
1	1		WAVELENGTH FACT L1/2			
7	L1	L2	# / TYPES OF OBSERV			
30.0000			INTERVAL			
Forced Modulo Decimation to 30 seconds						
2002	10	12	0	0	0.0000000	GPS
MSWin2000 IAx86-PII bcc32	5.0 MSWin95/98/NT/2000 486/DX+					COMMENT
GBSS	SCJ					COMMENT
						END OF HEADER
02	10	12	0	0	0.0000000	0 10G 2G20G11G28G13G31G 1G 8G27G 7
14036943.888	5	10941204.77544	24290383.313	24290381.6904	24290399.8764	
-1406.876		-1096.250				
-4524531.780	5	-3511526.26044	24587048.976	24587052.1174	24587096.9134	
1767.168		1376.960				
-25376286.022	8	-19743697.53747	20441731.334	20441731.3364	20441736.2284	
-26.456		-20.611				
-4238673.908	6	-3274530.23945	24139235.438	24139235.8224	24139243.9664	
2069.549		1612.633				



Menu

- Présentation du système
- • Signaux et mesures
- La qualité
- Les modes de positionnement
- Les réseaux permanents
- Conception d 'un chantier

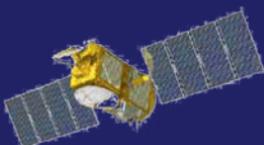


Les signaux des satellites

l'horloge atomique
embarquée

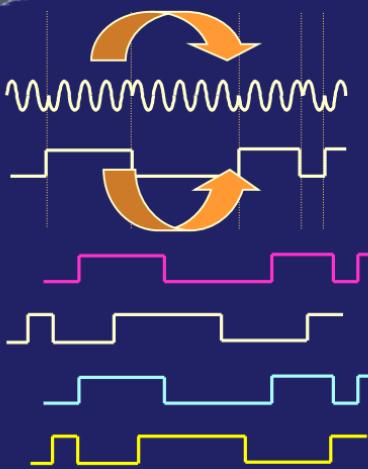


Fréquence fondamentale : $f_0 = 10,23 \text{ Mhz}$



$L1 = 154.f_0 = 1575,42 \text{ Mhz} (\lambda 19\text{cm})$

$L2 = 120.f_0 = 1227.60 \text{ Mhz} (\lambda 24 \text{ cm})$

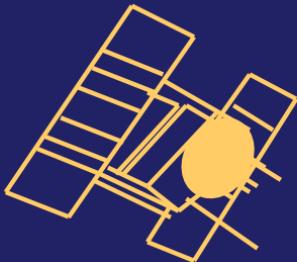


modulées par des codes pseudo-aléatoires :

- Un message de navigation, 1500 bits à 50hz
- Le C/A code, $T= 1\text{ms}$ $f= f_0/10$ sur L1
- Le Pcode, $T=267$ jours $f= f_0$ sur L1 et L2
- Le Y code, qui remplace le P code et connu des utilisateurs autorisés (A.S.)



Message de navigation



Almanachs des satellites

Corrections d 'horloge du satellites

différence UTC et temps GPS

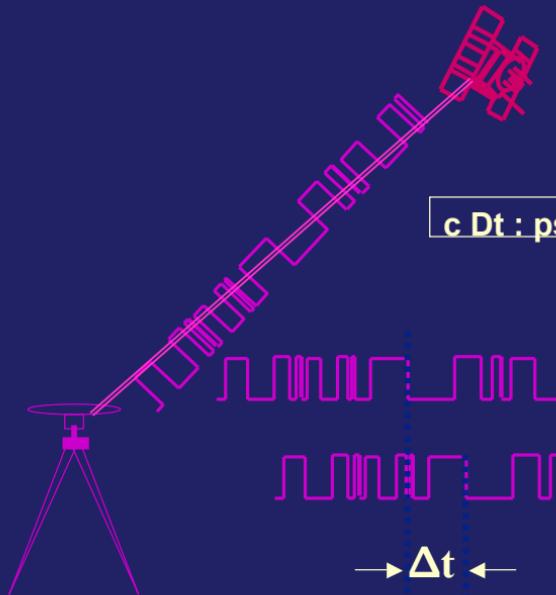
Ephémérides du satellite

un modèle mondial d 'ionosphère



Les Mesures de pseudo-distances

« code »



$c \Delta t : \text{pseudo distance code}$

Signal reçu

Signal généré par récepteur

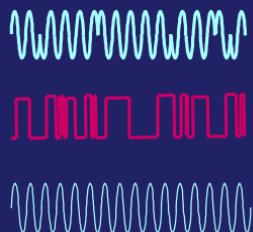
L'écart de temps Δt est entaché du défaut de synchronisation de l'horloge du récepteur

$\pm 1 \text{ m}$

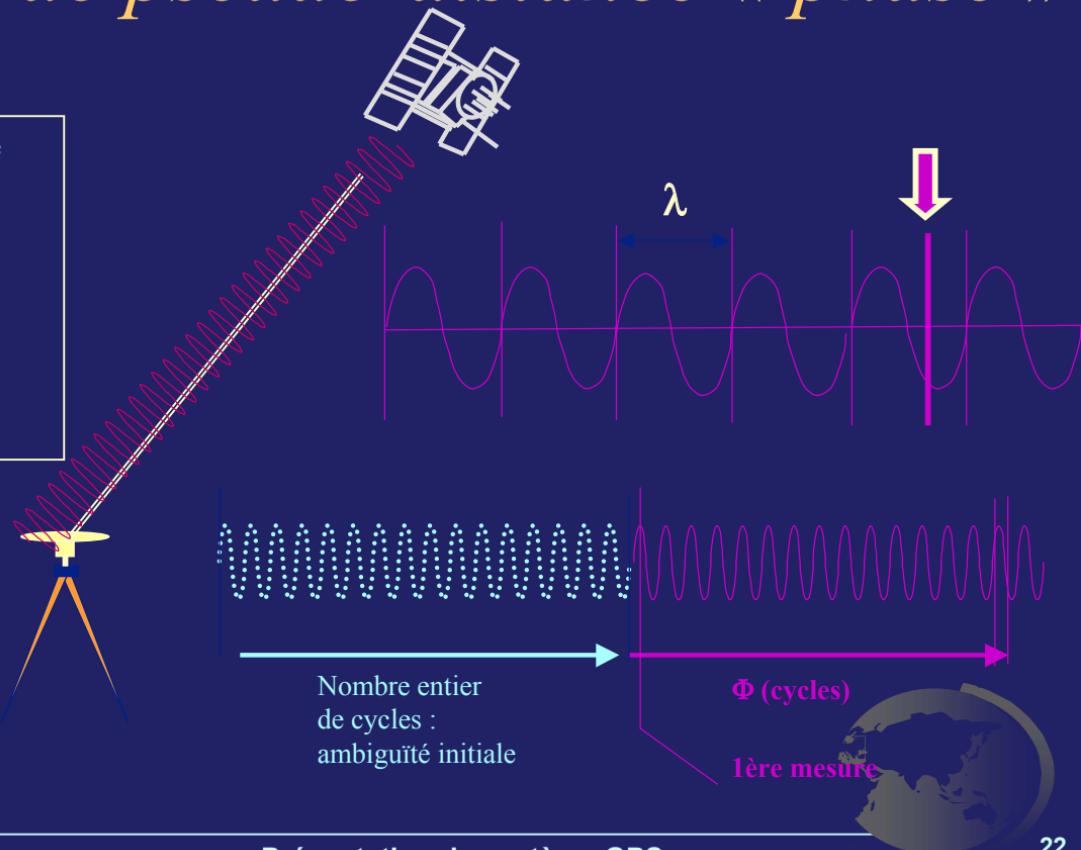


Mesure de pseudo-distance « phase »

Reconstitution de la porteuse

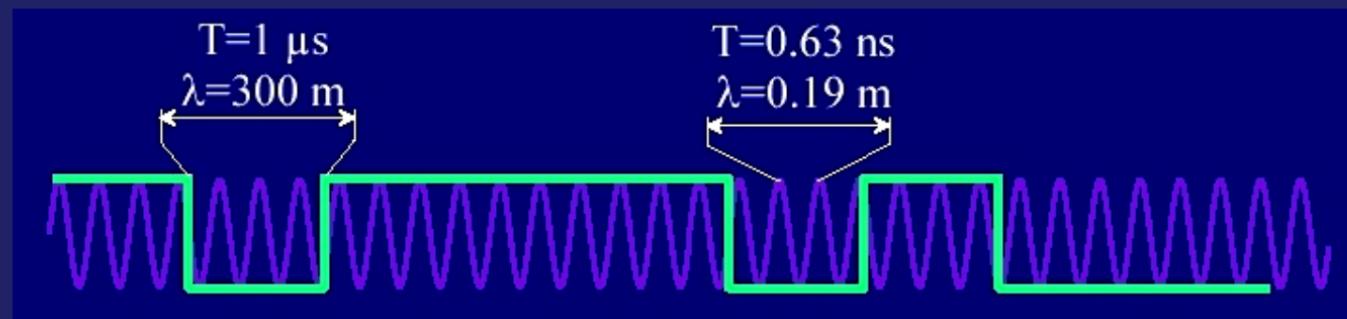


$\pm 1 \text{ mm}$



Mesures de pseudo-distances

Sur le Code : $\lambda = 300 \text{ m}$



Sur la Phase : $\lambda \sim 20 \text{ cm}$



Comparaison et complémentarité des mesures

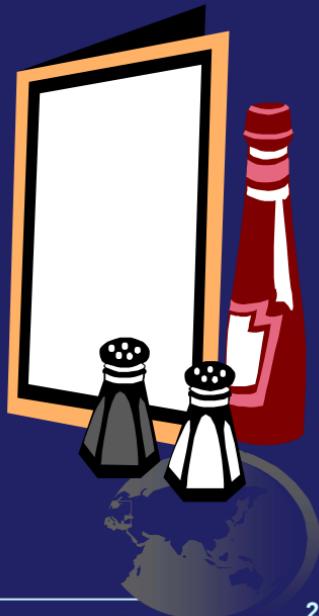
Exemple : Bruit de 1% sur code P et L1

	<i>Code</i>	<i>Phase de la porteuse</i>
Qualité	Absolu	Bruit : ~0.2 mm
Défaut	Bruit : ~300 mm	Ambiguë (N*19cm)



Menu

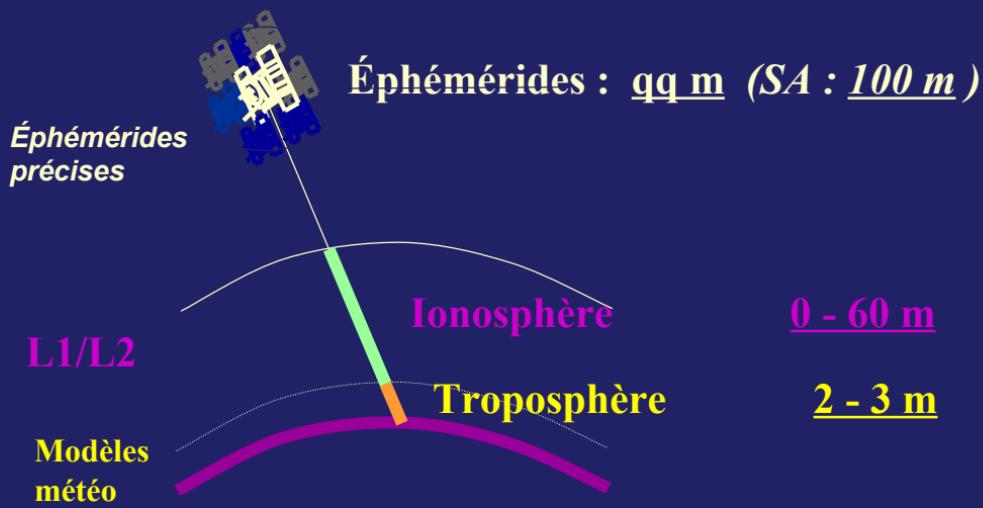
- Présentation du système
- Signaux et mesures
- • La qualité
- Les modes de positionnement
- Les réseaux permanents
- Conception d 'un chantier



On peut citer dans l'ordre chronologique :

- dégradations du signal
- l'imprécision des orbites
- ionosphère
- troposphère
- le multi-trajet
- la position du centre de phase des antennes

Les sources d'erreur



Certains de ces phénomènes sont à peu près contrôlés, d'autres le sont moins, voire pas du tout.



Qualité : Précision des orbites

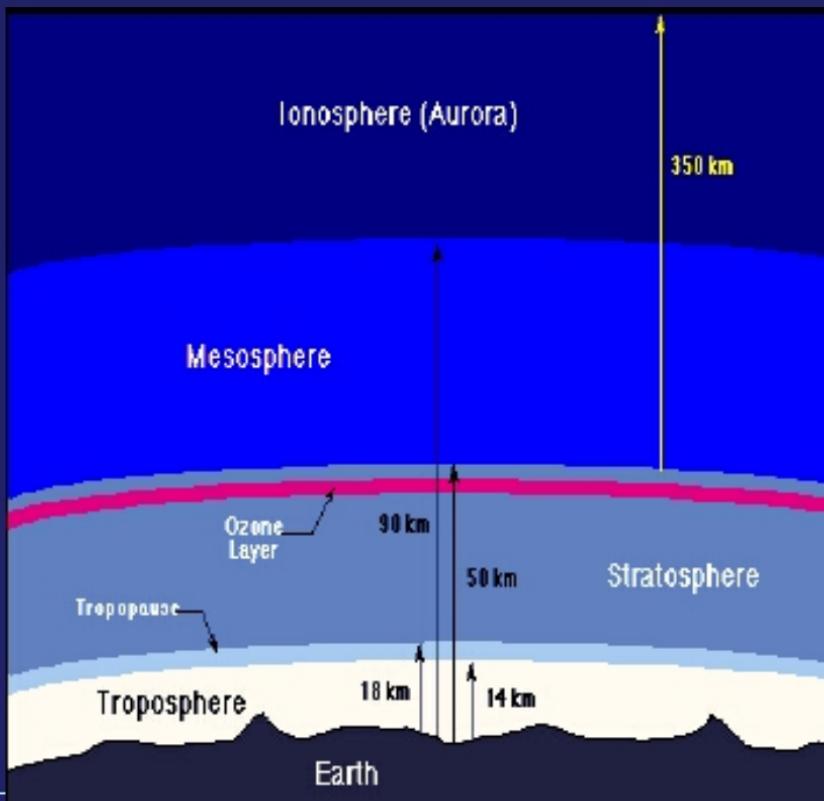
- L'exactitude des orbites radio-diffusées est de l'ordre de 10 mètres (prédites ou extrapolées)
- Les orbites téléchargeables à postériori sont beaucoup plus précises (IGS) car recalculées et sont recommandées pour l'altimétrie de précision et la planimétrie si les vecteurs mesurés sont assez longs, en effet, on modélise le pb ainsi :

$$\frac{db}{b} = \frac{dr}{r}$$



Qualité : Influence de la Ionosphère

- Enveloppe constituée de particules chargées (ions) qui orbitent autour de la Terre entre 50km et 1000km d'altitude
- Signal retardé → mesure de pseudo range trop longue.



Qualité : Influence de la Ionosphère

L'erreur dépend :

- du contenu électronique total (TEC) le long du chemin parcouru par le signal
- de la fréquence du signal et peut dès lors être éliminé en utilisant 2 fréquences

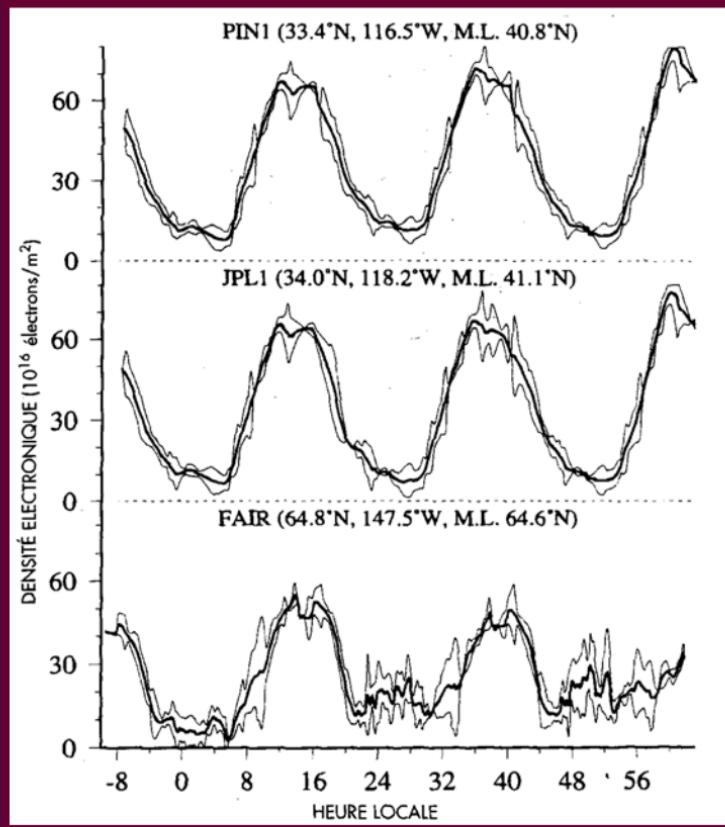
La comparaison du calcul sur chacune donnera une évaluation du délai ionosphérique pour **chaque longueur d'onde**.

→ le système GPS est dit " bicolore "

La majorité des logiciels traitant les données bi-fréquences utilisent la combinaison linéaire de L1 et L2 pour créer L3 qui est appelée la solution '**iono-free**'



Qualité : Influence de la Ionosphère



Des délais + importants apparaissent quand le satellite est à basse altitude, pendant certaines périodes de la journée et ils sont également fonction :

- de la radiation solaire
- de l'équateur géomagnétique
- de la position / pôles.



Qualité : Influence de la troposphère

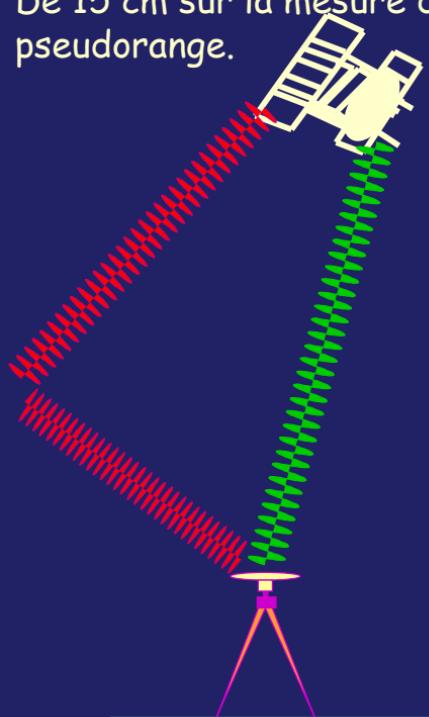
- . Couche basse de l'atmosphère → le milieu est non dispersif
- . Délai dans les observations, qui ne dépend pas de la fréquence.
- . Ne peut donc pas être éliminé par des mesures, mais il peut être modélisé.
- . Dépend du site (cut-off angle) et des conditions météo
- . Vaut environ 2,20 m au zénith et 20 m à 5° de l'horizon.



Qualité : Le problème des multi-trajets

Le multi-trajet est le phénomène par lequel les signaux GPS sont réfléchis sur certains objets avant d'être détecté par l'antenne. Cela se produit lorsqu'il y a des surfaces de réflexion dans le voisinage de l'antenne GPS

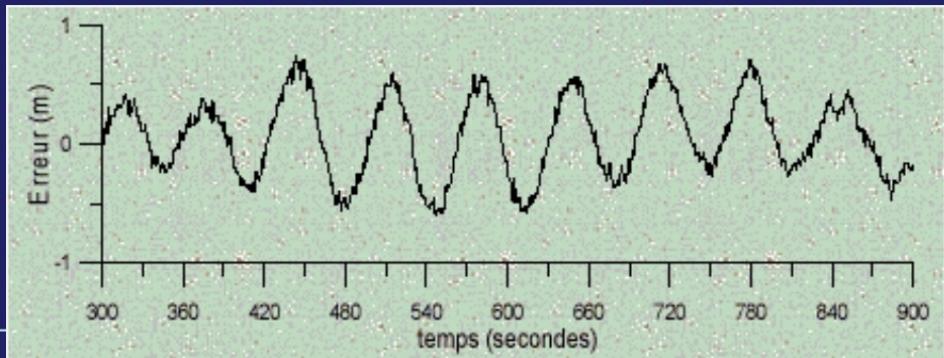
De 15 cm sur la mesure de phase et de l'ordre de 15-20 m sur la mesure de pseudorange.



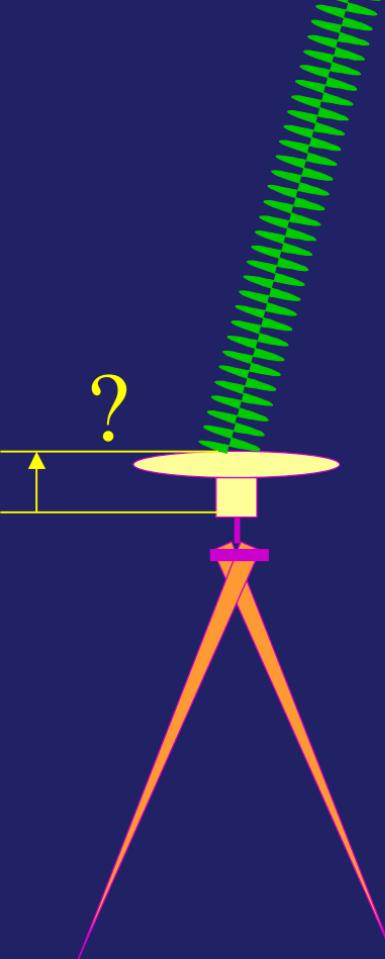
Phénomène cyclique et difficile à corriger

Solutions :

- plan absorbant pour le sol
- éviter les surfaces réfléchissantes
- augmenter la durée des sessions



Qualité : La position du centre de phase des antennes



Selon l 'élévation et l 'azimut du satellite, la position de mesure, au centre de phase de l 'antenne, peut varier.

On utilise toujours les mêmes antennes identifiées et étalonnées, et on oriente toutes les antennes au Nord



Analyse des postes d'erreur

Cause	Conséquence	Solutions
Orbites	exactitude	orbite précise
ionosphère	facteur d'échelle	bifréquence
troposphère	Composante verticale	modèle adaptés estimations de paramètres
multitrajets	perte d'exactitude	augmentation de la durée d'observation
Variation du centre de phase des antennes	perte d'exactitude en altitude (surtout avec des antennes différentes)	Utilisation de cartes de variations de centres de phase



Indicateurs de qualité

- Pour le positionnement absolu instantané, l'exactitude du positionnement dépend de la géométrie de distribution des satellites

$$\sigma_n = nDOP \times \sigma_0$$

avec σ_0 : précision de la mesure

σ_n : précision du positionnement

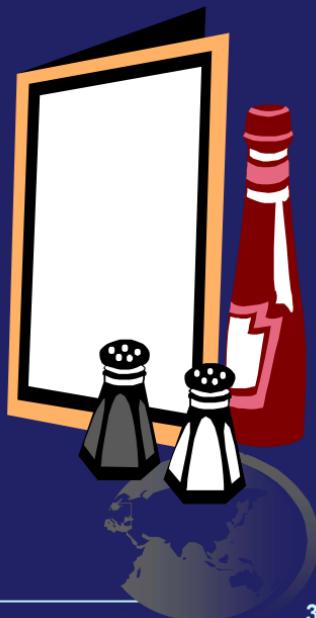
nDOP : facteur de dilution

- n= V : composante verticale, 1D
 - n= H : composante horizontale, 2D
 - n= P : composante position, 3D
 - n= T : composante temps
 - n= G : composante position et temps, 3D+1
- exemple : à un instant donné pour $\sigma_0=10$ et PDOP=7, la précision théorique attendue est de 70m



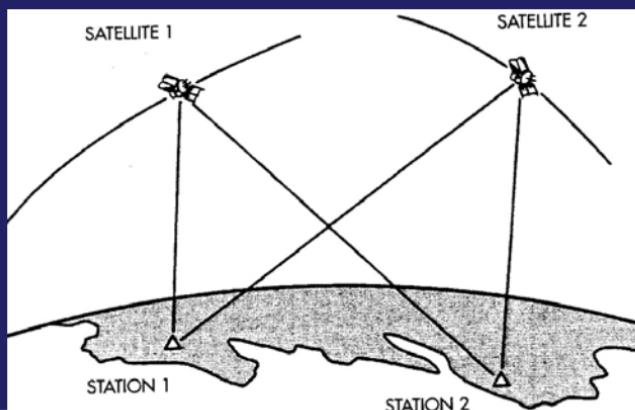
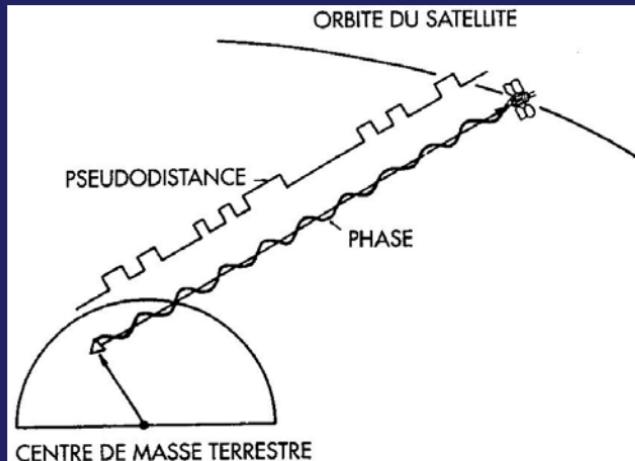
Menu

- Présentation du système
 - Signaux et mesures
 - La qualité
-
- Les modes de positionnement
 - Les réseaux permanents
 - Conception d 'un chantier



Les mesures conditionnent le positionnement

- Positionnement absolu
 - Code C/A
 - Code Y (ou code P)
- Positionnement relatif
 - Code C/A
 - Code Y (ou code P)
 - Phases (L1, L2 ou combinaison)

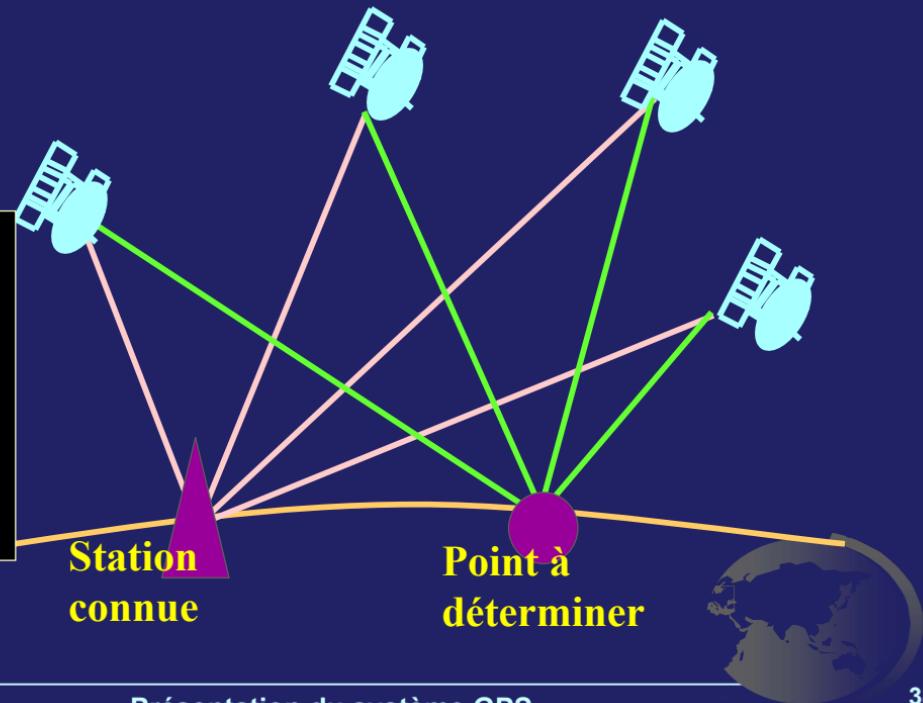


POSITIONNEMENT RELATIF

Précisions relatives

**CODE 1 à 3 m
(DGPS)**

PHASE 1 cm



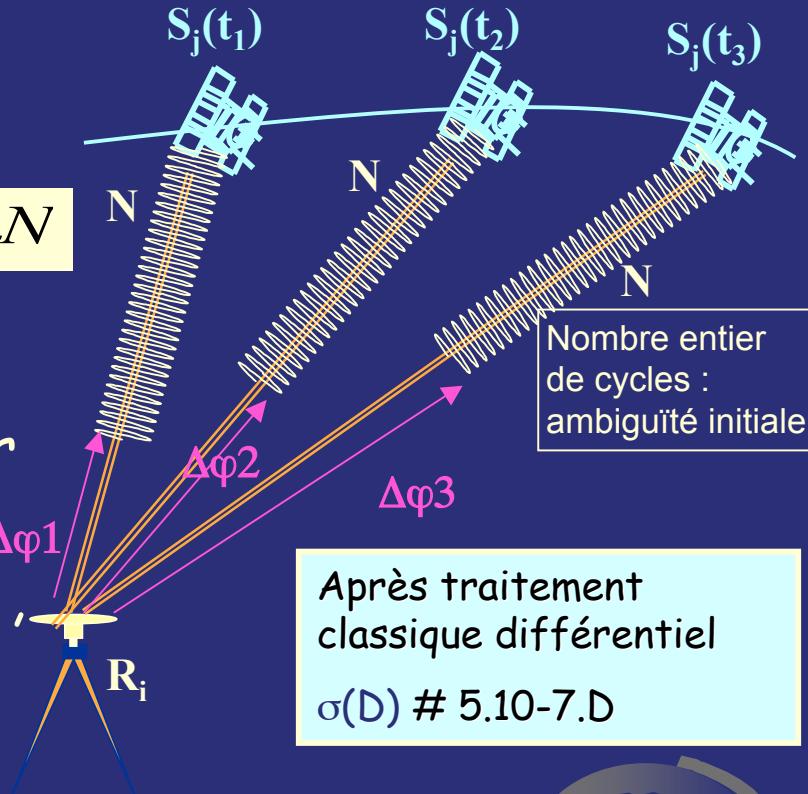
Mesure de phase: ambiguïtés entières

- Si entre t_1 et t_3 , la réception se fait sans interruption, alors N est constant.

$$\lambda\Delta\Phi = c\Delta t + c\partial t_r - c\partial t_s - \lambda N$$

- En tenant compte des biais d'horloge satellite et récepteur estimés au traitement et avec les corrections atmosphériques, on obtient l'équation de la mesure de phase:

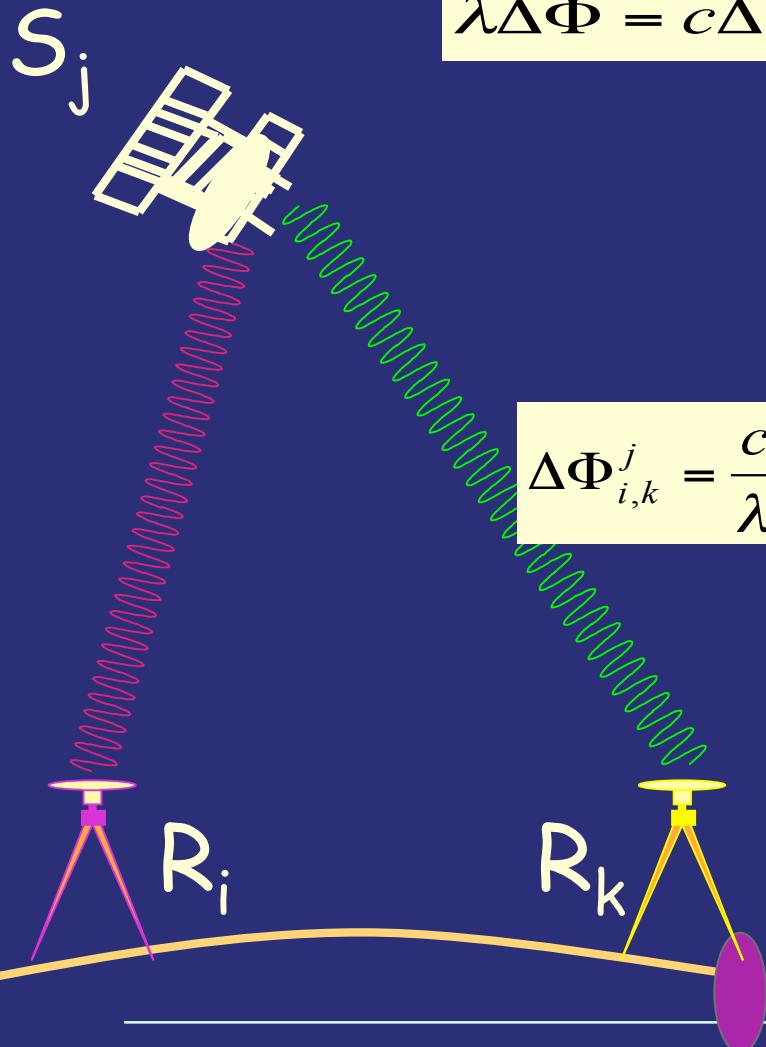
$$\lambda\Delta\Phi = D + c(\partial t_r - \partial t_s) - \lambda N + \Delta D_{iono} + \Delta D_{tropo}$$



Après traitement classique différentiel
 $\sigma(D) \# 5.10^{-7}.D$

La mesure des simples différences

$$\lambda \Delta \Phi = c \Delta t + c \partial t_r - c \partial t_s - \lambda N$$



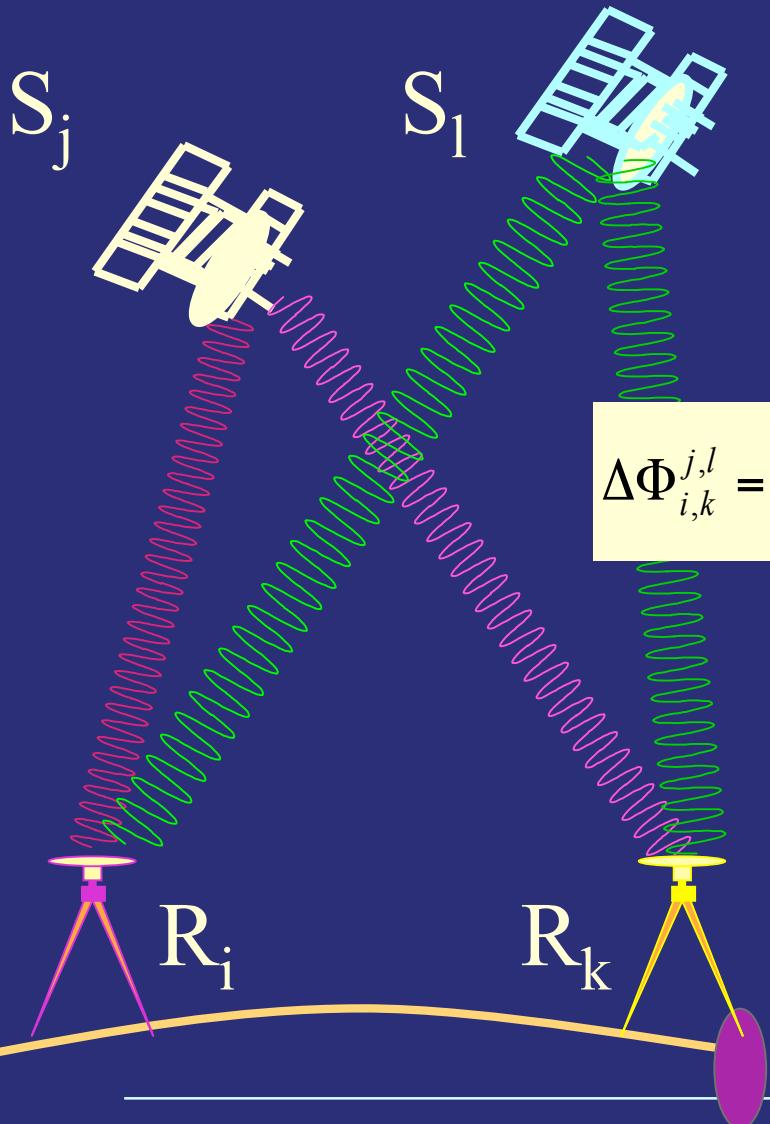
- R_i et R_k observent S_j
- La différence des mesures de phase vaut :

$$\Delta \Phi_{i,k}^j = \frac{c}{\lambda} \Delta t + \frac{c}{\lambda} (\partial t_k - \cancel{\partial t_i} + \cancel{\partial t_j} - \cancel{\partial t_k}) - (N_k^j - N_i^j)$$

- Le décalage d 'horloge **satellite** est éliminé par la simple différence



La mesure des doubles différences



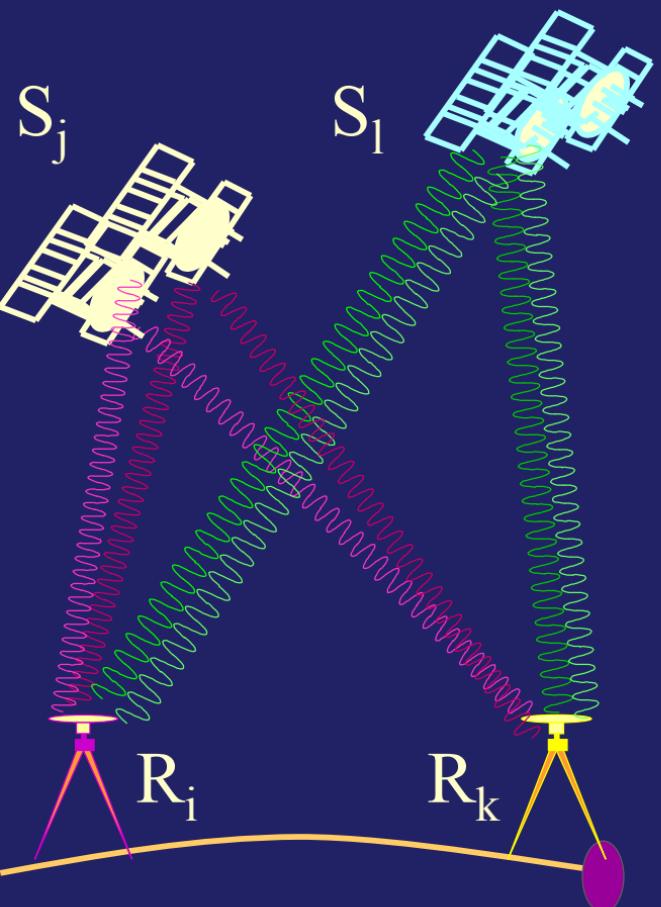
$$\lambda\Delta\Phi = c\Delta t + c\partial t_r - c\partial t_s - \lambda N$$

- R_i et R_k observent S_j et S_l
- La différence des simples différences de phase vaut :

$$\Delta\Phi_{i,k}^{j,l} = \frac{c}{\lambda} (\Delta t_k^l - \Delta t_i^l - \Delta t_k^j + \Delta t_i^j) - (N_k^j - N_k^l - N_i^l - N_i^j)$$

- Le décalage d'horloge récepteur est éliminé par la double différence
- On peut fixer les ambiguïtés à des nombres entiers

La mesure des triples différences



- R_i et R_k observent S_j et S_l à des temps m et n
- On dispose de double-différences à des dates différentes
- On utilise cette solution pour éliminer les sauts de cycles
- Le terme relatif aux ambiguïtés entières a disparu



POSITIONNEMENT RELATIF

GPS Rapide statique

- Phase sur L1, ou L1 et L2
- 15 minutes par point
- Temps différé, avec algorithmes de fixation des ambiguïtés de phase très évolués.
- Radiodiffusées
- 2mm+10⁻⁶D jusqu'à 20 km, en zone tempérée, 10km en zone équatoriale.



POSITIONNEMENT RELATIF

GPS Cinématique

- Phase sur L1
- 10 minutes sur le point de référence, puis quelques secondes par point.
- Orbite Radiodiffusée

Pour le temps différé (PPK) , les ambiguïtés entières de phase sont fixées sur le point de référence, les autres points sont calculés ambiguïtés fixées.
- Pour le Temps réel (RTK) , les matériels incluent :
 - Un soft qui exploite les mesures 'en ligne'
 - À la station de référence , émettre les données sur une liaison sans fil vers le mobile

précision : 2mm+10-6D jusqu 'à 5 km (si réception ☺ ?).
- Possibilités de lever un très grand nombre de points.
- Inconvénient : Les récepteurs mobiles doivent **garder le signal** pendant toute la période du levé.



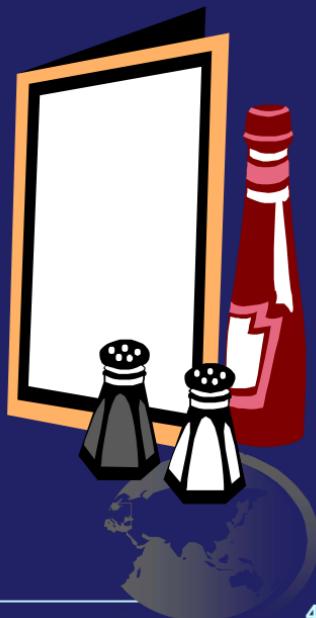
POSITIONNEMENT RELATIF GPS Géodésique bi-fréquence

- type de mesure : phase sur L1 et L2 *ultra-précis*
- temps d 'observation : de 1 heure à plusieurs jours par point.
- type de calcul : temps différé.
- type d 'orbite : précises, disponibles sur un de serveurs internet de l 'IGS.
- précision : $2\text{mm}+10^{-8}\text{D}$ pour qq milliers de km.
- Application : réseau de référence géodésique.



Menu

- Présentation du système
- Signaux et mesures
- La qualité
- Les modes de positionnement
- • Les réseaux permanents
- Conception d 'un chantier



Nécessité des réseaux permanents

Le positionnement précis par GPS nécessite:

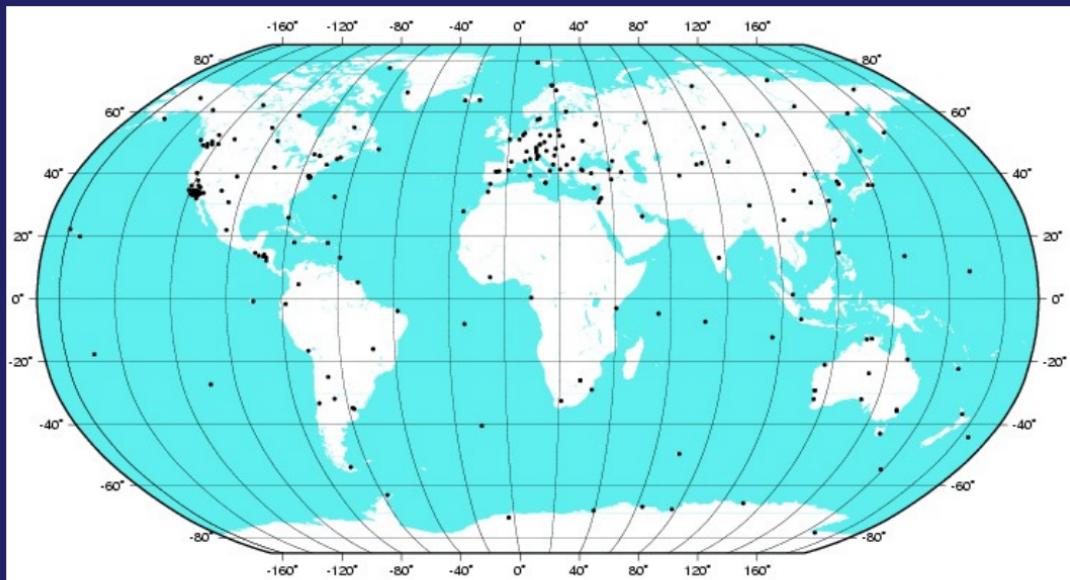
- orbites précises
- modèles de propagation
- paramètres d'orientation de la Terre
- système de référence précis

Le message radiodiffusé ne donne pas accès
à ces éléments avec le niveau de précision requis



Le réseau IGS

- Réseau mondial de stations GPS permanentes
- Solution hebdomadaire
- Participation aux solutions annuelles ITRF
- Éphémérides précises des satellites GPS (position en fonction du temps à quelques cm)



Qu 'est-ce qu 'une station GPS permanente ?



- un monument de support d 'antenne
- un antenne et un recepteur GPS
- un système informatique de gestion,recupération, stockage et diffusion des données
 - un PC éventuellement, sous Windows ou Linux
 - un logiciel de gestion du récepteur
 - une connexion réseau (Internet ou privé)
 - une UPS (pour alimenter PC et récepteur)

Accès à la référence : le RGP



Le Réseau GPS Permanent permet :

- le maintien facile
- l'accès le plus aisé et le plus fiable à la référence RGF93 et ceci au moyen d'un seul récepteur ...

Le matériel d 'une station



Exemples de monumetation



Une antenne d'un réseau permanent

- ✓ Type choke ring, modèle Dorne Margolin



Les « produits » du RGP

Les coordonnées des stations dans la référence nationale :

accès très précis au RGF93 et au NGF

Les observations au format RINEX

Les données compressées

Fichiers de 1h à 1s (disponibles dans l'heure qui suit)

Fichiers de 1h à 30 s

Fichiers de 24 h à 30 s

Disponible sur le web (<http://lareg.ensg.ign.fr>)

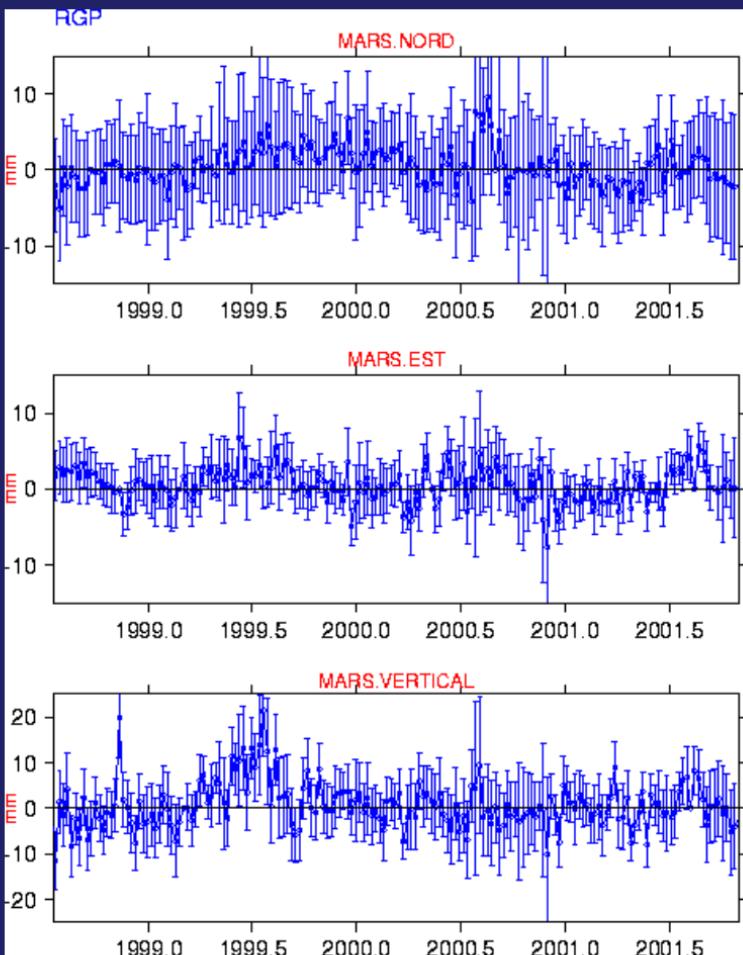
Disponible sur le serveur ftp (<ftp://lareg.ensg.ign.fr/pub/RGP>)

Les séries temporelles

Les modèles ionosphériques et troposphériques

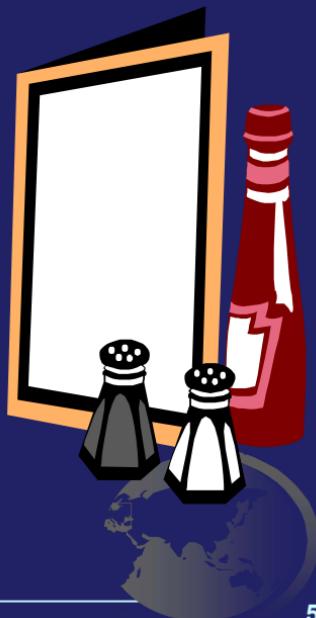


Les séries temporelles



Menu

- Présentation du système
- Signaux et mesures
- La qualité
- Les modes de positionnement
- Les réseaux permanents
- • Conception d 'un chantier



Conception d 'un chantier GPS

L'ETUDE DE FAISABILITE

- **QUESTIONS PRELIMINAIRES**
 - - Nombre de points à stationner
 - - Possibilité d'intégration dans un réseau existant
 - si oui: système de référence et qualité du réseau
 - Précision demandée ?
- 
- - Système de référence des résultats
 - - Connaissance du géoïde
 - - Distance moyenne entre les stations
 - - Croquis des masques
 - - Temps d'accès aux stations
 - - Orientation des stations
 - - Existence de stations permanentes , accès, dispo,...
 - - Connaissance précise des coordonnées de points d'appuis en WGS 84
- 
- 

Conception d'un chantier GPS

DÉROULEMENT DES TRAVAUX

Reconnaissance

Fiches d'accès. Croquis des masques

Matérialisation

Construction

Repères

Canevas d'appui

Fiches signalétiques,
Coordonnées (référentiel)

Mesures

Calculs

Coordonnées d'appui en WGS84

Lignes de base

Compensation libre

Adaptation au canevas

Contrôles à chaque étape

Documentation

Fiches signalétiques des points nouveaux

Rapport

Archivage, Diffusion



Conception d 'un chantier GPS

CHOIX DU SITE

-Pérennité et stabilité similaire aux réseaux classiques

-Intervisibilité inutile

-Meilleur choix pour l'accessibilité

-Orientement GPS

- Dégagé de masques et zones réfléchissantes

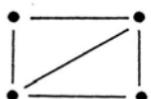
- Eventualité de rattachement au nivellation



Conception d'un chantier GPS

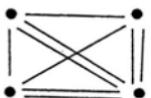
STRATEGIE D'ACQUISITION : LA CHARGE THEORIQUE

Exemple : 4 points à stationner 2x



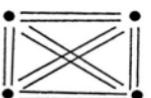
2 réc. => 5 sessions

1 relation directe manque



3 réc. => 3 sessions

3 vecteurs doubles



4 réc. => 2 sessions

6 vecteurs (tous) doubles

Temps de déplacement entre stations
Fenêtre journalière (en milieu urbain)
Durée des sessions d'observation
Obstruction aux stations

=> **Nombre de session par jour (S)**
Nombre de récepteurs (R)
Nombre de points de stations (P)
Facteur de redondance (F)
Facteur de production (Fp)

=> **Estimation de la durée de la mission**

$$J = F^*(P-I)/(Fp*S^*(R-I))$$



Conception d 'un chantier GPS

Outils de test de qualité

```
*****
QC of RnxOBS file(s) : nklg0410.00o
QC of RnxNAV file(s) : nklg0410.00n
*****
```

Freeware TEQC
(Translate/Edit/Quality Check)
de l 'UNAVCO

Conception d'un chantier GPS

ETUDE QUALITATIVE

FACTEURS DE PRECISION DES MESURES :

MATERIEL

Type de récepteur et d'antenne
Logiciel de traitement observations

SYSTEME GPS

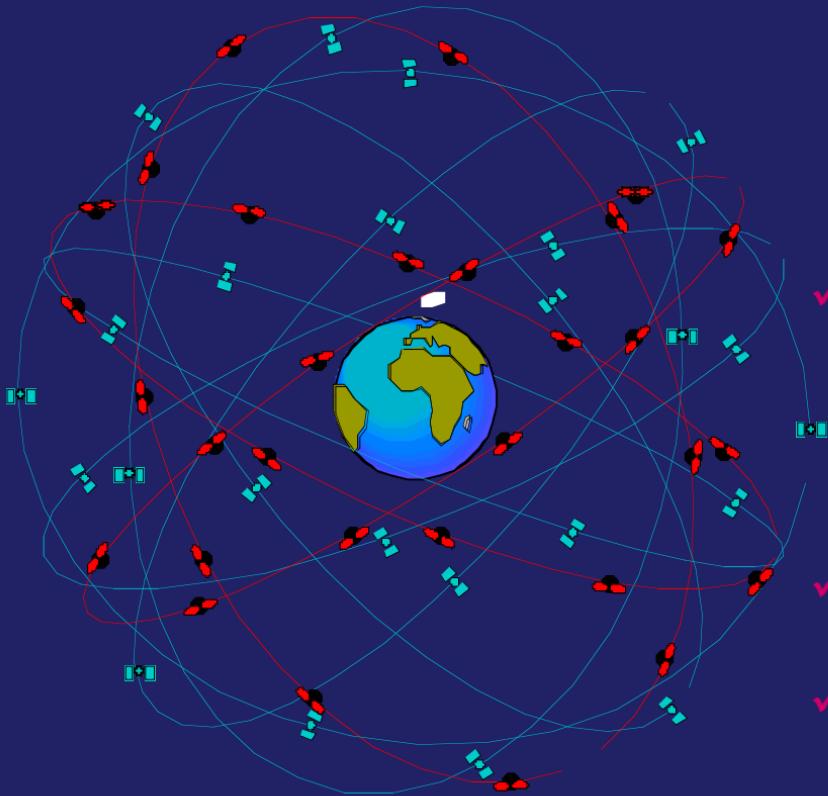
Santé des satellites
Accès sélectif
Distribution et nombre de satellites
Ionosphère
Troposphère
Réflections multiples

MODE OPERATOIRE

Durée des observations
Homogénéité des mesures
Distance entre points
Opérateur :
Centrage
Hauteur d'antenne
Utilisation, protection du récepteur
Contrôle d'alimentation
Mesures météo
Contrôle de l'enregistrement
Paramétrage des mesures



Evolutions



- ✓ Multi constellations (GNSS regroupe GPS, Glonass,etc..)
- ✓ Jusqu'à 60 satellites à terme
- ✓ Augmentations



Initiative du CNES et DGAC ->

EGNOS

Complément Européen au GPS

Mise en service en 2004

Des récepteurs GPS du commerce intègrent déjà les mesures en 2006

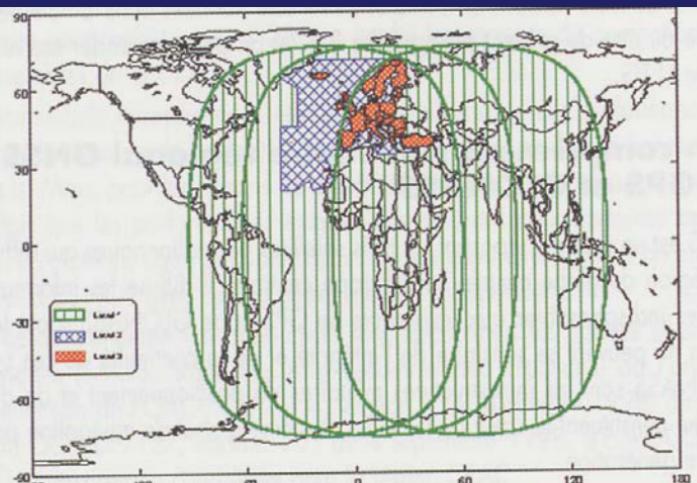
Reste un complément au système américain, avec un signal non protégé

Services :

Niveau 1 : Télémétrie : améliorer la fonction navigation du GPS. Diffusé par satellites géostationnaires (ESA, Inmarsat,...)

Niveau 2 : Intégrité : corrections différentielles d 'horloges et d 'orbites, calculées par le segment sol et diffusées par les satellites d 'EGNOS

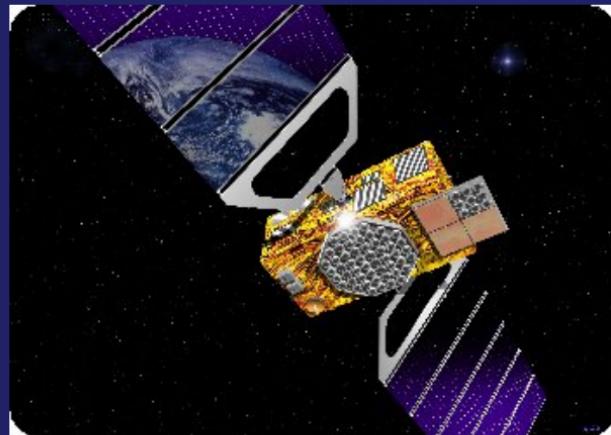
Niveau 3 : Différentiel de précision: Niveau 2 + données iono



L'avenir à moyen terme pour l'Europe: GALILEO

- *Mise à disposition de l'ensemble de la communauté mondiale d'un service de grande précision*

- Initiative de l'Union Européenne =>
 - indépendance technologique
 - mettre fin à une situation de dépendance stratégique



Merci de votre attention !!

