



E N S G
École Nationale
des Sciences
Géographiques

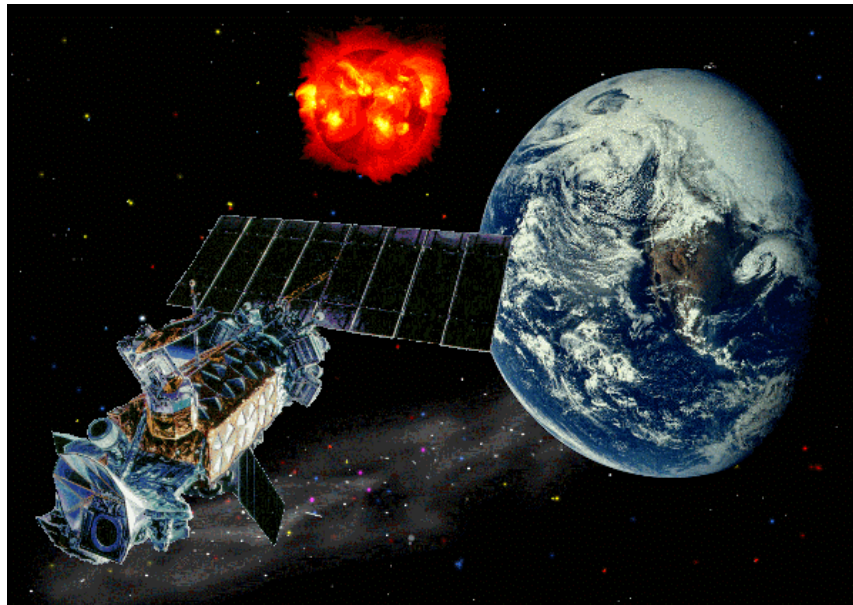
Cours de Géodésie

Chapitre 7

PRESENTATION DU SYSTEME GPS

Version 2.0

01/03/2003



Didier BOUTELOUP

Cellule pédagogique et de recherche en astro-géodésie

Didier.bouteloup@ensg.ign.fr

(33) 01 64 15 31 37

CHAPITRE 7

PRESENTATION DU SYSTEME GPS

1	<i>Présentation générale du système GPS</i>	4
1.1	Introduction	4
1.2	Intérêt du GPS	5
2	<i>Description du système</i>	5
2.1	Le secteur spatial	6
2.1.a	La constellation GPS	6
2.1.b	Numérotation des satellites GPS	7
2.1.c	Constellation finale, trace des satellites	8
2.1.d	Visibilité des satellites GPS à Marne la Vallée, au pôle et à l'équateur	8
2.2	Le secteur de contrôle	10
2.3	Le secteur utilisateur	11
2.3.a	Le service SPS (Standart Positioning Service) :	11
2.3.b	Le service PPS (Precise positioning Service) :	11
3	<i>Structure des signaux GPS</i>	14
3.1	Les différents types de signaux émis	14
3.2	Principe mathématique de la construction du C/A code	15
3.2.a	Principe du code	15
3.2.b	Construction du C/A code	15
3.2.c	Principe de la modulation de la phase par le code	17
3.2.d	Le message de navigation	19
3.3	Dégradations volontaires	20
3.4	Produits obtenus à partir des données GPS	22
3.4.a	Le positionnement absolu	22
3.4.b	Le positionnement relatif	22
3.4.c	Autres produits	22
4	<i>Comment se positionner</i>	24
4.1	Bruit des mesures	24
4.2	Positionnement à l'aide du code	24
4.3	Estimateur de la qualité du positionnement instantané : les DOP (Dilution of Precision)	27
4.4	Positionnement à l'aide de la phase	28
4.5	Relation d'observation de la phase	30
4.5.a	Relation d'observation non différenciée de la phase	30
4.6	La simple différence	30
4.7	La double différence	31

4.8 La triple différence	32
4.8.a Utilisation de la triple différence pour éliminer les sauts de cycles	32
4.9 La fixation des ambiguïtés entières	33
4.9.a Pourquoi et comment fixer les ambiguïtés entières ?	33
5 Analyses des postes d'erreurs	34
5.1 Classement des principaux postes d'erreurs	34
5.2 Les orbites	34
5.3 La troposphère	35
5.3.a Présentation générale	35
5.3.b Modélisation	36
5.3.c Choix des paramètres météorologiques	36
5.4 L'ionosphère	38
5.4.a Présentation générale	38
5.4.b Utilisation de deux fréquences pour éliminer les effets ionosphériques	38
6 Les différents types de positionnements	39
6.1 Positionnement absolu de navigation	39
6.2 La navigation différentielle (DGPS)	39
6.2.a Principe du DGPS	40
6.2.b Systèmes DGPS	41
6.3 Le positionnement géodésique à l'aide de la Phase	42
6.3.a Classification des différents types de positionnement	43
7 GPS perspectives et évolutions	46
8 Les réseaux permanents	47
8.1 L'IGS, International GPS Service for Geodynamics	47
8.1.a Produits de l'IGS	48
8.1.b Les différentes composantes de l'IGS	48
8.1.c Les produits de l'IGS	51
8.2 L'EPN, EUREF Permanent Network	56
8.3 Le RGP, Réseau GPS Permanent	57
8.3.a Le réseau du RGP	58
8.3.b Le traitement des données à l'IGN	59
8.3.c Produits et services associés au RGP	61

1 Présentation générale du système GPS

1.1 Introduction

Le système américain GPS (Global Positioning System) est un système de radio positionnement par satellites. Il a été développé par l'armée américaine (US navy) à partir de 1973 pour ses besoins propres. Il remplace le système TRANSIT qui fut développé à la fin des années 50 et opérationnel jusqu'au milieu des années 80.

Les spécifications de départ en terme de localisation sont les suivantes :

- La position et la vitesse d'un mobile,
 - à tout instant
 - en tout endroit
 - dans un système de référence mondial (appelé WGS84) avec une précision inférieure à 10 m.
- Le temps à une microseconde près dans l'échelle de temps GPS qui a été défini à partir de l'UTC. Au 5 janvier 1980 à minuit, $T_{\text{gps}} = T_{\text{utc}}$. Par contre le temps GPS est linéaire, on a donc aujourd'hui en 2000 un décalage entre GPS et UTC de 19 secondes pleines ($T_{\text{utc}} = T_{\text{gps}} - 19\text{s}$)

De plus sa conception militaire a imposé des contraintes supplémentaires :

- Invulnérabilité du système (satellites en orbites hautes)
- Facilité d'emploi sur le terrain et récepteur indétectable. Pour cela le système est descendant, les satellites transmettent toute l'information nécessaire pour se positionner et les récepteurs sont passifs.

Autre avantage de cette conception, le nombre d'utilisateurs est illimité et anonyme. Il suffit de posséder un récepteur pour obtenir sa position.

Les principales phases de développement sont les suivantes :

- 1973 - 1978 : mise au point du concept, lancement des appels d'offres
- 1978 - 1985 : phase pré-opérationnelle avec lancement de 11 satellites du block I
- 1989 - 1997 : lancement de 28 satellites du block II \ III de la phase opérationnelle.
- Février 1994 : le congrès américain le déclare opérationnel.

Les possibilités offertes en terme de localisation ont fait que la communauté civile scientifique s'est intéressée très rapidement à lui, dès le début des années 80.

Il est aujourd'hui sous le contrôle du département de la défense (DoD) pour les parties, construction des satellites, lancement, contrôle et maintenance. Mais le congrès américain a décidé de développer les utilisations civiles du GPS. En particulier les américains voudraient imposer le système GPS comme seul mode de navigation pour l'aviation civile.

Pour cela de multiples évolutions sont actuellement prévues pour rendre le système plus intègre (voir chapitre GPS, perspectives et évolutions).

1.2 Intérêt du GPS

C'est un système opérationnel pendant au moins 30 ans. La nouvelle génération de satellite devant remplacer celle actuelle, est en cours de construction et leurs lancements sont prévus à partir de 2002.

Il apporte une solution à presque tous les besoins de positionnement et de navigation, sa technologie militaire le rend simple d'emploi, robuste et fiable.

Le GPS a apporté une révolution en géodésie, aujourd'hui l'ensemble des réseaux est réalisé par techniques spatiales et plus particulièrement par GPS. L'avenir est aux réseaux permanents dont les bornes sont remplacées par des récepteurs GPS qui enregistrent des observations 24h/24 et les retransmettent via des lignes de télécommunications à haut débit vers des centres de données. Ceux-ci les mettent à disposition des utilisateurs potentiels le plus rapidement possible (voir chapitre sur les réseaux permanents).

Dans le domaine de la topométrie, le GPS a aussi apporté une évolution conséquente. Les méthodes rapides de levées telles que le rapide statique ou le cinématique temps réel (voir chapitre sur les différents types de localisation) s'imposent de plus en plus.

La localisation avec une précision submétrique, autrefois difficilement réalisable, est aujourd'hui largement facilitée par le GPS et de nombreuses applications apparaissent entre autre dans le domaine des SIG, de l'agriculture de précision et des transports.

Une forte pression de la part des américains s'exerce sur l'aviation civile afin d'imposer le GPS comme unique système de navigation. Pour cela il faut rendre le GPS beaucoup plus intègre qu'il ne l'est aujourd'hui, c'est pour cela que les américains ont décidé de faire évoluer le GPS dans les années prochaines (voir chapitre GPS, perspectives et évolutions).

Enfin le GPS est devenu pour les marins, pour les aviateurs et de nombreux randonneurs un outil indispensable.

2 Description du système

Comme pour l'ensemble des systèmes spatiaux, nous présenterons le GPS sous la forme de trois secteurs :

- Le secteur spatial
- Le secteur de contrôle
- Le secteur utilisateur

-

2.1 Le secteur spatial

2.1.a La constellation GPS

La constellation compte aujourd'hui 27 satellites du block II. Ce sont des satellites qui ont été lancés en 1989 et 1997. Ces satellites sont équipés de façon à pouvoir activer les dégradations volontaires. Ils ont une durée de vie nominale de 7,5 ans.

Leurs orbites sont :

- quasi circulaires
- de rayon 26 500 km (soit à une altitude d'environ 20 200km)
- de période égale à environ 11h 58 heures.

Ils sont répartis dans six plans inclinés de 55° par rapport à l'équateur. Cette inclinaison a été choisie afin d'optimiser la qualité de la constellation au-dessus des USA. Par contre dans les zones polaires les satellites sont très bas sur l'horizon, ce qui rend le positionnement plus difficile.

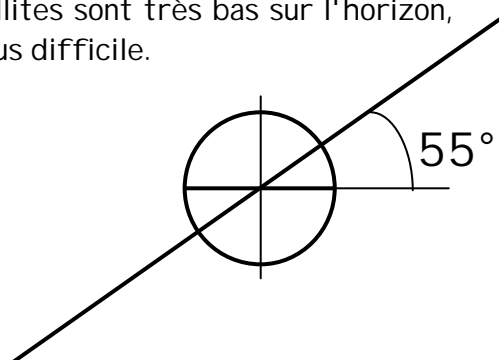


Fig. 1 : inclinaison des plans orbitaux par rapport à l'équateur

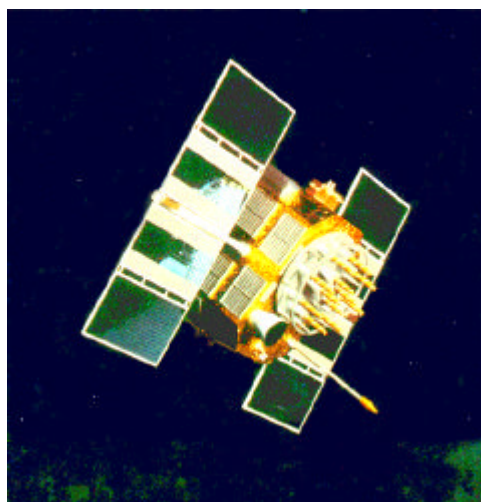


Fig. 2 : satellite GPS



Fig. 3 : constellation GPS

Masse en orbite ~816 kg, Panneaux solaire ~7.5 m²

2.1.b Numérotation des satellites GPS

Plusieurs numérotations des satellites GPS cohabitent.

- La numérotation du type Space Vehicule (SV) qui correspond à l'ordre de lancement des satellites
- Le numéro PRN (Pseudo Range Noise) qui est celui que contient le message de navigation et qui est le plus souvent utilisé par les récepteurs et les logiciels calculs,
- La numérotation dans le catalogue de la NASA
- La numérotation internationale.

Dans le tableau ci-dessous apparaît la liste des satellites en fonctionnement en septembre 2000.

Satellite du block II	Date de lancement	Satellite du block II	Date de lancement
2	Juin 89	28 (hors service)	Avril 92
14	Février 89	29	Décembre 92
15	Octobre 89	31	Mars 93

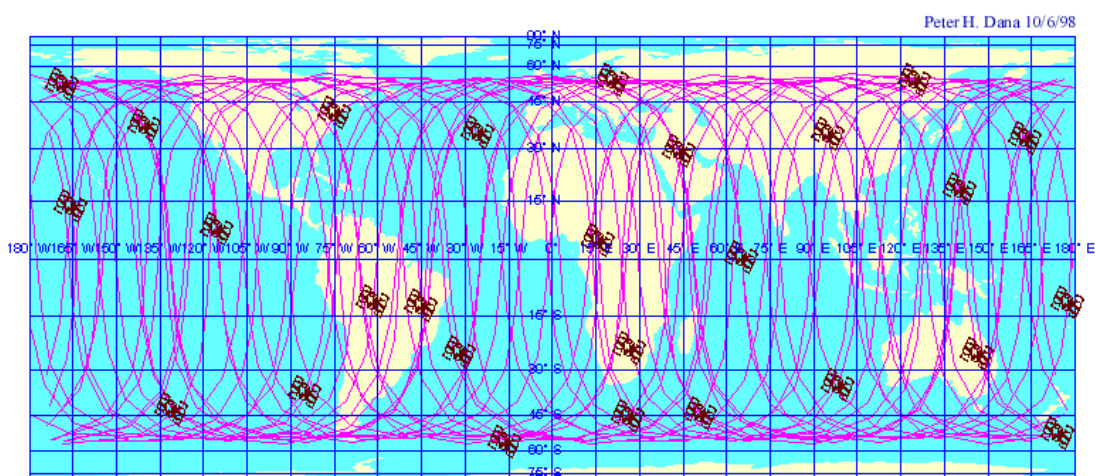
Satellite du block II	Date de lancement	Satellite du block II	Date de lancement
16	Août 89	01	Novembre 92
17	Décembre 89	04	Octobre 93
18	Janvier 90	05	Août 93
19	Octobre 89	06	Mars 94
20	Mars 90	07	Mai 93
21	Août 90	09	Juin 93
22	Février 93	03	Septembre 96
23	Novembre 90	10	Juillet 96
24	Juillet 92	30	Mars 96
24	Février 92	13	Juillet 97
26	Juillet 92	26	Juillet 92
27	Septembre 92		

Tab. 1 : liste des satellites au 1/ 01/2001

2.1.c Constellation finale, trace des satellites

La trace d'un satellite correspond au report sur la carte des points de passage du satellite au zénith.

Voici la trace de la constellation finale sur l'ensemble de la Terre, pour une période de 24 heures soit 2 orbites par satellites.



Global Positioning System Satellites and Orbits
for 27 Operational Satellites on September 29, 1998
Satellite Positions at 00:00:00 9/29/98 with 24 hours (2 orbits) of Ground Tracks to 00:00:00 9/30/98

Fig. 4 : trace des satellites GPS

2.1.d Visibilité des satellites GPS à Marne la Vallée, au pôle et à l'équateur

Voici en projection stéréographique la demi-sphère représentant le ciel au-dessus de Marne la Vallée du pôle nord et de l'équateur et le passage des satellites durant 24 heures.

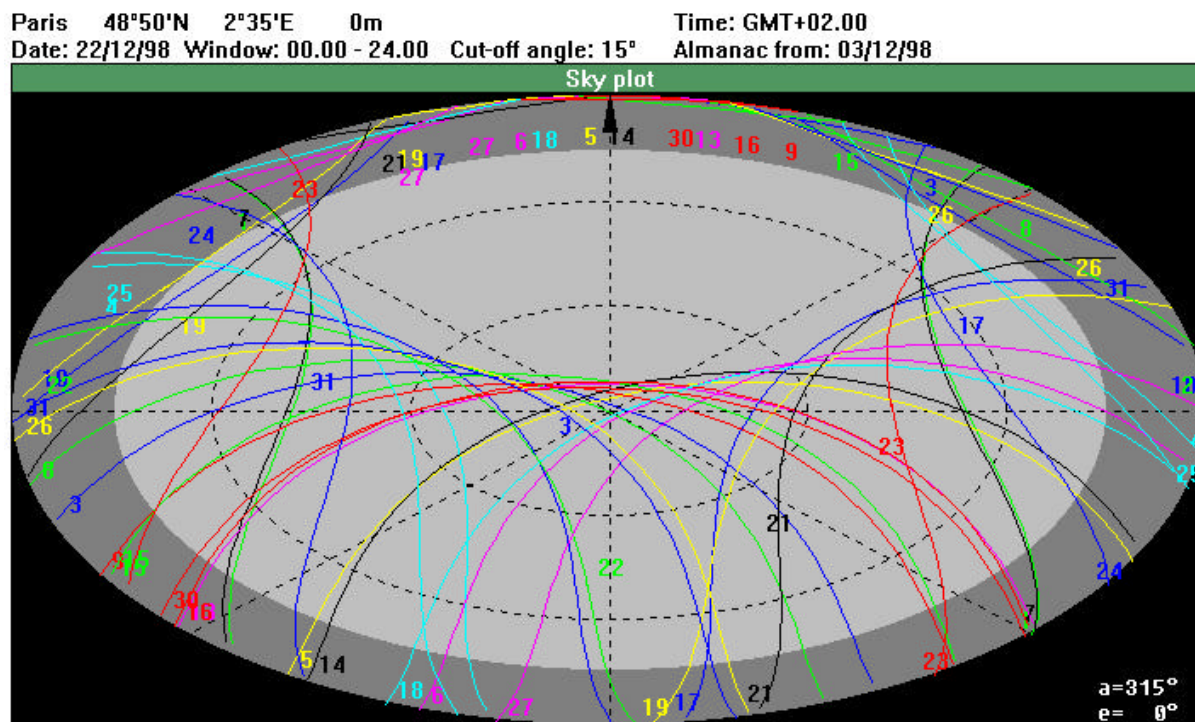


Fig. 5 : visibilité des satellites au-dessus de l'ENSG à Marne la Vallée

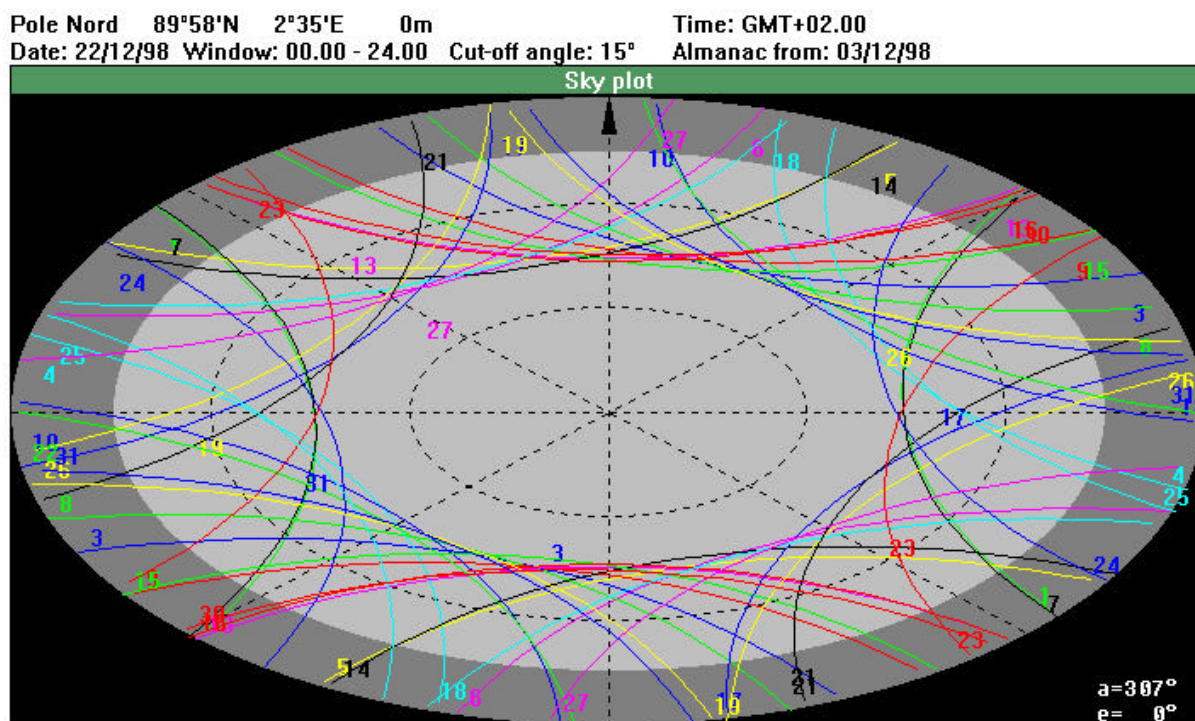


Fig. 6 visibilité des satellites au-dessus du pôle nord

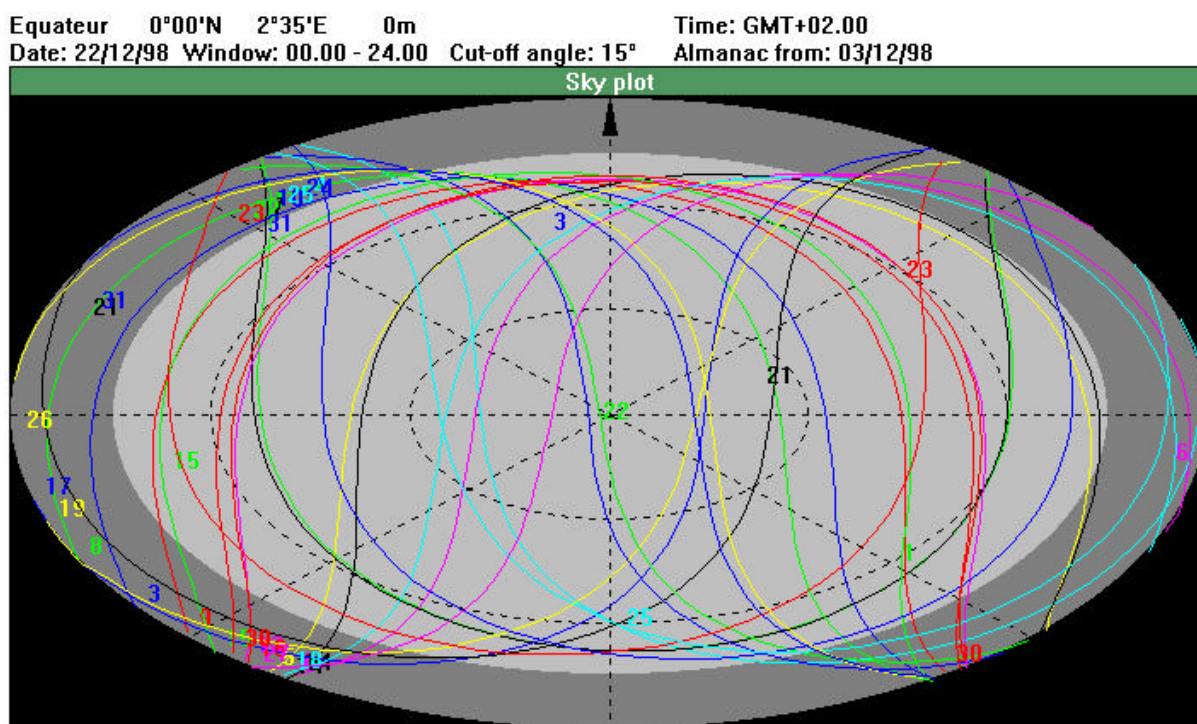


Fig. 7 : visibilité des satellites au-dessus de l'équateur

L'inclinaison de 55 degrés des orbites par rapport à l'équateur fait apparaître dans le ciel une zone non couverte par le passage des satellites. A la latitude de la France, celle-ci se trouve au nord. En conséquence un masque au nord ne perturbera pas la réception des signaux GPS. Par contre la visibilité des satellites GPS au pôle Nord montre toute la difficulté de faire du GPS dans les zones extrêmes nord ou sud de la Terre. La faible élévation des satellites rend le positionnement difficile.

2.2 Le secteur de contrôle

Le secteur de contrôle dépend de l'armée américaine et doit maintenir en permanence le système GPS opérationnel. Pour cela 5 stations de poursuites observent 24h/ 24 les satellites GPS, contrôlent et modifient si besoin leurs trajectoires et leurs transmettent les informations qui seront diffusées par le message de navigation.

Les cinq stations sont Colorado Spring (la station principale), Ascension, Diego Garcia, Kwajalein et Hawaii.

Colorado Spring est la station maîtresse, c'est entre autres ici que le temps GPS est généré.

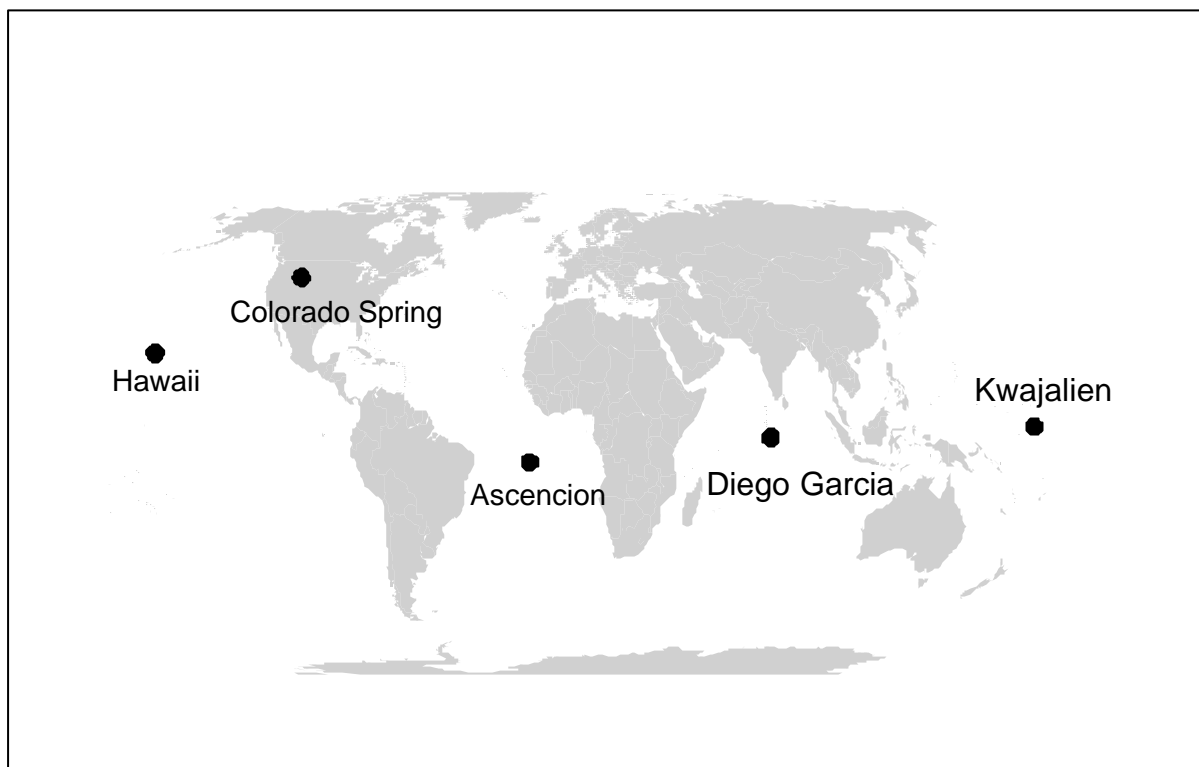


Fig. 8 : carte des stations du secteur de contrôle

2.3 Le secteur utilisateur

Il représente l'ensemble des utilisateurs du système GPS.

En mode navigation (souvent appelé "mode naturel"), on distingue deux types de service:

2.3.a Le service SPS (Standart Positioning Service) :

Tous les utilisateurs disposant d'un récepteur GPS y ont accès. Ce mode est gratuit et anonyme, les Américains n'ont actuellement aucune possibilité de connaître le nombre d'utilisateurs ni de les identifier.

Par contre les utilisateurs sont soumis aux dégradations volontaires imposées par les Américains. Deux types de dégradations existent :

- la SA (Selective Availability) accès sélectif en français, qui consiste à dégrader les performances nominales du système et qui **n'est plus active depuis le 2 mai 2000**.
- L'A.S. (antispoofing) anti leurage en français, qui consiste à rendre inconnu une partie des informations transmises afin qu'elles ne puissent être reproduites. Concrètement le P code originel est remplacé par le Y code inconnu.



2.3.b Le service PPS (Precise positioning Service) :

Il est réservé aux militaires américains et leurs alliés et consiste en l'utilisation de clés de décodage permettant d'éliminer les dégradations volontaires (SA et AS).

Il existe aujourd'hui de nombreux constructeurs de récepteur de navigation. Leur prix n'a cessé de baisser et leur encombrement de se réduire. Aujourd'hui il est possible de trouver des appareils d'entrée de gamme à environ 900 francs.

Par contre le marché des récepteurs destinés à des applications centimétriques est beaucoup plus restreint et la liste des principaux constructeurs de ce type de récepteurs est la suivante :

Constructeurs	Adresses Internet	Produits
ASHTECH (USA)	http://www.ashtech.com	
DSNP (France)	http://www.dsnp.com	
JAVAD (USA)	http://www.orbitica.com/gps/java d.htm	
ROGUE (USA)	http://rogueweb.jpl.nasa.gov/	
LEICA-WILD (Suisse)	http://www.leica.com	

Constructeurs	Adresses Internet	Produits
NOVATEL (Canada)	http://www.novatel.ca/	
TRIMBLE (USA)	http://www.trimble.com	
SPECTRA- PRECISION (Suède) racheté par Trimble	http://spectraprecision.com	
ZEISS (Allemagne) racheté par Trimble		

3 Structure des signaux GPS

3.1 Les différents types de signaux émis

Chaque satellite possède plusieurs horloges atomiques ce qui permet d'assurer aux signaux générés une grande stabilité. La précision des horloges internes est de l'ordre de 10^{-12} à $10^{-13} \left(\frac{dt}{t} \right)$ sur un jour.

Pour l'ensemble des satellites la fréquence fondamentale est $f_0 = 10,23 \text{ Mhz}$

A partir de la fréquence fondamentale, chaque satellite génère deux ondes porteuses qui seront modulées par des codes pseudo aléatoires et qui seront transmis en direction de la Terre. Ce sont ces ondes ainsi que les informations qu'ils véhiculent qui permettront de se positionner.

Ces deux ondes porteuses sont :

$L1 = 154.f_0 = 1575,42 \text{ Mhz}$ (longueur d'onde d'environ **19.05 cm**)

$L2 = 120.f_0 = 1227,60 \text{ Mhz}$ (longueur d'onde d'environ **24.45 cm**)

Le système GPS comme presque tous les systèmes de radio positionnement par satellite émettent sur deux fréquences. Cela permet d'éliminer les effets de l'ionosphère (voir chapitre postes d'erreurs).

Elles sont modulées par des codes pseudo aléatoires, qui sont les suivants :

Le C/A code est une série pseudo aléatoire de ± 1 définie d'une façon déterministe par une fonction mathématique de période 1ms à une fréquence de $f_0/10 = 1,023 \text{ Mhz}$. La courte période de ce signal permet au récepteur une acquisition rapide des satellites. Un code spécifique est attribué à chaque satellite afin que le récepteur puisse les identifier d'une façon univoque. Le C/A code n'est transmis que sur L1 et n'est pas crypté.

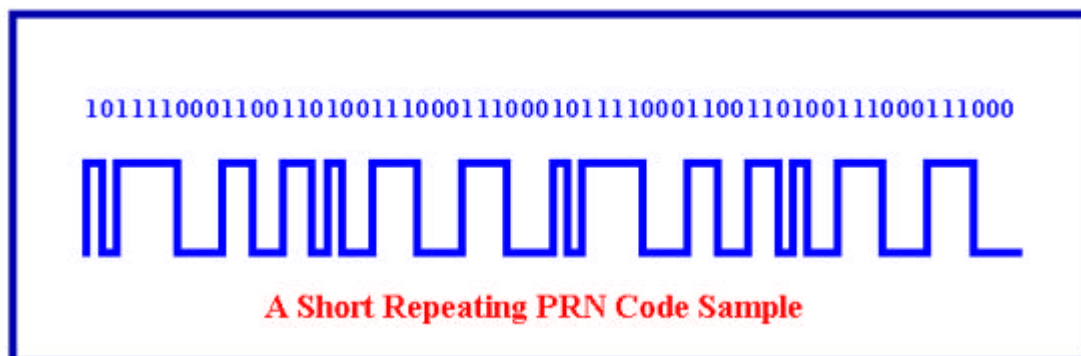


Fig. 9 : exemple d'un morceau de code

Le P code est une série pseudo aléatoire de période 267 jours et de fréquence $f_0 = 10,23 \text{ Mhz}$. Il est modulé sur les deux fréquences L1 et L2. Afin de ne pas se faire leurrer, les

militaires américains ont remplacé le P code par le Y code. Ses caractéristiques sont inconnues et il est donc impossible de le reproduire. Ce code n'est accessible qu'aux utilisateurs possédant des clés de décryptage comme l'armée américaine et certains de ses alliées.

Le message de navigation, de fréquence de 50 Hz est modulé sur les deux fréquences. Ce message contient les informations spécifiques au satellite ainsi que des données communes à l'ensemble des satellites et des informations générales sur le système (voir paragraphe suivant).

3.2 Principe mathématique de la construction du C/A code

La création du code par le satellite GPS se fait à l'aide par des sommes modulo 2 de vecteurs à 10 colonnes.

3.2.a Principe du code

On initialise arbitrairement un vecteur de N colonnes, par des 0 et des 1 exclusivement.

Exemple :

$$CA0 = [0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0]$$

On choisit les colonnes qui seront sommées modulo 2, par exemple 3 et 10.

Cette somme donne dans notre cas donne $CA0(3) \oplus CA0(10) = 1 \oplus 1 = 0$

Puis l'on génère un nouveau vecteur tel que $CA1(2:10) = CA0(1:9)$ et

$$CA1(1) = CA0(3) \oplus CA0(10)$$

On obtient donc

$$CA1 = [CA1(1) \ CA0(1) \ CA0(2) \ CA0(3) \ CA0(4) \ CA0(5) \ CA0(6) \ CA0(7) \ CA0(8) \ CA0(9)]$$

numériquement cela donne :

$$CA1 = [1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1]$$

Puis l'on boucle $CA2(2:10) = CA1(1:9)$ et $CA2(1) = CA1(3) \oplus CA1(10)$

Le Code est obtenu en prenant dans chaque vecteur le dernier élément :

$$\text{Donc } CODE = [CA0(10) \ CA1(10) \ CA2(10) \ \dots \ CA_M(10)]$$

Ce code est bien une série de 0 et de 1. On montre mathématiquement qu'après un certain nombre d'itération on retrouve le vecteur initial et donc que le signal a une longueur M finie, qui est donnée par la formule $2^N - 1$. Il suffit alors de connaître l'état initial et la multiplication pour le générer de nouveau.

3.2.b Construction du C/A code

Le C/A code est construit à partir de 2 séquences définies plus haut, une séquence commune à tous les satellites et une séquence spécifique à chaque satellite. Ces séquences sont connues de tous les utilisateurs.

Séquence commune

Vecteur initial : $VCA0 = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1]$

Somme modulo 2 : colonnes 3, 10

Ceci permet de générer 1023 vecteurs communs à tous les satellites dont on ne retiendra que les derniers éléments $VCA0(10) \dots VCA1022(10)$

Vecteur initial : $VCB0 = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1]$

Somme modulo 2 : colonnes $2 \oplus 3 \oplus 6 \oplus 8 \oplus 9 \oplus 10$

Ceci permet de générer 1023 vecteurs également communs à tous les satellites $VCB0 \dots VCB1022$

Séquence spécifique

Le code final est obtenu par addition modulo 2 du dixième élément de VCA_i et de la somme modulo 2 de 2 éléments spécifiques à chaque satellite du vecteur VCB_i :

$$CAF = [VCA0(10) \oplus (VCB0(X1) \oplus VCB0(X2)) \ VCA1(10) \oplus (VCB1(X1) \oplus VCB1(X2)) \ \dots \ VCA1022(10) \oplus (VCB1022(X1) \oplus VCB1022(X2))]$$

Avec :

Sat. id	$X1 \oplus X2$	Sat id	$X1 \oplus X2$	Sat id	$X1 \oplus X2$	Sat id	$X1 \oplus X2$	Sat id	$A \oplus B$
1	$2 \oplus 6$	9	$3 \oplus 10$	17	$1 \oplus 4$	25	$5 \oplus 7$	33	$5 \oplus 10$
2	$3 \oplus 7$	10	$2 \oplus 3$	18	$2 \oplus 5$	26	$6 \oplus 8$	34	$4 \oplus 10$
3	$4 \oplus 8$	11	$3 \oplus 4$	19	$3 \oplus 6$	27	$7 \oplus 9$	35	$1 \oplus 7$
4	$5 \oplus 9$	12	$5 \oplus 6$	20	$4 \oplus 7$	28	$8 \oplus 10$	36	$2 \oplus 8$
5	$1 \oplus 9$	13	$6 \oplus 7$	21	$5 \oplus 8$	29	$1 \oplus 6$	37	$4 \oplus 10$
6	$2 \oplus 10$	14	$7 \oplus 8$	22	$6 \oplus 9$	30	$2 \oplus 7$		
7	$1 \oplus 8$	15	$8 \oplus 9$	23	$1 \oplus 3$	31	$3 \oplus 8$		
8	$2 \oplus 9$	16	$9 \oplus 10$	24	$4 \oplus 6$	32	$4 \oplus 9$		

Dans notre cas la longueur de la séquence obtenue est de $2^{10} - 1 = 1023$.

La fréquence du C/A code est de 1,023 Mhz, ce qui correspond à une durée totale du C/A

code est de $\frac{1023}{1,023 \times 10^6} = 1 \text{ ms}$.

La construction du P code et du code Y repose sur la même technique.

3.2.c Principe de la modulation de la phase par le code

Les signaux de type code ne peuvent être directement diffusés par satellites car ils ne répondent pas aux lois de propagations électromagnétiques. Il faut pour transmettre les informations de ce type les faire voyager au moyen d'une onde sinusoïdale pure appelée onde porteuse. Ces ondes L1 et L2 sont elles mêmes décomposées en deux ondes émises en quadrature (déphasage de 90°) puis modulées par les signaux C/A et D ou P et D. La modulation consiste à augmenter la phase de 180° à chaque changement de parité du code transporté.

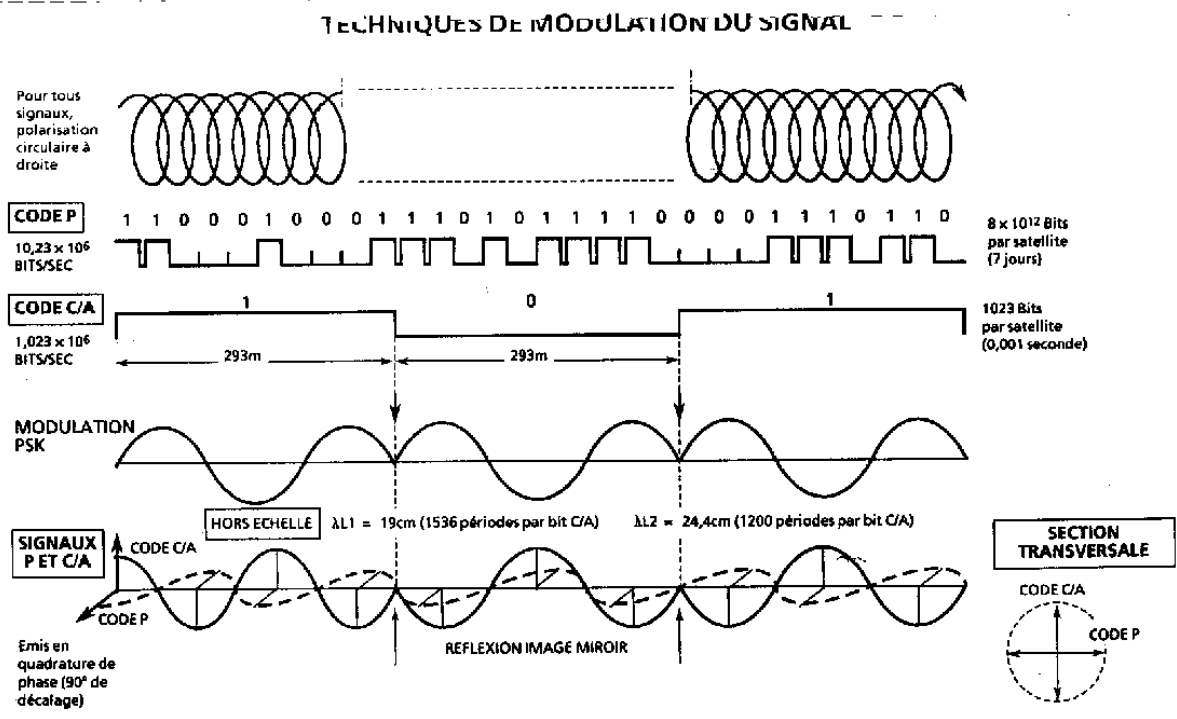


Fig. 10 : construction des signaux.

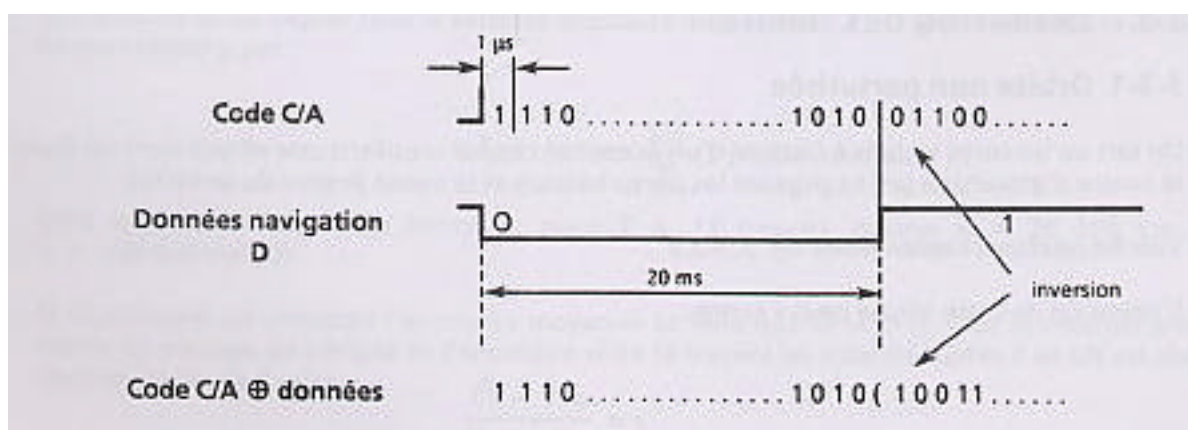
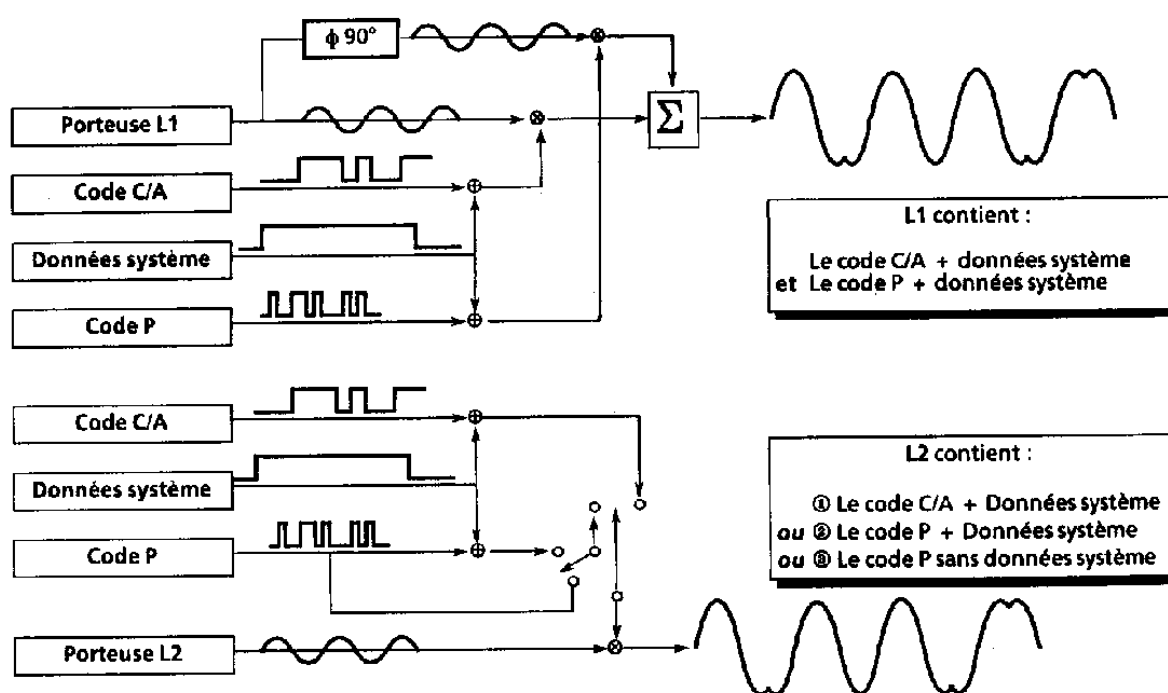


Fig. 11 : addition modulo 2 (ou exclusif)

L'équation finale du signal L1 émis pour le satellite i est la suivante :

$$L1_i(t) = Ap \times [P_i(t) \oplus D_i(t)] \times \cos(\omega_1(t) + \Phi) + Ag \times [C/A_i(t) \oplus D_i(t)] \times \sin(\omega_1(t) + \Phi)$$

ou :

- Ap et Ag sont les amplitudes relatives des deux signaux
- $C/A_i(t)$ une partie de la séquence de code C/A (série de +1 et -1)
- $p_i(t)$ une partie de la séquence de code P (série de +1 et -1)
- $D_i(t)$ les données du message de navigation

- $\omega_1(t) = 2\pi f_1$ vitesse angulaire de la porteuse L1

Le signal L2 est modulé uniquement par la deuxième fréquence et le message de navigation et est de la forme:

$$L2_i(t) = A_p \times [P_i(t) \oplus D_i(t)] \times \cos(\omega_2(t) + \Phi)$$

Il faut noter que les diverses modulations sont possible grâce à une parfaite synchronisation des différents signaux. Ceci est obtenu par une multiplication de rapport entier de la fréquence fondamentale $f_0 = 10,23$ Mhz

- 10.23 MHz \times 1 = 10.23 Mhz Horloge code P
- 10.23 MHz \div 10 = 1.023 Mhz Horloge code C/A
- 10.23 MHz \times 154 = 1575.42 Mhz Horloge fréquence L1
- 10.23 MHz \times 120 = 1227.60 Mhz Horloge fréquence L2
- 10.23 MHz \div 204600 = 50 hz message de navigation

3.2.d Le message de navigation

Le message de navigation contient les informations suivantes :

- Une indication de temps, la semaine GPS et le moment dans la semaine GPS que les récepteurs utilisent pour synchroniser en première approximation leur horloge interne
- Les corrections d'horloge du satellite, qui permettent mathématiquement à l'aide d'un polynôme d'ordre 2 de convertir le temps satellite dans l'échelle de temps GPS
- les éphémérides du satellite
- un modèle mondial d'ionosphère
- la différence UTC et temps GPS
- les almanachs de l'ensemble des satellites opérationnels, ce sont des éphémérides et des corrections d'horloges dégradées. Les récepteurs les utilisent pour connaître approximativement la position des satellites dans le ciel, ce qui leur permet de les capter plus facilement et plus rapidement. Ils sont aussi utilisés par les logiciels pour les prédictions de passages de satellites en un lieu donné.

Les informations spécifiques à chaque satellite, comme les corrections d'horloge et les éphémérides des satellites, sont transmises en totalité toutes les 30 secondes sur une période de 18 secondes.

Le message de navigation est, quant à lui, transmis dans sa totalité en 12 minutes et 30 secondes.

Sa construction est la suivante :

Il se comporte de 25 "phrases" de 1500 bits d'informations à la fréquence de 50 hz. Chaque phrase est donc émise en 30 secondes.

Chaque "phrase" est divisée en 5 "sous-phrases" de 300 bits chacune émises en 6 secondes.

Contenu de la phrase 1	Corrections d'horloge	Ephémérides	éphémérides	Iono / UTC / almanachs	Iono / UTC / almanachs
Durée totale 30 s	6 sec	6 sec	6 sec	6 sec	6 sec
•					
•					
•					
Contenu de la phrase 1	Corrections d'horloge	Ephémérides	éphémérides	Iono / UTC / almanachs	Iono / UTC / almanachs
Durée totale 30 s	6 sec	6 sec	6 sec	6 sec	6 sec

} Nombre de phrases 25, pour une durée de 12,5 minutes

Fig. 12 : schéma de la construction du message de navigation

Les sous-phrases non grisées contiennent les informations spécifiques au satellite, qui sont répétées dans toutes les phrases. Les sous-phrases grisées contiennent les informations générales dont le contenu change à chaque phrase et est transmis en totalité en 12,5 minutes.

3.3 Dégradations volontaires

Il existe deux dégradations volontaires du système GPS. Elles sont sous le contrôle des militaires américains et sont activées sur ordre du congrès américain.

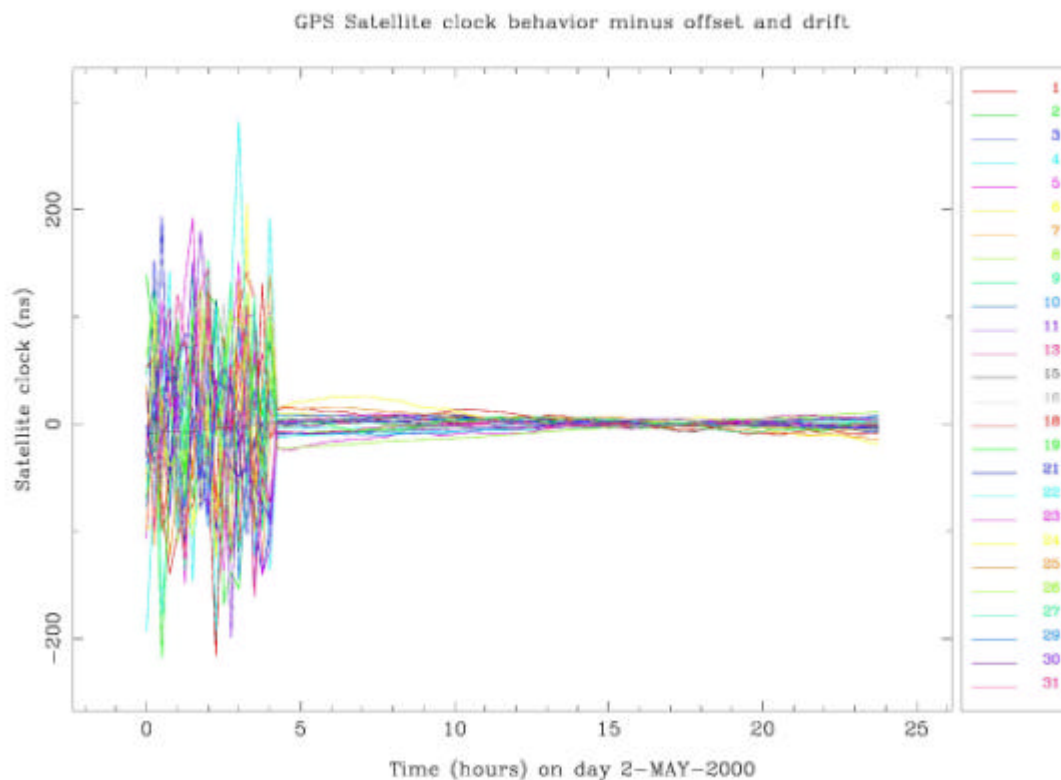
Nous avons :

- **La S.A. : Selective Availability** (accès sélectif), **désactivée depuis le 2 mai 2000**

Le but de cette dégradation est d'interdire aux utilisateurs non autorisés d'avoir la qualité nominale du système pour le positionnement.

Pour cela, les militaires américains peuvent dégrader des éléments d'orbites et d'horloges dans le message de navigation et/ou dégrader la fréquence des horloges des satellites par ajout d'un bruit blanc.

Cette dégradation a été désactivée sur l'ensemble des satellites le 2 mai 2000.



- **L'A.S. : Anti Spoofing (anti-leurrage)**

L'A.S. est une protection destinée à éviter le leurrage du système GPS par un utilisateur qui enverrait un signal proche du signal GPS pour créer une erreur dans la position d'un utilisateur.

Effet :

- Le code P est remplacé par le code $Y=P+W$
- Chiffrement du code P sur L1 ET L2, la clé est communiquée aux utilisateurs autorisés uniquement
- Mesures de L1 et C/A seulement
- Les récepteurs modernes contournent cette limite et peuvent faire des mesures de phase et de code précises sur L1 et L2 (<2mm)
- Le bruit de mesure augmente sur le code et la phase

L'A.S. est aujourd'hui actif sur l'ensemble des satellites du block II.

3.4 Produits obtenus à partir des données GPS

3.4.a Le positionnement absolu

Le système GPS a été conçu pour obtenir des coordonnées cartésiennes géocentriques (X, Y, Z) ou géographiques (λ, φ, h) dans le système de référence mondial appelé **WGS84**. Ces coordonnées sont purement géométriques. Elles sont obtenues à partir des mesures de code et ont une précision de l'ordre de 5 mètres pour la composante horizontale et 10 mètres pour la composante verticale. C'est **le type de positionnement que donne les récepteurs de navigation**.

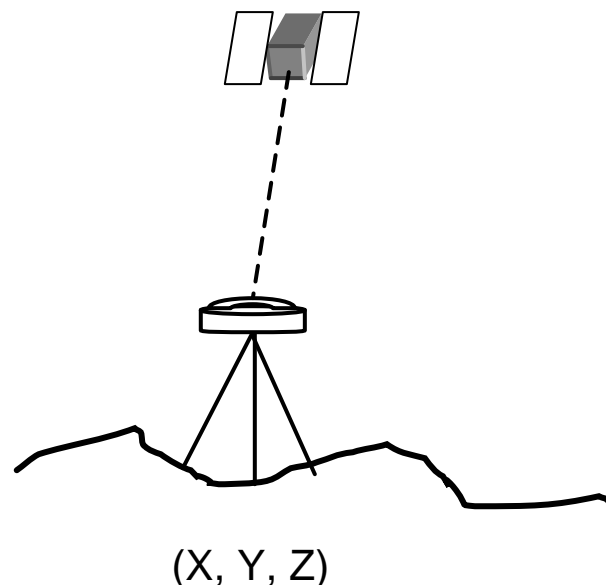
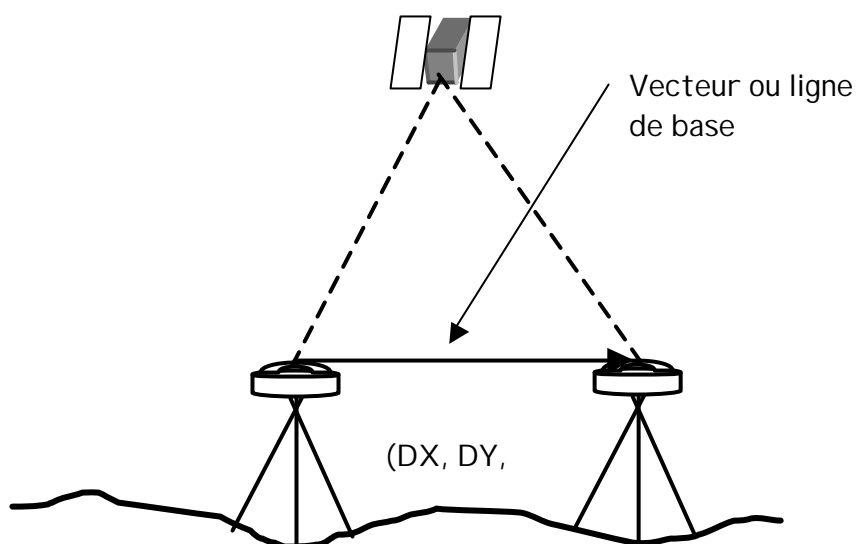


Fig. 13 : positionnement absolu

3.4.b Le positionnement relatif

Dès que l'on veut obtenir une **précision meilleure** que celle donnée dans le paragraphe précédent, il faut faire du positionnement relatif. Dans ce cas, on détermine les composantes du vecteur compris entre une station connue dans le système WGS84 (voir chapitre transformations de coordonnées) et une station inconnue. On observe les mêmes satellites en même temps sur les deux stations et le calcul se fait sur les différences des mesures.

Ce type de positionnement permet de réduire considérablement les erreurs sur les orbites, de propagation dans l'atmosphère et les erreurs d'horloges satellites et récepteurs. On utilise les mesures de code ou l'onde porteuse L1 ou/et L2.



Très souvent dans la littérature GPS, **le vecteur** entre les deux points est appelé **ligne de base**. C'est le terme que nous utiliserons dans la suite du cours.

Fig. 14 : positionnement relatif

3.4.c Autres produits

Le système GPS permet de déterminer d'autres produits.

Les paramètres de rotation de la terre

- UT1 (échelle de temps universelle ramenée au pôle instantané)
- Position du pôle (X,Y)
- Nutation de la Terre

Des orbites de satellites

- Pour les satellites GPS (orbites radio diffusées, orbites précises de l'IGS...)
- Pour des satellites bas (ex: Topex/Poseidon)

Des modèles d'ionosphère

L'utilisation de deux fréquences permet d'obtenir le retard ionosphérique (voir chapitre sur les postes d'erreurs) donc de réaliser une cartographie de la densité électronique de l'ionosphère au-dessus d'une région donnée.

Des paramètres météorologiques

Aujourd'hui pour pallier les imprécisions des modèles de troposphère (voir chapitre sur les postes d'erreurs), les logiciels de recherche permettent d'estimer des paramètres troposphériques et ainsi d'obtenir un retard très précis. Il suffit donc de le récupérer pour en extraire les données météorologiques suivantes :

- température sèche
- humidité
- pression

4 Comment se positionner

4.1 Bruit des mesures

Le bruit de mesure des observations de phase ou de code dépend de la longueur d'onde et est légèrement inférieur à 1% de cette longueur. Comme le montre le tableau ci-dessous, le code a un bruit de mesure compris entre 1 à 3 mètres. Il est donc impossible de l'utiliser pour faire du positionnement au centimètre. Il faudra donc, dans ce cas, utiliser les phases.

Signal GPS	Longueur d'onde	Bruit
Code C\A	300 m	1 à 3 m
Code P	30 m	0.1 à 0.3 m
Phase	0,2 m	1 mm

Tab. 2 : tableau des bruits de mesures suivants les types d'observation

4.2 Positionnement à l'aide du code

Dans ce chapitre nous allons décrire comment obtenir une position absolue à l'aide des mesures de codes.

On utilise les mesures de code pour calculer la distance entre les satellites et le récepteur. Puis connaissant la position des satellites à l'instant de la mesure, nous obtenons la position du récepteur par relèvement dans l'espace.

Le principe de la mesure est le suivant :

Le récepteur génère dans une échelle de temps proche de l'échelle de temps GPS le code d'un satellite donné. Lorsqu'il capte le code du satellite, celui-ci arrive avec un décalage de temps correspondant au temps de parcours de l'onde entre le satellite et le récepteur. Par corrélation il synchronise alors les deux signaux et en déduit le temps de parcours de l'onde puis la distance satellite - récepteur.

Cette distance est entachée des erreurs de synchronisations des horloges qu'il faut corriger.

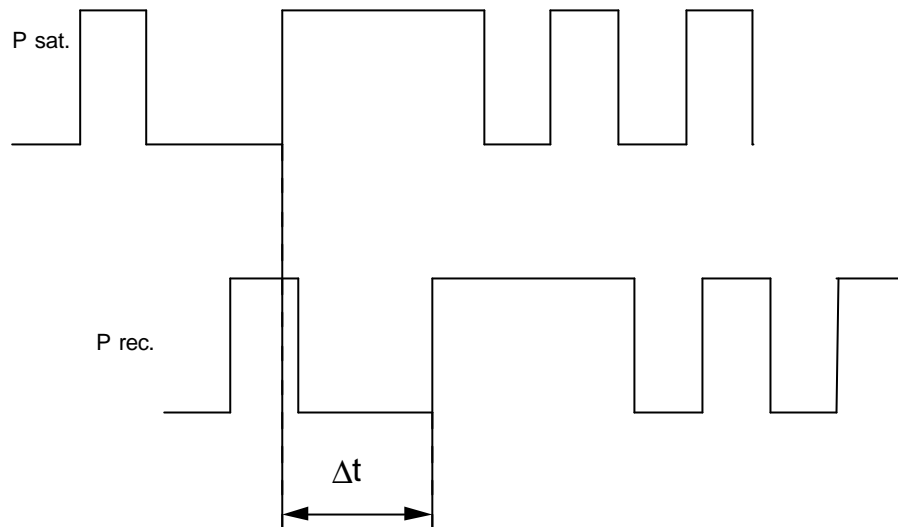


Fig. 15 : schéma de synchronisation des signaux satellites - récepteur

Avec : $r = c \cdot Dt$

- ρ : distance géométrique satellite - récepteur entaché des erreurs de décalage entre les échelles de temps GPS satellite et récepteur
- Δt : décalage de temps mesuré par le récepteur
- c : vitesse de la lumière.

Remarque : Les mesures sur le code sont souvent appelées mesures de pseudo-distances. Ce terme résulte du biais sur la mesure de distance satellite-récepteur brute dû la désynchronisation des horloges.

Or nous avons : $Dt = t_r^r - t_e^s$

Ou t_r^r temps de réception du code dans l'échelle de temps récepteur

t_e^s temps d'émission du code dans l'échelle de temps satellite

Il est impossible physiquement de synchroniser parfaitement deux horloges, donc nos deux mesures sont biaisées l'une par rapport à l'autre. Il va donc falloir mathématiquement se ramener dans la même échelle de temps.

Il faut donc ramener le temps d'émission et le temps de réception dans la même échelle de temps celle définie pour le système GPS.

$$t_e^{\text{gps}} = t_e^s + dt_e$$

$$t_r^{\text{gps}} = t_r^r + dt_r$$

dt_e : le décalage entre le temps satellite et le temps GPS est calculé à l'aide des éléments de corrections d'horloge transmis par le message de navigation. Cette correction est de la

forme $dt_e = a_0 + a_1(t_e^s - t_0^s) + a_2(t_e^s - t_0^s)^2 + Dt_{\text{rel}}$ ou :

- a_0 est un décalage entre le temps satellite et le temps GPS

- a_1 est la dérive de l'horloge satellite
- a_2 est la variation de la dérive
- t_0^s est l'époque de référence des corrections
- Δt_{rel} est la correction relativiste à apporter sur le décalage d'horloge. elle est de la forme :

- $Dt_{rel} = F.e.\sqrt{a}.\sin(E)$ avec
- F : constante égale à $-4,4428 \cdot 10^{-10} \text{ m}^{-1/2} \cdot \text{s}$
- E : excentricité de l'orbite du satellite
- A : demi-grand axe de l'orbite du satellite
- E : anomalie excentrique

La correction relativiste peut atteindre 86 ns.

dt_r : le décalage entre le temps récepteur et le temps GPS est considéré comme inconnu et estimé lors du calcul.

Le temps de propagation vrai, corrigé des biais d'horloges satellite dt_e et récepteur dt_s est donc:

$$Dt_{vrai} = (t_r^{gps} - t_e^{gps}) = (t_r^r - t_e^s) + (dt_r - dt_e)$$

L'équation finale est donc la suivante :

$$\sqrt{(x_s - x_r)^2 + (y_s - y_r)^2 + (z_s - z_r)^2} = c \cdot ?_{obs} - c dt_e + c dt_r + ?_{atm}$$

ou $\begin{pmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{pmatrix}$ sont les coordonnées du satellite et $\begin{pmatrix} x_r \\ y_r \\ z_r \end{pmatrix}$ sont les coordonnées du récepteur.

Dans cette équation :

Les coordonnées du satellite et le décalage du temps satellite par rapport au temps GPS dt_e sont donnés par le message de navigation.

Δt_{obs} est la mesure réalisée par le récepteur

$?_{atm}$ est la somme des corrections des perturbations subies par l'onde à la traversée de l'ionosphère et de la troposphère. Ces corrections sont issues de modèles.

Les coordonnées du récepteur et le décalage de temps récepteur - GPS sont inconnues et sont estimées dans le calcul.

Donc, pour le calcul de la position d'un point à une époque donnée (positionnement instantané), il y a donc 4 inconnues à estimer, les 3 coordonnées du point et le décalage d'horloge récepteur. Il faut donc quatre mesures de code sur quatre satellites différents.

4.3 Estimateur de la qualité du positionnement instantané : les DOP (Dilution of Precision)

L'exactitude du positionnement absolu instantané est très corrélée à la qualité de la géométrie de distribution des satellites dans le ciel. Pour cela il existe un paramètre qui donne une estimation de cette qualité c'est le DOP (Dilution of Precision).

Le DOP se calcule à partir de la matrice de variance - covariance des coordonnées et du temps.

On exprime cette matrice dans le repère géodésique local (est, nord, hauteur, temps) et l'on obtient :

$$\begin{pmatrix} \mathbf{s}_e^2 & \mathbf{s}_{en} & \mathbf{s}_{eh} & \mathbf{s}_{et} \\ \mathbf{s}_{ne} & \mathbf{s}_n^2 & \mathbf{s}_{nh} & \mathbf{s}_{nt} \\ \mathbf{s}_{he} & \mathbf{s}_{hn} & \mathbf{s}_h^2 & \mathbf{s}_{ht} \\ \mathbf{s}_{te} & \mathbf{s}_{tn} & \mathbf{s}_{th} & \mathbf{s}_t^2 \end{pmatrix}$$

Soit σ_0 la précision de la mesure, on définit :

Le VDOP pour la composante verticale : $VDOP = \frac{\mathbf{s}_h}{\mathbf{s}_0}$

Le HDOP pour la composante planimétrique : $VDOP = \frac{\sqrt{\mathbf{s}_n^2 + \mathbf{s}_e^2}}{\mathbf{s}_0}$

Le PDOP pour la composante 3D : $VDOP = \frac{\sqrt{\mathbf{s}_n^2 + \mathbf{s}_e^2 + \mathbf{s}_h^2}}{\mathbf{s}_0}$

Le TDOP pour la composante sur le temps : $VDOP = \frac{\mathbf{s}_t}{\mathbf{s}_0}$

Le GDOP pour les 4 composantes 3D + T : $VDOP = \frac{\sqrt{\sigma_n^2 + \sigma_e^2 + \sigma_h^2 + \sigma_t^2}}{\sigma_0}$

Plus la valeur du DOP est élevée, plus le positionnement est mauvais.

4.4 Positionnement à l'aide de la phase

De manière générale une fonction sinusoïdale $x(t)$ d'amplitude A et de fréquence f s'écrit : $x = A \cos \omega(t) + F_0$

L'onde porteuse d'une phase est un signal sinusoïdal et l'on a la relation suivante :

$$F(t)_{\text{radians}} = \omega t + F_0 \text{ avec } \omega = 2\pi f$$

On exprime souvent la phase en cycle : $F(t)_{\text{cycles}} = f \times t + \frac{F_0}{2\pi}$

Le principe de la mesure de phase repose sur le calcul du déphasage entre le signal reçu du satellite et le signal généré par le récepteur. Ce déphasage est très précis mais se fait sur la partie fractionnaire d'un cycle soit une mesure sur 19 centimètres pour L1 et 24,4 centimètres pour L2.

La différence de phase totale est : $\Delta\Phi = \Phi(t_r) - \Phi(t_e)$

Le déphasage mesuré est : $\Delta\Phi_{\text{mes}}(t_r) = \Delta\Phi - N_i^j(t_r)$

Dans cette mesure apparaît la quantité $N_i^j(t_r)$ qui est inconnue et qui est le nombre entier de cycle entre le satellite et le récepteur à l'instant t_r . Cette quantité est appelée ambiguïté entière.

La mesure de phase diffère donc de celle du code, il ne s'agit plus d'une mesure de distance mais de variation de distance.

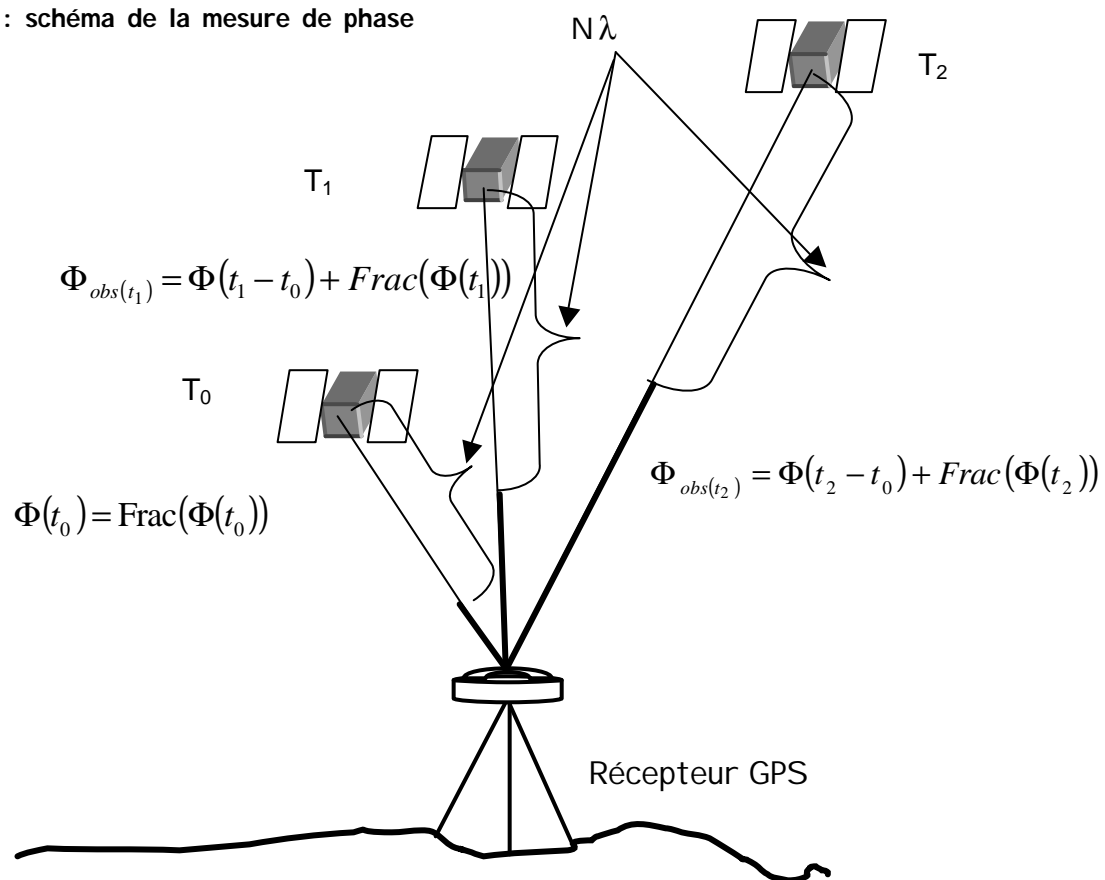
De plus un compteur permet de mesurer le nombre entier de cycles entre deux instants consécutifs. La somme de ce nombre de cycle et la mesure du déphasage à l'instant t_1 correspond à la variation de distance entre le récepteur et le satellite.

On en déduit donc que la partie inconnue de la distance satellite - récepteur reste constante et est égale, tant que le récepteur ne perd pas la phase, à $N_i^j \times \lambda$.

Lors des calculs, le terme d'ambiguïté entière sera estimé comme une inconnue supplémentaire. On introduira donc au minimum une inconnue de plus par fréquence et par satellite.

Des discontinuités dans l'enregistrement des phases entre deux époques donnent un nombre de cycles aberrants, ce sont les sauts de cycle. Ils doivent être détectés et éliminés, sinon la solution est fautive.

Fig. 16 : schéma de la mesure de phase



4.5 Relation d'observation de la phase

4.5.a Relation d'observation non différenciée de la phase

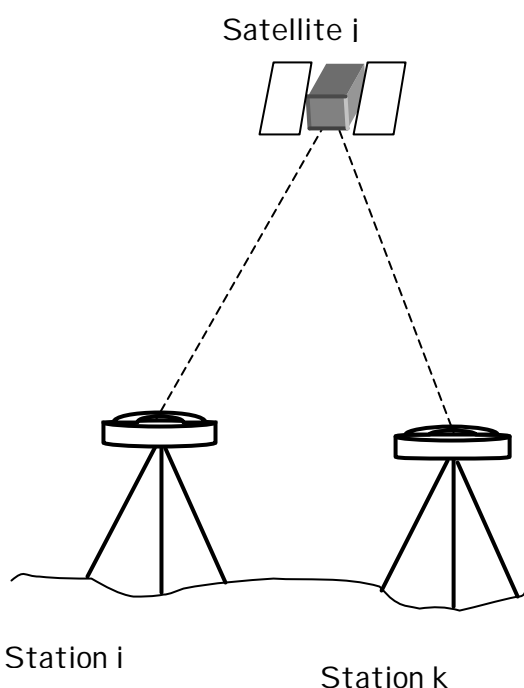
Voici la relation simplifiée d'observation de la phase qui tient compte des corrections atmosphériques (troposphère et ionosphère)

$$\phi_{i,m}^j = \rho_{i,m}^j - cdt_m^j + cdt_{i,m}^j - N_i^j \times \lambda + \rho_{ion,m}^{j,i} + \rho_{tropo,m}^{j,i} + \rho_{rel,m}^{j,i}$$

- $\phi_{i,m}^j$ Nombre réel de cycles observés à l'instant t_m converti en unité de longueur
- $\rho_{i,m}^j$ Distance entre le satellite i et le récepteur k
- c Vitesse de la lumière
- t_m Temps de mesure nominal
- dt_m^j Décalage d'horloge du satellite par rapport au temps GPS à l'instant t_m
- $dt_{i,m}^j$ Décalage d'horloge du récepteur par rapport au temps GPS à l'instant t_m
- N_i^j Nombre entier de cycles inconnus : ambiguïté initiale de phase
- λ Longueur d'onde de la phase
- $\rho_{ion,m}^{j,i}$ Correction ionosphérique
- $\rho_{tropo,m}^{j,i}$ Correction troposphérique
- $\rho_{rel,m}^{j,i}$ Correction relativiste

Afin d'éliminer ou de réduire l'influence des erreurs (horloges satellite et récepteur corrections atmosphériques et orbites) les calculs ne se font pas directement sur la relation non différenciée mais sur des différences de mesures (simple - double - triple différence).

4.6 La simple différence



← Fig. 17 : la simple différence

La simple différence consiste à former à un instant donné la différence de mesures entre un satellite et deux récepteurs. On constate que cette différence permet d'éliminer les décalages d'horloges satellites et de réduire l'influence des autres erreurs.

Par contre elle impose des contraintes fortes :

- Il faut disposer de deux récepteurs et faire les mesures aux mêmes époques.
- L'estimation ne portera plus sur les

coordonnées d'un point mais sur **le vecteur entre deux points**, c'est du positionnement relatif, ce qui implique de connaître un point en **WGS84**.

La relation d'observation devient :

$$\Delta\phi_{i,k;m}^j = \Delta\rho_{i,k;m}^j - c\Delta dt_{i,k;m} - N_{i,k}^j \times \lambda + \Delta\rho_{ion;m}^{j,i,k} + \Delta\rho_{tropo;m}^{j,i,k} + \Delta\rho_{rel;m}^{j,i,k}$$

4.7 La double différence

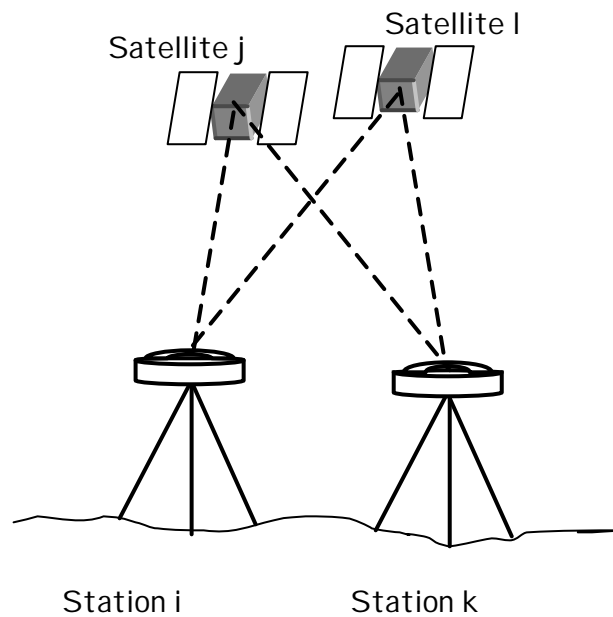


Fig. 18 : la double différence

Le double différence est la différence de deux simples différences à un instant donné entre deux satellites et deux récepteurs.

Cette combinaison permet d'éliminer les erreurs d'horloges récepteur de réduire les effets des perturbations atmosphériques et des orbites.

C'est la différence qui sera utilisée dans les logiciels de calculs. Il faut remarquer que les ambiguïtés entières apparaissent toujours dans cette différence. Lors des calculs, pour obtenir la meilleure précision et une meilleure confiance dans les résultats, nous serons obligés d'estimer ces paramètres puis de les fixer à leurs valeurs naturelles (voir chapitre : type de localisation).

Relation d'observation des doubles différences :

$$\nabla Df_{i,k;m}^{j,l} = \nabla D\mathbf{r}_{i,k;m}^{j,l} - N_{i,k}^{j,l} \times \mathbf{1} + \nabla D\mathbf{r}_{ion;m}^{j,l;i,k} + \nabla D\mathbf{r}_{tropo;m}^{j,l;i,k} + \nabla D\mathbf{r}_{rel;m}^{j,l;i,k}$$

4.8 La triple différence

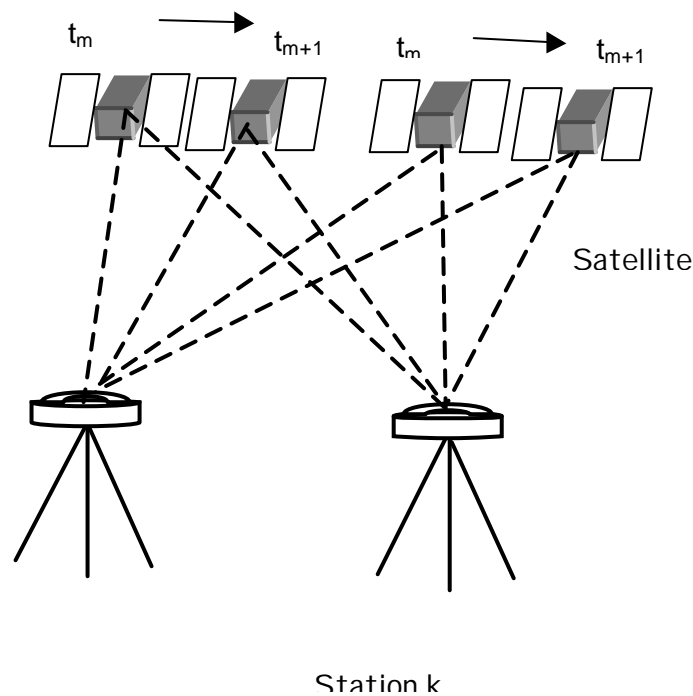


Fig. 19 : la triple différence

La triple différence est la différence de deux doubles différences pour deux époques directement consécutives. Cette différence élimine les ambiguïtés entières et elle est utilisée principalement pour rechercher et éliminer les sauts de cycles.

La relation d'observation devient :

$$T\nabla\Delta\phi_{i,k;m+1,m}^{j,l} = T\nabla\Delta\rho_{i,k;m+1,m}^{j,l} + T\nabla\Delta\rho_{ion;m+1,m}^{j,l;i,k} + T\nabla\Delta\rho_{tro;m+1,m}^{j,l;i,k} + T\nabla\Delta\rho_{rel;m+1,m}^{j,l;i,k}$$

4.8.a Utilisation de la triple différence pour éliminer les sauts de cycles

Soient 4 époques d'observations consécutives, t_{m-1} , t_m , t_{m+1} , t_{m+2} . Supposons qu'entre les époques m et $m+1$ nous ayons un saut de cycle de valeur égale à $S.\lambda$. Ecrivons les doubles différences aux trois époques sans tenir compte des corrections d'ionosphère, de troposphère et de relativité :

$$\text{A } t_{m-1} : \nabla\Delta\phi_{i,k;m-1}^{j,l} = \nabla\Delta\rho_{i,k;m-1}^{j,l} - N_{i,k}^{j,l} \times \lambda$$

$$\text{A } t_m : \nabla\Delta\phi_{i,k;m}^{j,l} = \nabla\Delta\rho_{i,k;m}^{j,l} - N_{i,k}^{j,l} \times \lambda$$

$$\text{A } t_{m+1} : \nabla\Delta\phi_{i,k;m+1}^{j,l} = \nabla\Delta\rho_{i,k;m+1}^{j,l} - N_{i,k}^{j,l} \times \lambda + S.\lambda$$

$$A_{t_{m+2}} : \nabla \Delta \phi_{i,k;m+2}^{j,l} = \nabla \Delta \rho_{i,k;m+2}^{j,l} - N_{i,k}^{j,l} \times \lambda + S \cdot \lambda$$

Les triples différences deviennent :

$$\text{Entre } t_{m-1} \text{ et } t_m : T \nabla \Delta \phi_{i,k;m,m-1}^{j,l} = T \nabla \Delta \rho_{i,k;m,m-1}^{j,l}$$

$$\text{Entre } t_m \text{ et } t_{m+1} : T \nabla \Delta \phi_{i,k;m+1,m}^{j,l} = T \nabla \Delta \rho_{i,k;m+1,m}^{j,l} + S \cdot \lambda$$

$$\text{Entre } t_{m+1} \text{ et } t_{m+2} : T \nabla \Delta \phi_{i,k;m+2,m+1}^{j,l} = T \nabla \Delta \rho_{i,k;m+2,m+1}^{j,l}$$

La discontinuité introduite dans les triples différences par le saut de cycle va permettre de le détecter et de l'éliminer.

4.9 La fixation des ambiguïtés entières

4.9.a Pourquoi et comment fixer les ambiguïtés entières ?

Lors d'un calcul de type géodésique par les doubles différences interviennent les ambiguïtés entières. Elles sont, comme nous l'avons vu, inconnues. Lors des calculs par moindres carrés de la ligne de base nous allons donc les estimer comme des paramètres au même titre que les coordonnées de la ligne de base.

Mais dans un calcul par moindres carrés, il est impossible d'estimer un paramètre comme un entier, il est toujours estimé comme un réel.

Or l'expérience montre que si l'on estime dans une première itération les ambiguïtés à des valeurs réelles, qu'on les fixe à une valeur entière déduite de la valeur réelle, que l'on recalcule les observations en n'estimant que les coordonnées du vecteur, on peut gagner un facteur 10 sur la qualité de la détermination de la ligne de base (voir schéma ci-dessus) et avoir une meilleure confiance dans le résultat.

Par exemple pour un calcul standard ambiguïtés libres, la précision est de l'ordre de $10^{-5} \times \text{Distance}$. En fixant les ambiguïtés la précision est de l'ordre de $10^{-6} \times \text{Distance}$.

C'est pour cela que les constructeurs de matériel GPS de géodésie ont développé des logiciels de fixation des ambiguïtés de plus en plus sophistiqués, qui permettent de trouver les valeurs entières exactes des ambiguïtés avec un temps d'observation de plus en plus court (voir chapitre type de positionnement).

5 Analyses des postes d'erreurs

5.1 Classement des principaux postes d'erreurs

Dans ce chapitre nous allons présenter les différents postes d'erreurs intervenant dans les calculs GPS.

Dans le tableau suivant, nous présentons les causes d'erreurs, les conséquences sur une estimation d'une ligne de base et les solutions à mettre en œuvre pour réduire ou éliminer ces erreurs.

Dans la suite nous nous intéresserons plus particulièrement aux problèmes d'orbites, de propagation à travers l'atmosphère pour laquelle nous étudierons les deux couches qui perturbent le trajet de l'onde : la troposphère et l'ionosphère et de multitrajets.

Causes	Conséquences	Solutions
Mauvaise qualité de l' orbite	Perte d'exactitude	Utilisation d'orbites précises du type IGS
Couche haute de l'atmosphère : l' ionosphère	Facteur d'échelle sur le réseau et perte d'exactitude	Utilisation de récepteurs bifréquences
Couche basse de l'atmosphère : la troposphère	Influence surtout la composante verticale	Modèles adaptés estimation statistique de paramètres
Les multitrajets réflexions multiples enregistrées par le récepteur comme mesures propres	Perte d'exactitude	Augmentation de la durée d'observation
Non-stabilité des antennes : Variation du centre de phase.	Perte d'exactitude surtout sur de longues distances et avec des antennes de types différents	Utilisation de cartographies de variations des centres de phase
Dégradation volontaire	Perte d'exactitude	Technologie des récepteurs

Tab. 3 : postes d'erreurs

5.2 Les orbites

L'ordre de grandeur de l'erreur sur une ligne de base dû à l'erreur sur l'orbite d'un satellite est bien représenté par :

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

avec

- r rayon de l'orbite du satellite

- dr l'erreur sur l'orbite du satellite
- b la longueur de la ligne de base
- db l'erreur sur la ligne de base

Pour une erreur de 1 cm sur une ligne de base, il faut :

b(km)	dr(m)
1	260
10	26
100	2.6
1000	0.26

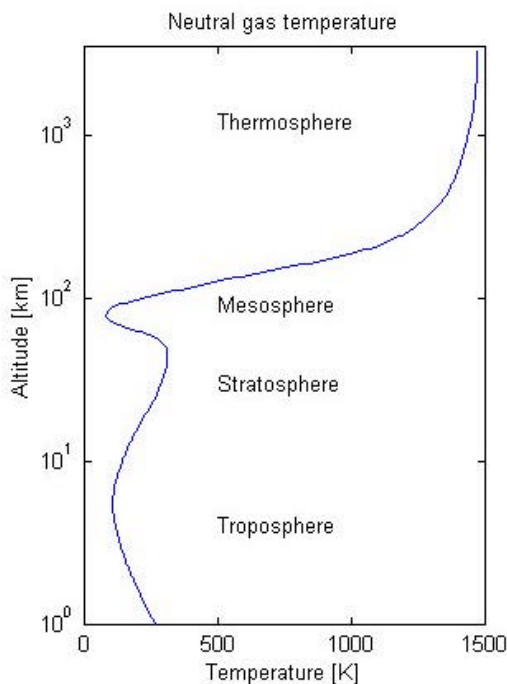
Tab. 4 : influence des erreurs des orbites sur le calcul d'une ligne de base

Or aujourd'hui la qualité de la détermination des orbites radio-diffusées est d'environ 10m, ce qui ne permet pas de garantir une détermination centimétrique pour une ligne de base de plus de 50 km. Dans ce cas il faut donc utiliser des orbites précises.

Il existe aujourd'hui un service international l'IGS qui diffuse au travers du Web des orbites précises dont la qualité varie entre 5 et 50 cm. Ce service est décrit en détail dans le chapitre sur les réseaux permanents.

5.3 La troposphère

5.3.a Présentation générale



La troposphère est la couche basse de l'atmosphère qui touche le sol et dont l'épaisseur est comprise entre 7 à 20 km.

Elle produit une réduction variable de la vitesse de l'onde transmise ce qui allonge le temps de parcours. C'est le retard troposphérique.

L'amplitude de la variation dépend essentiellement des conditions météorologiques - pression, température sèche, humidité - et de l'élévation du satellite. L'erreur est minimum au zénith.

C'est un milieu non dispersif, le retard troposphérique ne dépend pas de la fréquence.

Contrairement à l'ionosphère cette erreur ne peut être annulée par la mesure de deux fréquences. Il faut donc utiliser un modèle.

Le retard troposphérique se décompose en deux parties, une composante sèche qui représente 80% du retard et une composante humide qui représente 20% du retard. C'est cette dernière qui est la plus mal modélisée.

La valeur du retard troposphérique est d'environ 2,20 mètres au zénith et de plus de 20 mètres à 5 degrés.

A 0 degré la valeur du retard troposphérique peut atteindre plusieurs centaines de mètres et est impossible à modéliser.

Aujourd'hui le troposphère est le facteur limitant le plus la détermination très précise de ligne de base. Son effet détériore surtout la détermination de la composante verticale.

5.3.b Modélisation

On modélise le retard troposphérique à partir des données météorologiques (température sèche, humidité et pression) à la station sol pour une détermination absolue ou des deux stations sol pour une détermination relative et de l'élévation des satellites.

Il existe de nombreux modèles dont voici une liste non exhaustive :

- Hopfield-Black,
- Hopfield-Kouba,
- Marini,
- Saastamoinen,
- CENT
- Goad et Goodman

Les modèles ne sont valables que pour des élévations supérieures à 10 à 15 degrés.

Exemple de modèle : le modèle de Saastamoinen :

$$\rho_{tropo} = \frac{0.00227}{\cos Z} \left(P + \left[\left(\frac{1255}{T} \right) + 0.05 \right] \times e - B \tan^2 Z \right) + \delta R$$

ou

- ρ_{tropo} : le retard troposphérique total
 - Z : la distance zénithale du satellite
 - P : la pression atmosphérique au point observé
 - T : la valeur de la température absolue au point observé
 - e : la pression de vapeur d'eau au point observé
 - B : une constante qui dépend de l'altitude du point, sa valeur varie de 1,156 au niveau de la mer à 0,563 à 5000 m d'altitude (voir tableau ci-dessous).
- δR : correction de distance troposphérique (voir tableau ci-après).

5.3.c Choix des paramètres météorologiques

Dans un calcul, le choix des paramètres météorologiques est primordial. Il existe plusieurs solutions, nous allons examiner les principales :

Mesures des paramètres sur le terrain

La mesure des paramètres sur le terrain utilisé au début du GPS a rapidement montré ses limites. En effet il est impossible de mesurer correctement l'humidité dans l'air et les erreurs engendrées sont supérieures à la précision recherchée.

Modèles standard de météo

Elle consiste à donner une température sèche, une humidité et une pression à une altitude de référence puis à l'aide d'un modèle, de calculer ces trois paramètres aux altitudes des points à déterminer. Cette solution, même si elle ne reflète pas la réalité permet d'avoir des données cohérentes et c'est la technique qui, aujourd'hui, est utilisée par la quasi-totalité des logiciels commerciaux.

En général les paramètres utilisés sont les suivants :

- Température sèche 20°,
- Humidité 50%
- Pression 1010 mbar

Pris au niveau de la mer.

Modèle local de météo

Dans le cas d'un travail dans une région où les conditions météorologiques sont très spécifiques, il est possible de construire un modèle local. Dans ce cas on choisit une température, une humidité et une pression moyenne du lieu de travail à une altitude donnée. Puis à l'aide d'un modèle on extrapole la météo aux points à déterminer suivant leurs altitudes.

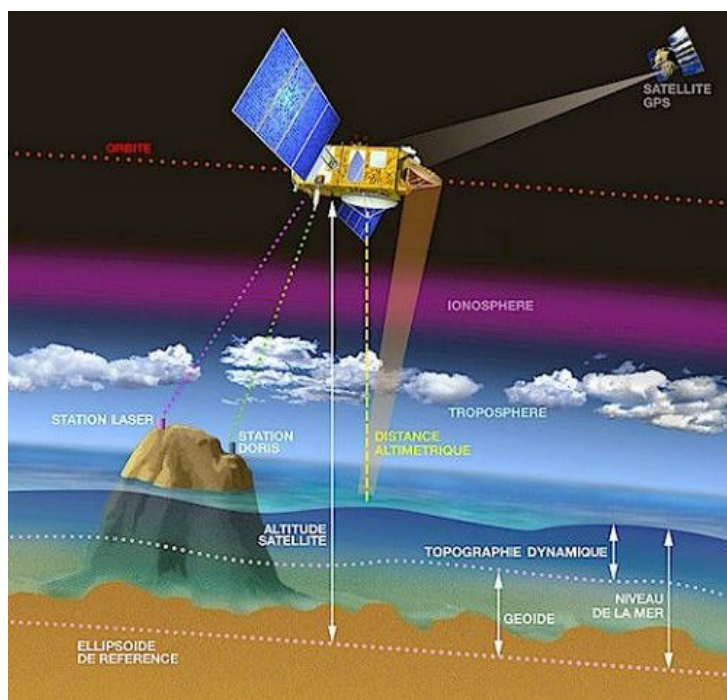
Estimation d'inconnues

La méthode la plus précise, mais aussi la plus délicate à mettre en œuvre est l'estimation d'inconnues de troposphère lors du calcul de la ligne de base. Elle n'est aujourd'hui mise en œuvre que dans les logiciels de recherche.

5.4 L'ionosphère

5.4.a Présentation générale

L'ionosphère correspond à la couche haute de l'atmosphère comprise entre 50 et 1000 km. C'est une zone chargée de particules électriques qui interagissent avec les ondes émises par les satellites GPS et en allongent le temps de trajet.



Le retard ionosphérique (allongement du temps de parcours satellite - récepteur) est compris entre 0 et 50 mètres et varie en fonction de l'agitation ionosphérique. Contrairement à la troposphère, il n'est pas possible de modéliser correctement cet effet.

L'ionosphère a, par contre, une propriété très importante, c'est un milieu dispersif pour les fréquences qui nous intéressent. Le retard électronique dépend de la fréquence et donc l'utilisation de deux fréquences va permettre d'éliminer le retard ionosphérique.

L'agitation ionosphérique n'est pas constante au cours du temps et

varie en fonction des paramètres suivants :

- de la latitude du point, l'ionosphère est plus agitée au pôle et à l'équateur
- de l'activité solaire. Tous les 11 ans le soleil a un pic d'activité pendant lequel les vents solaires (constitués de particules électriques) sont beaucoup plus violents et leurs interactions avec l'ionosphère la rend beaucoup plus agitée.
- de la période de l'année
- du jour ou de la nuit pendant laquelle elle est très calme.

5.4.b Utilisation de deux fréquences pour éliminer les effets ionosphériques

Les systèmes de positionnement précis par satellite fonctionnent avec deux fréquences principalement pour pouvoir éliminer le retard ionosphérique. Voici les deux méthodes employées :

Correction ionosphérique à partir de deux fréquences.

On a

$$\phi_{1,mes} = \rho + \rho_{1,ion}$$

$$\phi_{2,mes} = \rho + \rho_{2,ion}$$

avec : $\phi_{i,mes}$ mesure brute sur une fréquence
 ρ mesure corrigée du retard ionosphérique
 $\rho_{i,ion}$ retard ionosphérique

La valeur du retard ionosphérique est proportionnelle à l'inverse du carré de la fréquence :

$$\rho_{i,ion} = \frac{A}{L_i^2}$$

avec A = constante à un instant donné

L_i fréquence GPS

$$\text{Donc : } \rho_{1,ion} = \frac{(\phi_{1,mes} - \phi_{2,mes})}{1 - L^2} \quad \text{avec } L^2 = \frac{L_1^2}{L_2^2}$$

On obtient ainsi la valeur de la correction ionosphérique pour la première fréquence.

Combinaison linéaire des deux fréquences L1 et L2

La deuxième méthode consiste à faire une combinaison linéaire qui élimine mathématiquement le terme d'ionosphère. Cette combinaison linéaire est appelée L3 "ionosphere free" et elle est utilisée par la majorité des logiciels traitant des données bifréquences.

On la crée de la manière suivante :

$$\phi_{3,mes} = \frac{L_1^2}{L_1^2 - L_2^2} \phi_{1,mes} - \frac{L_2^2}{L_1^2 - L_2^2} \phi_{2,mes}$$

6 Les différents types de positionnements

6.1 Positionnement absolu de navigation

C'est le positionnement de base que donne un récepteur de navigation qui ne capte que le C/A code. Il se fait dans le mode SPS (Standard Positioning Service) et est souvent appelé dans le langage courant "mode naturel".

C'est du positionnement absolu.

Les récepteurs utilisent les mesures de C/A code, et obtiennent la première position en quelques dizaines de secondes puis une position par époque d'observation tant que le récepteur ne perd pas le signal.

La précision est de l'ordre de 5 m en planimétrie, 10 m en altimétrie sans la S.A.

6.2 La navigation différentielle (DGPS)

Afin d'améliorer le positionnement de navigation, il est possible de faire des différences sur les mesures de codes, ce qui va améliorer le positionnement.

Ce type de navigation est appelé DGPS.

6.2.a Principe du DGPS

Lors d'un calcul en temps différé le principe du positionnement est le même que pour la phase. On forme à partir des observations de code, les simples et les doubles différences, ce qui permet d'estimer le vecteur entre les deux stations.

Il faut bien sûr que la station de référence soit sur un point dont on connaît les coordonnées en WGS84. C'est du positionnement relatif

En temps réel, le principe est différent. La station fixe va estimer à chaque instant sa position à partir des mesures de code, puis la comparer à la position "vraie". A partir de cet écart elle va estimer sur chaque mesure de code une correction pour ramener la position estimée à la même valeur que la position "vraie". Puis elle va transmettre ces corrections via les ondes radio.

Plusieurs types de vecteurs sont possibles :

- Par ondes radio à partir d'émetteurs au sol ou du système RDS
- Par téléphone mobile GSM
- Par satellites géostationnaires de communications

Ces corrections ne sont valables que localement sur quelques centaines de kilomètres autour de la station fixe. Au-delà, il y a décorrélation entre les erreurs de la station fixe et de la station mobile.

Par contre il est possible d'améliorer la qualité des corrections de la façon suivante

- Utilisation non pas d'une station fixe mais d'un réseau de stations (principe du WaDGPS : Wide Area DGPS), ce qui permet de "cartographier" les corrections
- Séparation des différentes causes d'erreurs (orbites, horloge des satellites, troposphère, ionosphère)
- Estimation de corrections et estimation de vitesses de variations de ces corrections.

Comme en mode navigation le temps d'observation est de quelques dizaines de secondes pour la première position puis d'une position par époque d'observation tant que le récepteur ne perd pas le signal.

La précision est la suivante : 0,5 à 3 m + 1,5 m pour 150 km suivant le type de récepteur et le type de correction.

Les corrections émises par les stations de référence sont le plus souvent au format RTCM SC 104 qui est reconnu internationalement. Il est donc possible d'utiliser des récepteurs de marques différentes pour la station de référence et pour les stations mobiles.

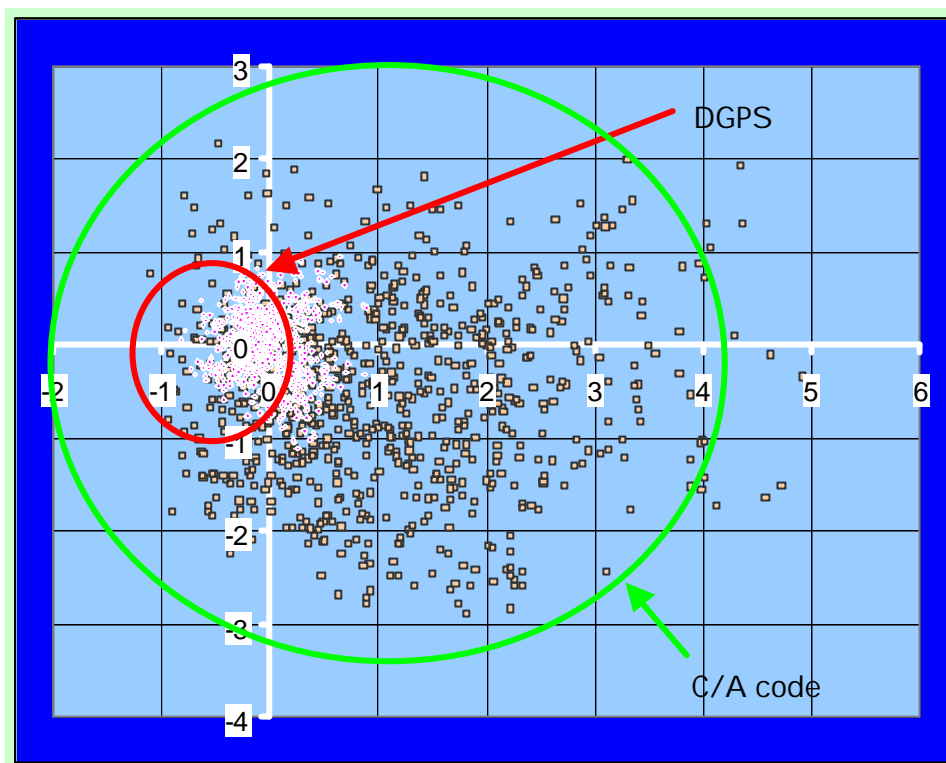


Fig. 20 : comparaison d'un positionnement absolu et un positionnement DGPS avec la S.A. désactivée.

6.2.b Systemes DGPS

Les systemes mondiaux

Aujourd'hui, il existe des services mondiaux de diffusion de corrections GPS qui fonctionnent suivant le principe du WaDGPS (Wide Area DGPS)

Les corrections sont calculées à partir d'un réseau de station et non pas d'une station isolée.

→ meilleure qualité des corrections

Il y a une décorrélation des sources d'erreurs : ionosphère, troposphère, horloges satellites et une "cartographie" de ces erreurs et une estimation de la vitesse d'évolution de la correction au cours du temps

De plus il y a une utilisation du principe de la station de référence virtuelle (VRS : Virtuel Reference Station). Le récepteur mobile à partir des cartes de corrections transmises et de la vitesse d'évolution de la correction reconstitue les corrections qui seraient fournies par une station fixe se trouvant à l'emplacement donné par ces coordonnées de navigation.

Deux systèmes existent aujourd'hui : LandStar développé par la société RACAL et Omnistar développé par la société Fugro.

Ces services de corrections DGPS ont une couverture mondiale et fournissent 24h/24 des corrections qui sont retransmises par satellites géostationnaires.

Un réseau de station GPS transmet ces observations à un centre de contrôle, qui après calculs des corrections, les transmet à un satellite géostationnaire pour une diffusion cryptée. L'accès au service est payant.

Pour en savoir plus sur ces services voici leurs sites Web :

LandStar : <http://www.racal-landstar.com>

Omnistar : <http://www.omnistar.com>

Le futur réseau DGPS de l'IGN

Depuis quelques années l'IGN cherche à mettre en place un réseau de transmission de correction DGPS. Deux produits ont été définis. Un produit "grand public" qui devait donner une précision comprise entre 1 et 5 mètres en temps réel et qui n'a plus, avec la S.A. désactivée, d'intérêt.

L'IGN va donc fournir des corrections de meilleure qualité permettant une précision de localisation de quelques décimètres pour des applications professionnelles du type par exemple SIG.

Une description plus détaillée de ce service est faite dans le chapitre Réseau Permanent RGP

6.3 Le positionnement géodésique à l'aide de la Phase

Le positionnement géodésique utilise, comme nous l'avons vu des récepteurs capables de mesurer l'onde porteuse sur une ou deux fréquences. Il existe deux types de récepteurs les monofréquences et les bifréquences.

L'avantage des récepteurs monofréquences est le prix d'achat qui est de la moitié de celui des récepteurs bifréquences, soit en 2000 de l'ordre de 70 KF pour 140 KF pour les bifréquences.

Par contre leur emploi est plus contraignant et limité. Il est impossible avec des récepteurs monofréquences d'éliminer les effets de l'ionosphère et donc de mesurer des lignes de bases longues. Il faut se limiter à des distances inférieures à une dizaine de kilomètres.

En effet plus la distance augmente plus les trajets de l'onde entre le satellite et les récepteurs diffèrent et la corrélation entre les retards ionosphériques diminue, ce qui crée un biais dans les simples et doubles différences et donc dégrade la solution.

K

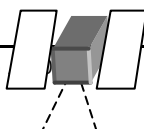


Fig. 21 : effets de l'ionosphère sur une fréquence

Si L la longueur de la ligne de base est courte (inférieur à 10 km) $\rho_{ion,I}^K \approx \rho_{ion,J}^K$ donc les effets de l'ionosphère sont éliminés par les simples et doubles différences.

Si L est supérieur à 10 km $\rho_{ion,I}^K \neq \rho_{ion,J}^K$ donc les effets de l'ionosphère ne sont plus éliminés par les simples et doubles différences, il faut donc utiliser les deux fréquences.

Le deuxième défaut des récepteurs monofréquences, c'est qu'ils fournissent deux fois moins de mesures que les récepteurs bifréquences et sont donc défavorisés lorsqu'il faut réduire les temps d'observation pour obtenir rapidement une solution. Aujourd'hui c'est la principale préoccupation des constructeurs de GPS pour le marché topographique (observation de lignes de base courtes inférieurs à 15 km).

6.3.a Classification des différents types de positionnement

Dans la suite, nous donnerons une classification des différents mode d'observation par GPS. Les précisions données sont celles obtenues sur la composante planimétrique. Pour la composante verticale la précision est 1,5 à 2,5 fois plus mauvaise.

GPS géodésique monofréquence dégradé

- type de mesure : phase sur L1
- temps d'observation : quelques dizaines de minutes par points.
- type de calcul : temps différé, on ne cherche pas à fixer les ambiguïtés entières.
- type d'orbite : radiodiffusée issue du message de navigation

- Précision : environ $2\text{mm} + 10^{-5} \times D$ jusqu'à 30 km.
- Application principale : réalisation de canevas photogrammétrique.

Ce type de positionnement tend à disparaître.

GPS géodésique monofréquence précis

- type de mesure : phase sur L1
- temps d'observation : quelques dizaines de minutes à une heure par point.
- type de calcul : temps différé, il faut fixer les ambiguïtés entières
- type d'orbite : radiodiffusée
- Précision : $2\text{mm} + 2 \times 10^{-6} \times D$ jusqu'à 8 km en zone tempérée, jusqu'à 5 km en zone équatoriale.

Rapide statique

- type de mesure : phase sur L1 ou L1 et L2, il est conseillé d'utiliser des récepteurs bifréquences qui permettent de réduire le temps d'observation
- temps d'observation : de quelques minutes à quelques dizaines de minutes par point
- type de calcul : temps différé, ce type de positionnement se caractérise par l'algorithme de fixation des ambiguïtés entières.
- type d'orbite : radiodiffusée
- Précision : environ $2\text{mm} + 2 \times 10^{-6} \times D$ jusqu'à 25 km

Ce type de positionnement est aujourd'hui très répandu.

Cinématique

- type de mesure : phase sur L1
- temps d'observation : 10 minutes sur le point de référence plus quelques époques d'observations par point.
- type de calcul : temps différé. Les ambiguïtés entières sont fixées sur le point de référence, puis les autres points sont calculés avec ces ambiguïtés fixes.
- type d'orbite : radiodiffusée
- Précision : $2\text{mm} + 2 \times 10^{-6} \times D$ jusqu'à 5 km.

Cette technique a été développée dès le début de l'utilisation du GPS en géodésie. Elle permet de mesurer beaucoup de points en un laps de temps très court. Par contre les récepteurs ne doivent pas perdre les satellites afin de ne pas perdre les ambiguïtés, ce qui est un très gros inconvénient. Il faut donc travailler en terrain dégagé ou prendre de nombreuses précautions.

Résolution d'ambiguïtés en vol

Cette technique est aujourd'hui la plus utilisée par les topographes et celle que développe le plus les constructeurs. En effet il est possible de faire du temps réel et donc de réduire au maximum les temps d'observation.

Cette technique est connue sous différents noms :

- OTF (On the Fly) ou Résolution d'ambiguïté en vol.

Pour le temps réel on parle de :

- RTK (Real Time Kinematic), ou cinématique temps réel
- type de mesure : phase sur L1; L2; C/A; P2
- temps d'observation : quelques minutes sur le point d'initialisation puis quelques secondes par point.
- type de calcul : temps différé ou temps réel (RTK). Les algorithmes de fixation des ambiguïtés sont très rapides et permettent de retrouver la valeur des ambiguïtés même après la perte des signaux d'une partie des satellites. Il faut noter que les calculs sont les mêmes en temps réel ou en temps différé. Dans le premier cas ils sont réalisés dans le récepteur mobile qui doit recevoir les observations de la station fixe en temps réel.
- type d'orbite : radiodiffusée
- Précision : $2\text{mm} + 2 \times 10^{-6} \times D$ jusqu'à 15 km.

Avantages de la méthode :

Les points étant stationnés quelques secondes, il est possible de mesurer beaucoup de points en un laps de temps très court.

De plus, l'utilisation du temps réel permet d'optimiser les temps d'observation et de savoir si un point est observable ou pas en temps réel.

Inconvénient de la méthode temps réel :

Pour une utilisation temps réel, il faut transmettre les données de la station de référence à la station mobile par radio-modem. Toutes interruptions dans la transmission, interrompent le positionnement.

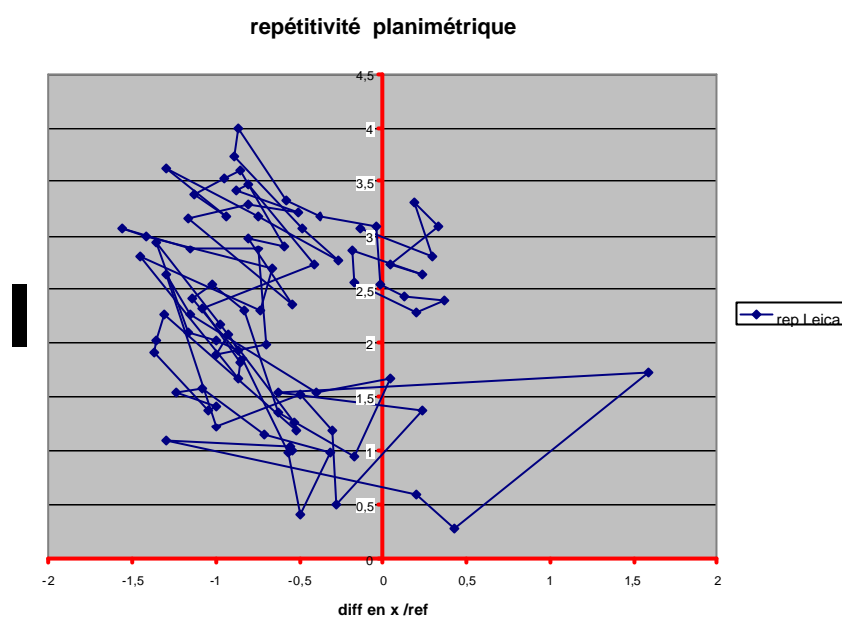


Fig. 22 : répétitivité en planimétrie pour un positionnement temps réel RTK

Positionnement très précis

Ce type de positionnement est utilisé :

- par les agences nationales de cartographie pour établir les réseaux de base
- par les laboratoires de recherches en géodésie pour le système de référence terrestre et la réalisation d'orbites précises (voir l'IGS)
- par les géophysiciens pour mesurer des déformations de la croûte terrestre, soit localement pour, par exemple, suivre l'évolution d'un volcan, soit globalement pour l'étude de la tectonique des plaques.

Ces caractéristiques sont les suivantes :

- type de mesure : utilisation de récepteurs bifrquences les plus précis
- temps d'observation : de plusieurs heures à une observation en continu sur les réseaux permanents.
- type de calcul : temps différé.
- type d'orbite : orbites précise de l'IGS.
- Précision : aujourd'hui la qualité des déterminations oblige à donner aux stations des coordonnées à une époque et une vitesse de déplacement. La précision est subcentimétrique pour les coordonnées et de l'ordre de quelques millimètres par an pour les vitesses.

7 GPS perspectives et évolutions

Face au développement du futur système européen Galiléo de radio positionnement par satellite et à la volonté d'imposer le GPS comme seul système de navigation pour l'aviation civile, les américains ont décidé une série d'évolutions de leur système. Cela s'est traduit par une note du vice président américain Al Gore de janvier 1999 décrivant l'avenir du GPS, en particulier, les améliorations qui seront apportées pour les utilisateurs civils.

Voici les principaux points de la déclaration de Gore :

Après avoir reconnu le rôle incontournable du système GPS pour les problèmes de localisations et de l'apport pour l'économie américaine, les décisions suivantes ont été prises :

- Allocation d'une seconde fréquence pour les usages civils à la fréquence de 1227.60 MHZ, la mise en place est prévue sur les satellites lancés à partir de 2003.
- Allocation d'une troisième fréquence pour les usages civils à la fréquence de 1176.45 MHZ, la mise en place est prévue sur les satellites lancés à partir de 2005.

L'ensemble de ces améliorations coûtera environ 400 millions de dollars répartis sur 6 ans.

8 Les réseaux permanents

Depuis le début des années 90 se sont mis en place des réseaux de stations GPS permanentes liés à des services plus ou moins développés. Les premiers réseaux avaient un but scientifique et étaient destinés à soutenir l'utilisation du GPS pour des applications géophysiques en fournissant des orbites précises.

Aujourd'hui de nombreux états développent des réseaux permanents qui devront à terme remplacer les réseaux géodésiques actuels. Ils servent aujourd'hui au développement de service de type DGPS mais devraient évoluer et offrir la possibilité de faire à partir de ces stations permanentes du cinématique temps réel centimétrique.

Nous allons présenter trois de ces réseaux et les services qui les accompagnent.

Premièrement l'IGS (International GPS Service for Geodynamics) qui est un service scientifique international ou collabore environ 200 laboratoires et instituts cartographiques à travers le monde.

Deuxièmement le réseau européen EPN (EUREF Permanent Network), qui est une densification du réseau de l'IGS.

Enfin le RGP (réseau GPS permanent) qui se développe en France avec ses applications scientifiques et de productions. Il sera le support du réseau DGPS français qui se met en place actuellement.

8.1 L'IGS, International GPS Service for Geodynamics

L'IGS est un service scientifique international qui soutient les activités de recherches GPS en géodésie et en géophysique. Il a été créé sous l'égide de l'AI G (Association internationale de Géodésie) en 1992.

Pour cela l'IGS fournit à tout utilisateur GPS principalement les produits suivants :

- Des orbites précises et des paramètres d'horloges satellites précis pour l'ensemble des satellites 24h/24 365 jours/an. La notion de **continuité du service** est très importante pour les fondateurs.
- Des paramètres de rotation de la terre.

Ces produits sont accessibles avec un délai maximum de 10 jours.

Entre juin 1992 et janvier 1994 ce fut la phase de mise en place.

L'IGS a été déclaré opérationnel le 1er janvier 1994.

Ce service est pour le moment gratuit, et l'ensemble des données est accessible par internet.

8.1.a Produits de l'IGS

Les produits de l'IGS ont évolués et aujourd'hui l'offre est la suivante :

- 3 types d'orbites précises
 - Orbites prédites
 - Orbites rapides
 - Orbites finales précises
- Paramètres de rotation de la terre : les coordonnées du pôle et sa variation, UTC-UT1, la longueur du jour.
- Les coordonnées, les vitesses ainsi que la matrice de variance-covariance des stations de poursuites permanentes de l'IGS.
- Des corrections d'horloges des satellites GPS.
- Un modèle d'ionosphère
- Des paramètres de troposphère (température sèche, humidité, pression)

8.1.b Les différentes composantes de l'IGS

Pour assurer la bonne marche de l'IGS la communauté scientifique internationale a mis en place une organisation stricte respectant des cahiers des charges contraignants. Chacun des 200 instituts a un rôle défini et contribue à l'une des tâches décrites ci-dessous :

- Gérer une ou plusieurs stations GPS permanentes du réseau.
- Animer un centre de données, il en existe de 3 types : opérationnels, régionaux et globaux
- Etre un centre d'analyses ou un centre d'analyses associé.
- Etre le centre d'analyse coordinateur
- Le bureau central de l'IGS est, quant à lui, installé et géré au JPL (Jet Propulsion Laboratory) aux Etats-Unis

De plus il existe un "Governing Board" qui regroupe des personnalités influentes du monde de la géodésie et qui définit la stratégie de l'IGS.

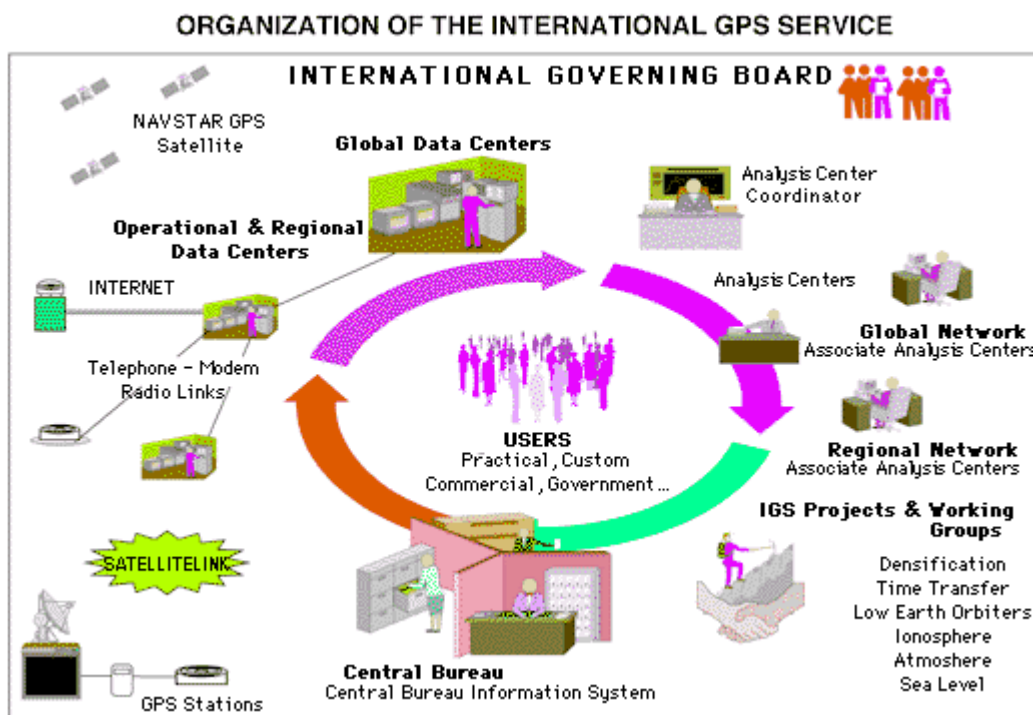


Fig. 23 : organisation de l'IGS

Le réseau de stations de poursuites

Les stations permanentes (environ 245 aujourd'hui) observent en continu l'ensemble des satellites et doivent transmettre une fois par jour leurs observations. Pour cela, elles doivent être équipées de lignes spécialisées à haut débit reliées directement à internet. La transmission doit être automatique.

Elles sont équipées de récepteurs bifréquences, dont les antennes sont toutes de même type, des Dornes Margolins.

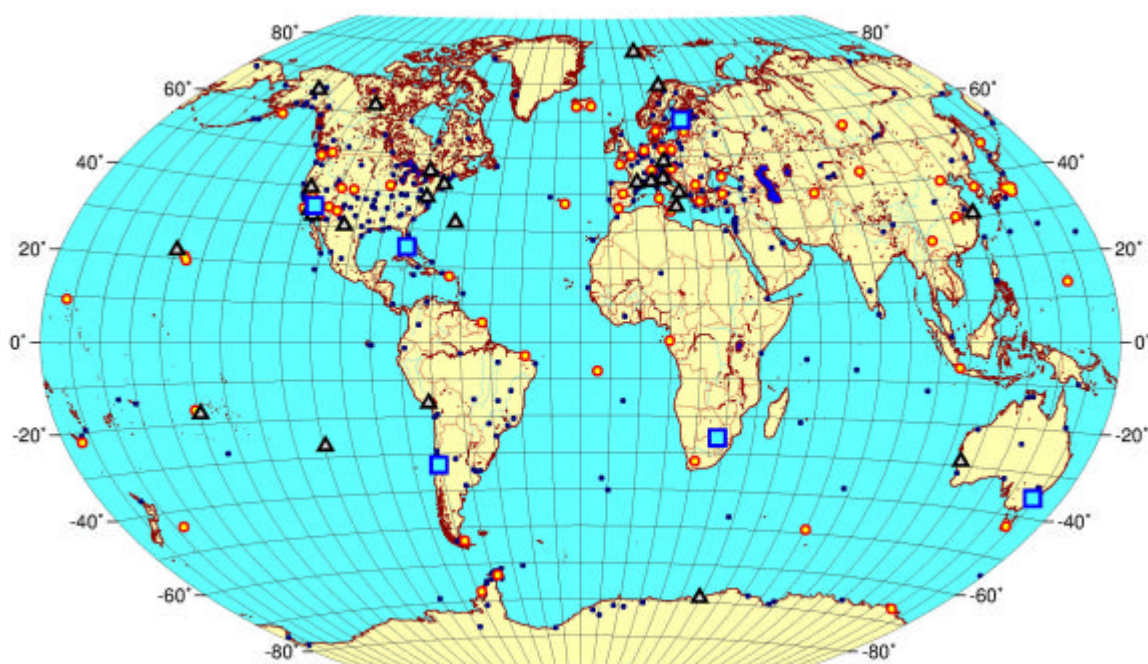


Fig. 24 : carte du réseau des stations IGS

Les centres de données

Ils sont hiérarchisés en 3 niveaux de compétences.

Il existe 20 centres opérationnels, qui ont la charge de :

- Transformer les données dans le format international RINEX
- Compresser le RINEX afin de faciliter les transferts
- Archiver les données
- Transmettre les données vers les centres de données régionaux

Chaque centre gère en moyenne une trentaine de stations.

Il existe 5 centres de données régionaux qui ont la charge de :

- Collecter les données de plusieurs centres opérationnels
- Archiver ces données
- Transmettre aux centres de données globaux, les observations

Il existe 3 centres de données globaux (IGN, CDDIS, SIO) qui ont la charge de :

- Archiver les données de toutes les stations IGS
- Transmettre les données aux centres d'analyses
- Collecter les produits IGS calculés par les centres d'analyses
- Archiver les produits IGS

Ces centres sont miroir entre eux et disposent donc des mêmes données. Ils sont aussi officiellement **les seuls portails d'accès aux produits IGS** pour les utilisateurs. Les données de toutes les stations IGS, les produits IGS et de nombreuses informations complémentaires sur les sites, leur historique, le système GPS en général, le système GLONASS est à disposition.

Les centres d'analyses et d'analyses associés

Il existe 7 centres d'analyses qui sont chargés de calculer les produits de l'IGS (CODE, ESA, GFZ, EMR, JPL, SIO, NOAA).

Ils reçoivent et traitent les données de l'ensemble des stations, puis renvoient les produits calculés vers les centres globaux et le centre d'analyse coordinateur, qui produira les produits officiels.

Les centres d'analyses associés sont en charge de la production d'un des produits IGS, par exemple, le modèle d'ionosphère et travaillent en association avec un centre d'analyse principal.

Les centres coordinateurs

Le centre d'analyses coordinateur assiste les centres d'analyses, contrôle les produits de ceux-ci, combine les différents produits des centres d'analyses pour obtenir les produits IGS officiels.

Le Bureau central, responsable du management de l'IGS, fait appliquer les directives du Governing Board, développe et maintient un serveur Web qui regroupe de nombreuses informations sur le GPS, sur l'IGS (infos sur les stations, sur les données, sur les centres de l'IGS, sur le fonctionnement de l'IGS) et aujourd'hui sur GLONASS.

Le Governing Board définit la politique générale de l'IGS.

8.1.c Les produits de l'IGS

Les orbites précises sont le produit le plus important produit par l'IGS.

Les 7 centres d'analyses produisent chacun les trois types d'orbites (prédites, rapides et précises) qui sont ensuite combinés pour donner les produits IGS officiels ainsi que les paramètres d'horloges des satellites et les paramètres de rotation de la Terre.

Les calculs sont réalisés par des méthodes dynamiques, c'est à dire que les centres d'analyses utilisent des modèles de forces pour obtenir leurs résultats.

La précision obtenue sur les différents paramètres est la suivante :

	Produits IGS finaux (*..IGS)	Produits IGS rapides (*..IGR)	Produits IGS prédits (*..IGP)	Produits radio diffusés (broadcast)
Délais	15 jours	2 à 3 jours	1 jour	immédiat
Ephémérides	5 cm	20 cm	50 cm	8 m
Horloges	0.3 ns	0.5 ns	150 ns	
Coordonnées du pôle	0.1 mas	0.2 mas		
Variation de pôle	0.2 mas/jour	0.4 mas/jour		
UT1-UTC	50 μ sec	300 μ sec		
Longueur du jour	30 μ sec/jour	60 μ sec/jour		

Comparaison d'orbites

Voici un exemple de comparaison des différents types d'orbites de l'IGS. Les orbites rapides, prédites et radio diffusées sont comparées à l'orbite finale qui est prise comme référence.

Pour cela, on définit à chaque instant le repère lié au satellite dont les trois axes sont :

- axe des X : le long de l'axe satellite - centre de la terre,
- axe des Y : le long de la trace
- axe des Z : dans le plan perpendiculaire à la trace et complétant le trièdre orthonormé direct.

Puis on calcule l'écart entre les deux orbites.

Ces comparaisons sont réalisées pour le satellite 22 sur une durée de 24 heures.

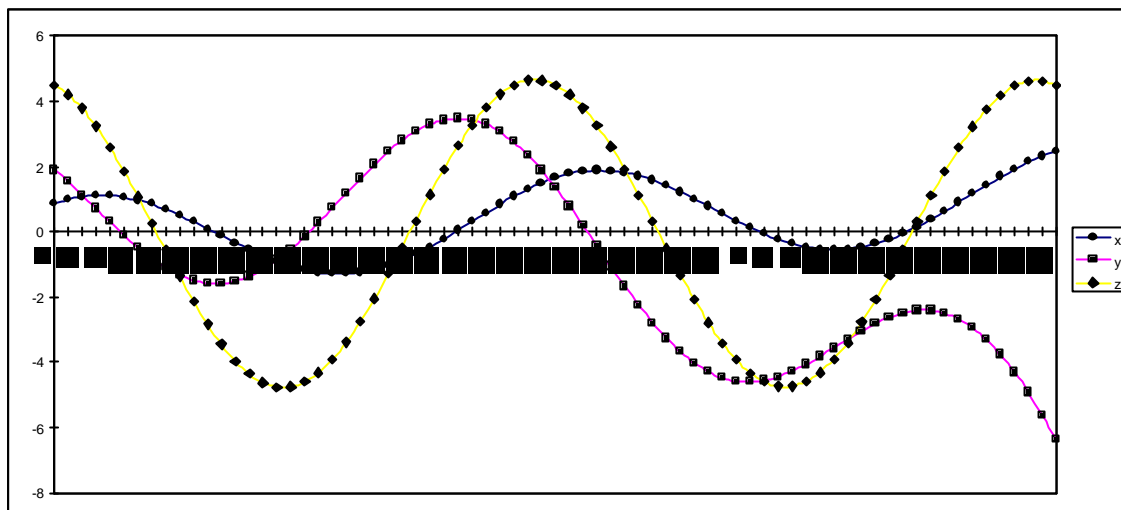


Fig. 25 : comparaison orbite finale - orbite radio diffusée

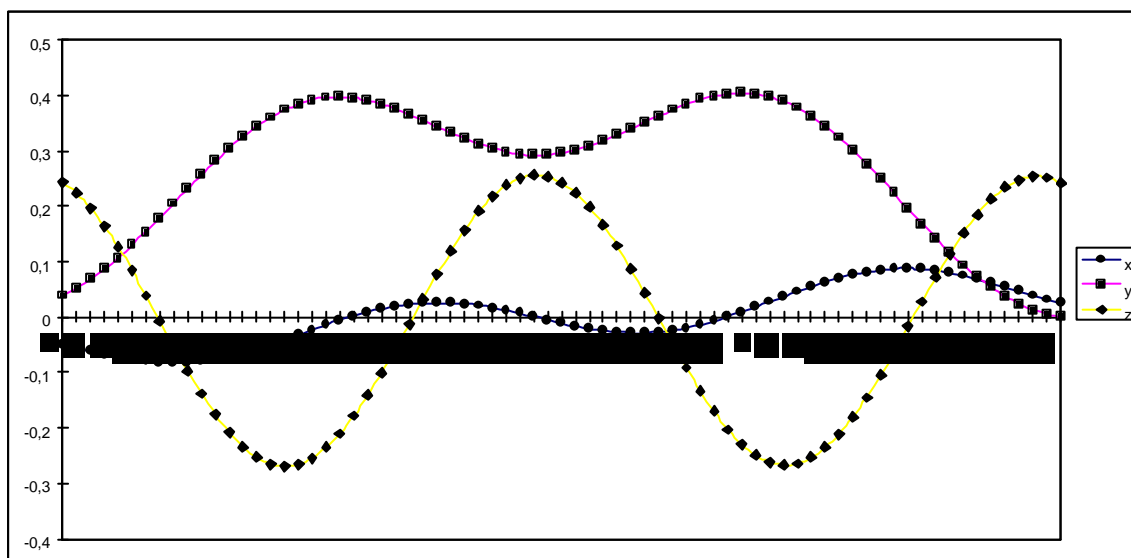


Fig. 26 : comparaison orbite finale - orbite prédite

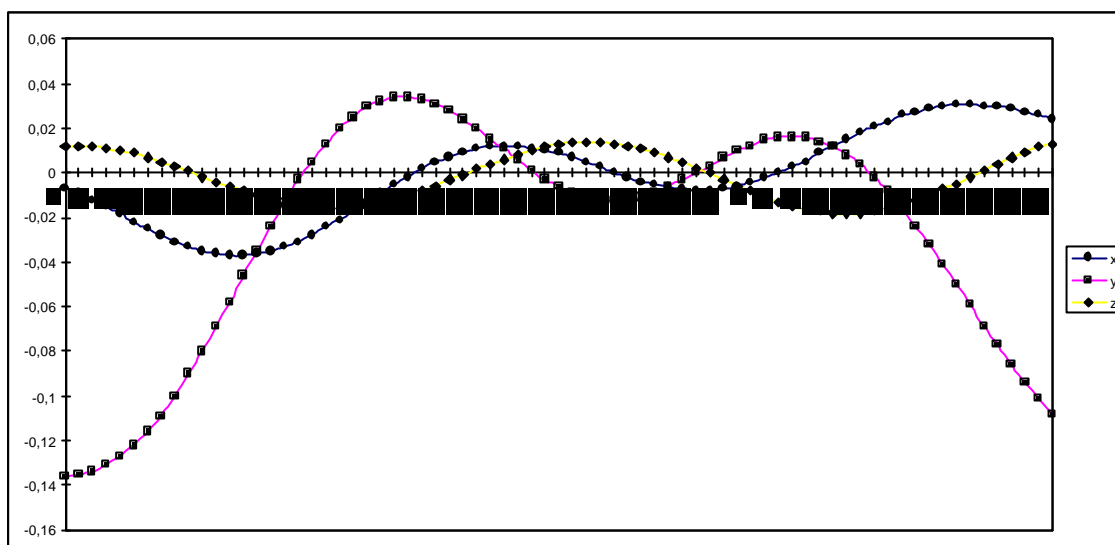


Fig. 27 : comparaison orbite finale - orbite rapide

Utilisation des produits de l'IGS

Les produits de l'IGS servent, en outre, à déterminer des points en absolu dans des zones où il n'existe pas d'infrastructure de géodésie spatiale. Pour apprécier la qualité de détermination d'un point, nous avons réalisé une simulation à l'ENSG en calculant un point connu en RGF93 à partir de stations européennes permanentes et en utilisant comme produits de l'IGS les orbites rapides.

Les conditions du test ont été les suivantes :

Nous avons mis en station un récepteur GPS de type LEICA système 300 bi-fréquences sur un point de la terrasse de l'ENSG (MLVN2). Les observations se sont déroulées de jour au cours du mois d'avril 1998 pendant une durée de 4h 30.

Nous avons réalisé les calculs avec le logiciel SKI 2.3 de LEICA.

Nous avons utilisé les produits de l'IGS suivant :

- Les observations de 4 stations européennes : Bruxelles, Matera, Madrid, Zimmerwald
 - Distance ENSG (MLVN2) Bruxelles : 252 km
 - Distance ENSG (MLVN2) Madrid : 1078 km
 - Distance ENSG (MLVN2) Matera : 1435 km
 - Distance ENSG (MLVN2) Zimmerwald : 425 km
- Leurs coordonnées dans l'ITRF96 à l'époque 98.4.

Les coordonnées finales de MLVN2 en RGF93 ont été obtenues à partir des spécifications de la *commission EUREF*. Cette transformation a permis de comparer nos résultats avec les coordonnées RGF93 officiels du point MLVN2.

Enfin nous avons utilisé l'orbite IGS officielle rapide du jour du test.

Voici les Résultats :

Latitude	Longitude	Hauteur
48° 50' 27.88650"	2° 35' 14.42393"	160.486

Tab. 5 : valeur de la moyenne des 4 déterminations en RGF93

Dlatitude (m)	Dlongitude (m)	Dhauteur (m)
0.031	0.010	-0.054

Tab. 6 : différence par rapport à la solution officielle RGF93

	Dlatitude	Dlongitude	Dhauteur
BRUX	-0.010	0.004	-0.003
MADR	-0.026	0.037	0.077
MATE	0.035	-0.039	-0.005
ZIMM	0.001	-0.002	-0.069
Ecart types	0.015	0.018	0.035

Tab. 7 : écarts des déterminations à la moyenne et écart types

8.2 L'EPN, EUREF Permanent Network

Le réseau européen permanent EPN, a été mis en place en 1995 sous l'égide de la commission EUREF chargée de la maintenance du système de référence européen. C'est une densification du réseau de l'IGS.

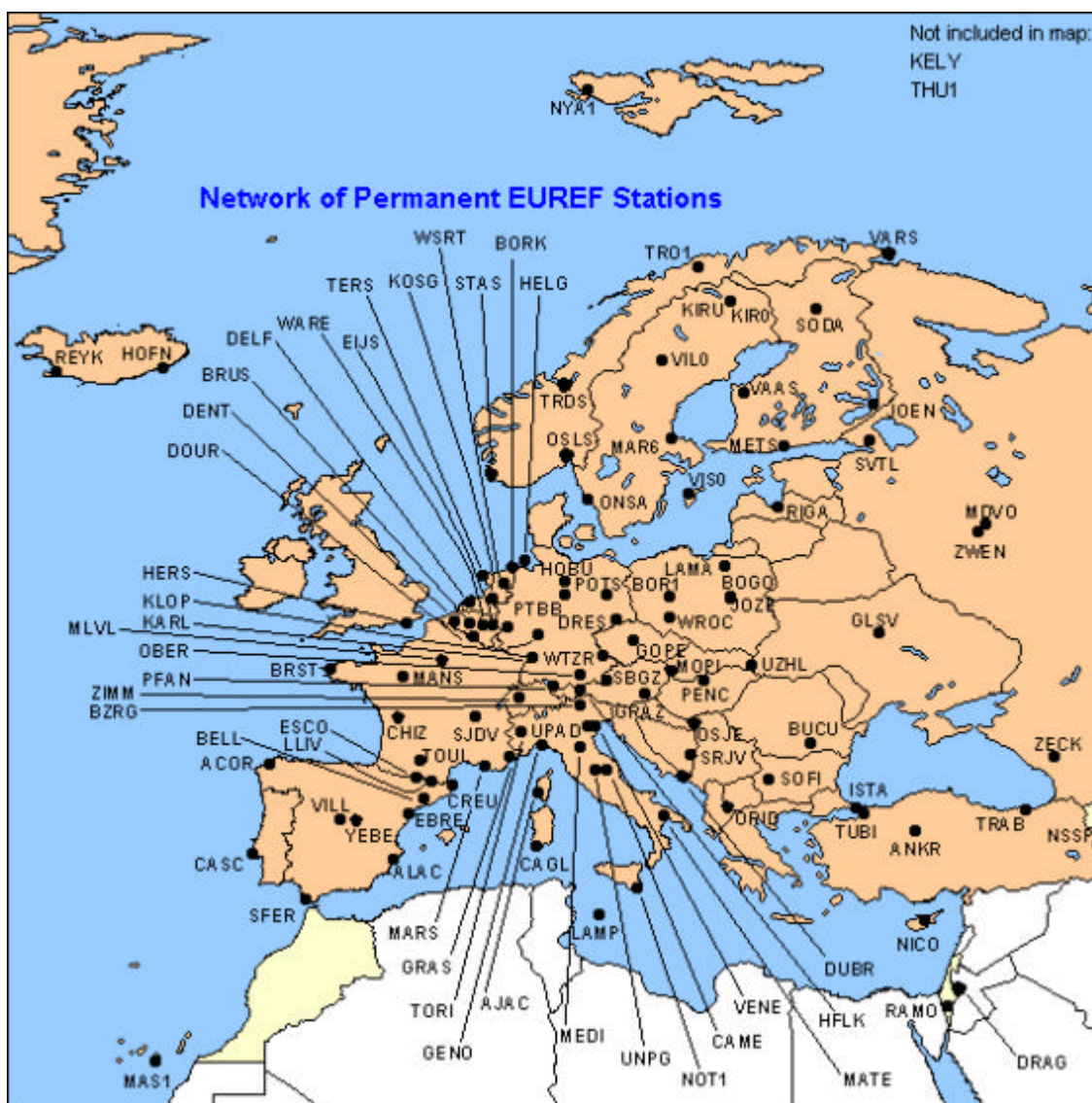


Fig. 28 : carte des stations du réseau EPN

Son but est double :

- il sert à maintenir le système de référence européen,
- il permet des densifications locales pour les pays européens.

Son organisation est calquée sur celle de l'IGS pour la gestion du réseau. Par contre, les centres d'analyses n'ont pas les mêmes buts. Ils sont chargés de calculer des solutions journalières et hebdomadaires pour des sous-ensembles de stations du réseau et ne

produisent pas d'orbites, de corrections d'horloges et de paramètres de rotation de la Terre.

Comme nous le verrons dans le cas de la France (paragraphe suivant), il existe au moins un centre d'analyses par pays qui traite les données d'un groupe de stations. Parmi celles-ci se trouvent les stations IGS et EPN du pays et certaines des pays limitrophes et des stations permanentes nationales. Toutes ces solutions sont ensuite collectées par le centre d'analyse coordinateur qui les combinent pour sortir une solution hebdomadaire pour l'Europe.

Ces traitements en continue permettent une surveillance de l'ensemble des points et sont une mine de renseignements pour les géophysiciens à la recherche de mouvements tectoniques.

Le réseau EPN regroupe aujourd'hui 150 stations en Europe (voir carte ci-après).

Il existe comme pour l'IGS, un site Web regroupant l'ensemble des informations sur ce réseau, dont l'adresse est : <http://homepage.oma.be/euref/>.

8.3 Le RGP, Réseau GPS Permanent

La France développe aujourd'hui un réseau permanent appelé RGP (Réseau GPS Permanent) qui est une densification de l'EPN.

Le but de ce réseau est multiple et de nombreux services sont ou seront développés à partir de cette infrastructure. Cette évolution se retrouve dans de nombreux pays où les infrastructures géodésiques sont en pleine évolution. Les réseaux traditionnels, qu'ils soient issus de techniques terrestres ou spatiales vont peu à peu laisser la place à des services, qui, s'appuyant sur les réseaux actifs, vont permettre un positionnement rapide non réservé à des professionnelles.

A long terme, il sera possible de se positionner sur l'ensemble du territoire couvert par le service avec **une précision du centimètre** à partir d'une "boîte noire" totalement automatique.

Ces nouveaux services sont lourds à mettre en œuvre et demandent une surveillance et une maintenance en continue. C'est pour cette raison que la mise en place en France du RPG résulte d'une association de partenaires publics et para-publics, dont voici la liste :

- Institut Géographique National (IGN)
- Centre National d'étude Spatiale (CNES)
- Centre Littoral de Géophysique, université de La Rochelle (CDLG)
- Ecole Supérieure des Géomètres et Topographes (ESGT)
- Institut de Protection et de Sécurité Nucléaire (IPSN)
- Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC)
- Météo France
- Observatoire de la Côte d'Azur (OCA)
- Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM)

- Université de Nice Sophia Antipolis (CNRS, REGALL)

8.3.a Le réseau du RGP

Voici la carte des stations du RGP actuelles et les évolutions prévues pour les années prochaines.

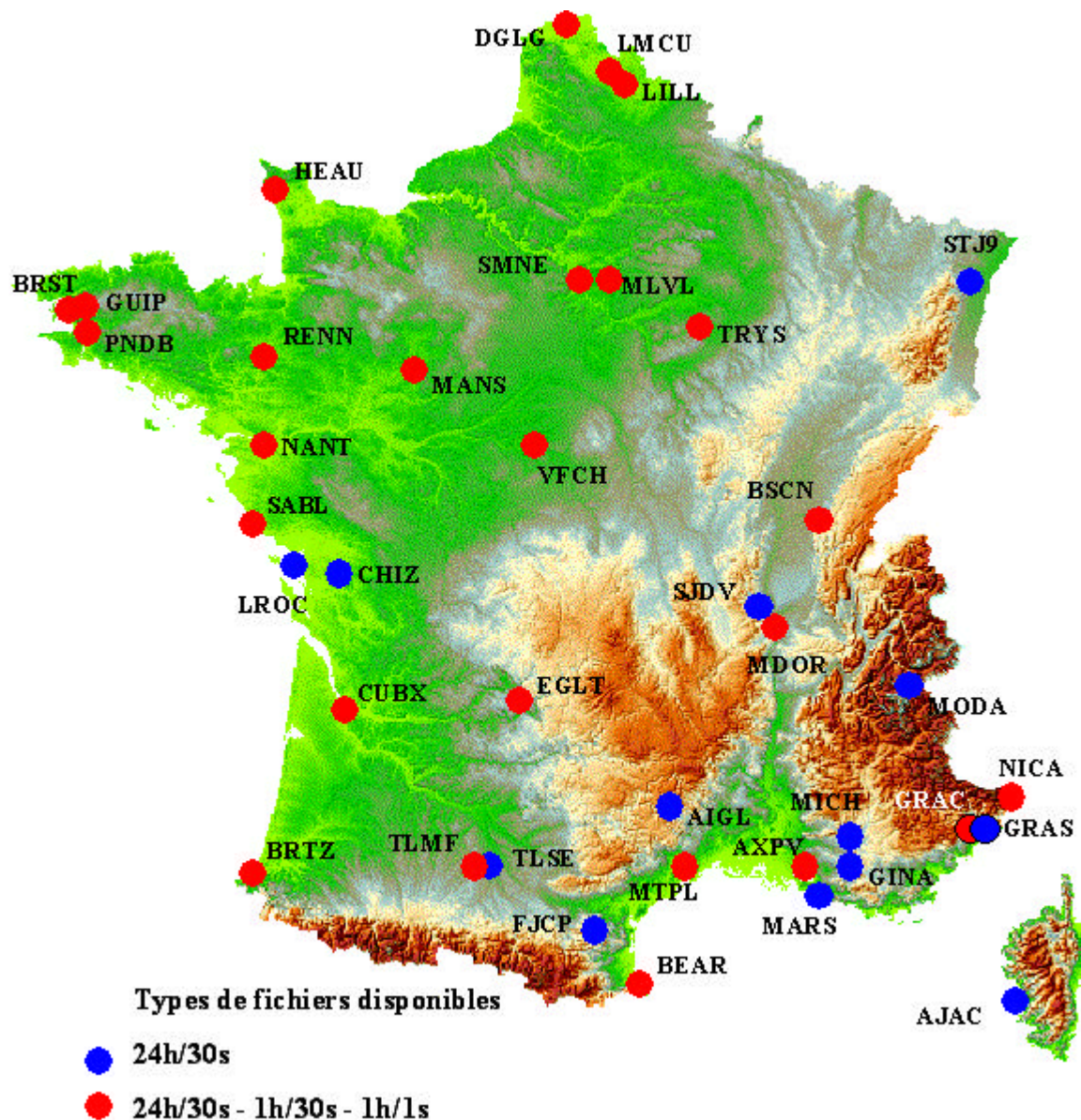


Fig. 29 : carte des stations actuelles et futures du RGP

L'ensemble des stations est aujourd'hui équipé de récepteurs bifréquences et d'une antenne de type Dorne Margolin au standard de l'IGS (voir photos de stations ci-après). La transmission des données est assurée par des lignes téléphoniques à haut débit et en principe se fait automatiquement. Une partie des observations est rapatriée à l'ENSG à Marne la Vallée qui est centre d'analyses et assure le calcul journalier et hebdomadaire.



Fig. 30 : antenne Dorne Margolin ENSG



Fig. 31 : récepteur Ashtech Saint Michel de l'observatoire

8.3.b Le traitement des données à l'IGN

Le calcul journalier est réalisé à partir de 29 stations incluant des stations françaises et européennes (voir carte ci-dessous). Chaque jour est traité séparément et donne lieu à une solution, puis une combinaison par semaine est réalisée. Celle-ci est ramenée dans l'I TRF97 à l'époque des observations et envoyée au centre d'analyse coordinateur ou elle contribue à la solution européenne.

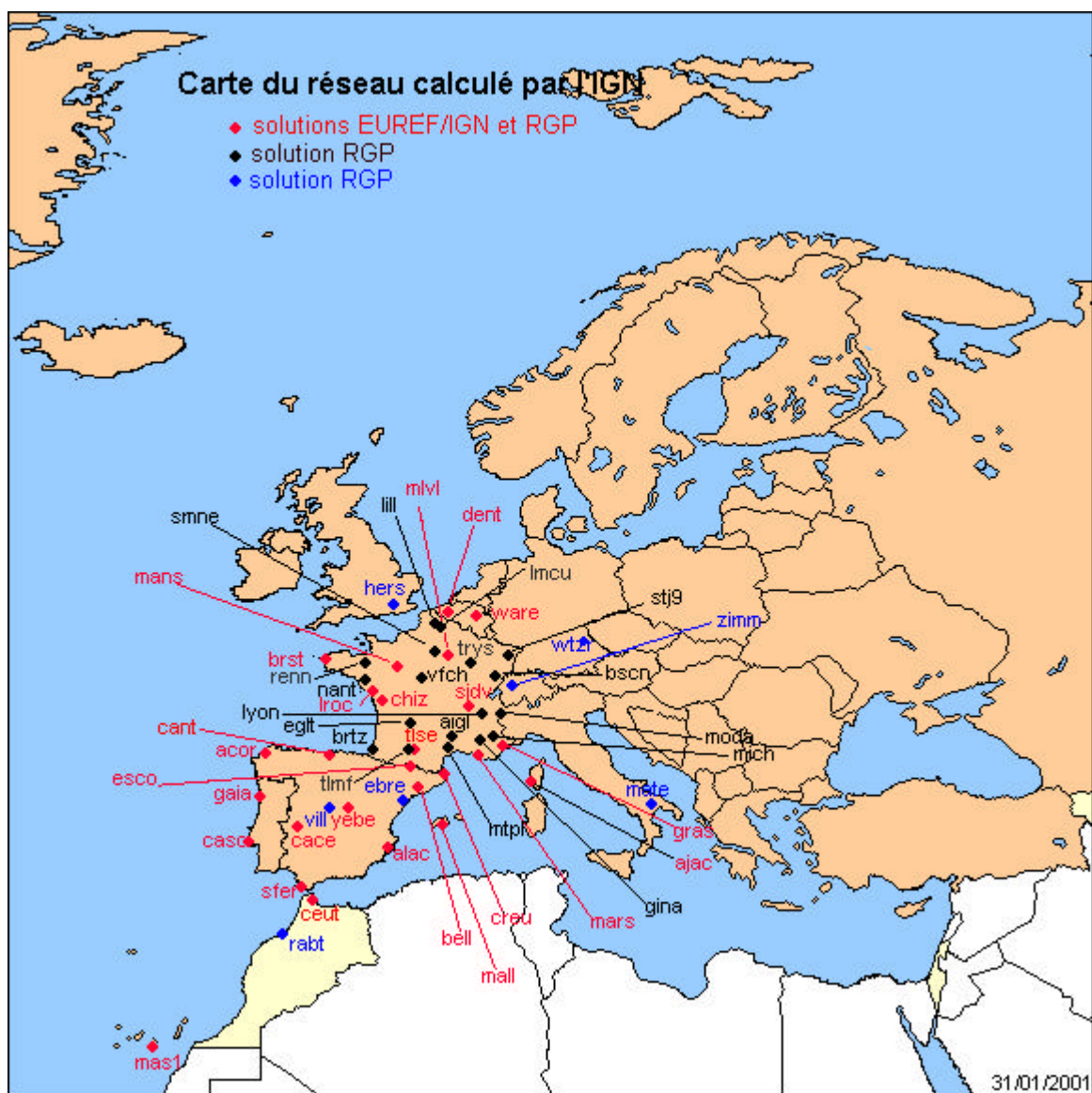


Fig. 32 : carte des stations incluses dans le traitement IGN

Pour l'ensemble des stations, il existe donc des séries temporelles précises qui permettent de juger de l'évolution de leurs positions.

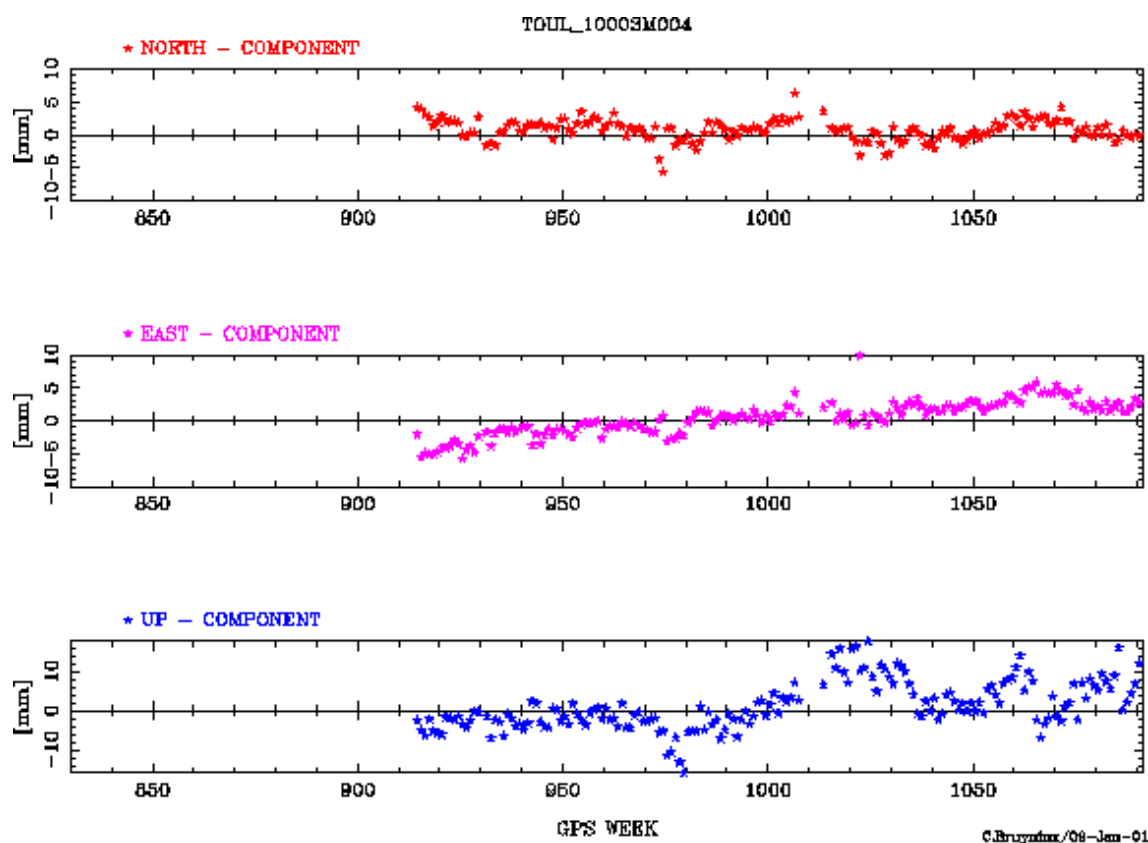


Fig. 33 : séries temporelles, station de Toulouse

8.3.c Produits et services associés au RGP

Voici les produits du RGP :

- Les fichiers d'observations journaliers des différentes stations cadencés à 30 secondes sont à la disposition des utilisateurs ainsi que les informations indispensables à leur utilisation (coordonnées des points en RGP93, descriptif des stations...). Il faut préciser que pour la station du Mans et de Marne la Vallée, les observations sont aussi disponibles sous forme de fichiers horaires cadencés à 1 seconde.
- Les résultats des calculs complets sous forme de rapports de traitements et de séries temporelles (voir ci-dessous un exemple de séries temporelles)
- Un serveur Web permet l'accès à l'ensemble de ces informations et décrit les modes d'emploi.

Serveur web : <http://lareg.ensg.ign.fr/RGP>

Serveur ftp : <ftp://lareg.ensg.ign.fr/> le username est anonymous, le password est votre adresse mel.

Le principal service à se mettre en place est un service DGPS. Les corrections de deux stations - Saint Mandé et Lyon - sont transmises pour le moment par GSM. Il est prévu 22 stations à terme et une diffusion par onde hertziennne.