

Traitement des données GPS avec GINS

Sylvain Loyer, Janvier 2007

Table des matières

1	Equations d'observations GPS	17
1.1	Notations et définitions	17
1.1.1	Mesure de code	17
1.1.2	Mesure de phase	17
1.1.3	Simultanéité des mesures	18
1.1.4	Epoques	18
1.1.5	Passages	18
1.1.6	Fréquences GPS	18
1.1.7	Bruit des mesures GPS	19
1.1.8	Décalage d'horloge et temps de trajet	19
1.2	Equations d'observations finales	20
2	Fonction de mesure GPS non différenciée	21
2.1	Datation des mesures	21
2.1.1	Temps GPS et TAI (Temps Atomique International)	21
2.1.2	Calcul pratique de la datation	24
	Datation à partir de l'horloge récepteur	24
	Datation à partir de l'horloge émetteur	24
2.1.3	Une condition pour la simultanéité des mesures	26
2.2	Propagation ionosphérique et observables iono-free	27
2.2.1	Retard ionosphérique	27
2.2.2	Combinaison de mesure iono-free	30
2.3	Quantité théorique géométrique + relativité	30
2.3.1	Distance géométrique	30
2.3.2	Correction relativiste de courbure	31
2.3.3	Déplacement des stations terrestres	31
2.4	Attitude des satellites GPS	32
2.5	Allongement troposphérique	33
2.6	Modélisation des centres de phase GPS et corrections d'antenne	35
2.7	Correction de "phase wind-up" pour les mesures non différenciées	38
2.7.1	Méthode	38
2.7.2	Algorithme de continuité	38
2.7.3	Impact de la correction en terme d'orbitographie	42
2.8	Equations aux dérivées partielles et notations	42
2.8.1	Equations d'observation	42
2.8.2	Equation normale et solutions	43

3	Paramètres d’horloges et méthode locale	45
3.1	Introduction	45
3.2	Méthode globale et méthode locale	48
3.3	Résolution par blocs	49
3.4	Solutions	50
3.5	Algorithme de calcul époque par époque	51
3.6	Calcul des paramètres d’horloges seuls	51
3.7	Gestion des équations d’observation ne dépendant pas des paramètres locaux	51
4	Fonction de mesure GPS double différence	53
4.1	Principe	53
4.2	Observable iono-free double différence	54
4.3	Notion de passage doubles différences	54
4.4	Quantité théorique double différence	54
4.5	Corrélation des mesures doubles différences	54
4.5.1	Introduction	54
4.5.2	Matrice de covariance et équations normales pour des mesures corrélées	55
	Définitions et propriétés	55
	Algorithme de formation des équations normales doubles diffé- rences	57
	Implantation pratique dans GINS	57
	Gestion des mesures à poids nul	59
5	Algorithme de recherche des valeurs entières et fixation/réduction de la ma- trice normale inverse dans GINS	61
5.1	Principes généraux	61
5.2	Les combinaisons utiles pour les doubles différences	61
5.2.1	Combinaison “wide-lane”	62
5.2.2	Combinaison ‘Melbourne - Wubben’	62
5.2.3	Ambiguïtés “narrow-lane”	63
5.2.4	Choix des valeurs entières et réglages proposés	63
5.2.5	Réduction de la matrice inverse	64
5.2.6	Exemples pratiques	67
5.3	Correction phase wind-up pour les doubles différences	67
6	Prétraitements et Traitements	71
6.1	Flux des données et prétraitements des données GPS	71
6.2	Rappatriement des données	71
6.3	Détection des sauts de cycles	73
6.4	Prétraitement de mise en forme : PDGR90	76
6.4.1	Fichier historique de la constellation GPS	78
6.4.2	Fichier des stations	80
6.4.3	Fichiers d’horloges GPS	81
6.4.4	Fichiers d’antennes GPS	81
6.5	Formation des doubles différences	81
6.6	Programme <i>PREPARS90</i>	82

6.7	Programme <i>GINS90</i>	83
7	Quelques cas pratiques	85
7.1	Horloges et orbites figées et traitement des données sol doubles différences	85
7.1.1	Généralités	85
7.1.2	Exemple : Mouvement vertical de la station de La Rochelle	86
7.2	horloges et orbites figées et traitement des données embarquées	91
7.3	Restitution des orbites hautes	93
8	Références	95
9	Annexes	97
9.1	Annexe : Connaître la datation, oui,... mais avec quelle exactitude ?	98
9.2	Annexe : Algorithme de formation des doubles différences :	100
9.2.1	Contraintes	100
9.2.2	Choix des lignes de base et des couples de satellites retenus :	100
9.3	Annexe : Résolution des ambiguïtés wide-lane	106
9.4	Annexe : Inversion par blocs	108
9.5	Annexe : Inverse d'un sous bloc d'une matrice à partir de l'inverse de la matrice complète	109
9.6	Annexe : Solutions d'un système inverse avec des inconnues fixées à partir des solutions du système complet	110
9.7	Annexe : IGSMail-5189 : Planned changes to IGS antenna calibrations	111

Liste des tableaux

1.1	Fréquences et longueurs d'ondes des mesures GPS, de quelques combinaisons linéaires utiles.	19
2.1	Sorties de la fonction distance géométrique commune à tous les observables de GINS.	32
2.2	Description synthétique des modèles de troposphère disponibles dans GINS	34
2.3	Statistiques sur les résidus de mesure en cm avec ou sans correction phase wind-up (les tests ont été réalisés sans élimination de mesures).	42
3.1	Exemples de valeurs de différents paramètres dans le traitement de mesures GPS non différenciées.	47
4.1	Nombre de mesures doubles différences pour trois exemples typiques. . .	55
6.1	Étapes principales du programme de détection des sauts (selon F. Mercier)	73
6.2	Conditions de validité d'une mesure au niveau du programme <i>PDGR90</i> .	77
6.3	Lien entre numéro GINS et le bloc du satellite GPS. xx représente le numéro PRN (de 1 à 40).	78
6.4	Paramètres géométriques libérables dans GINS et affectant la mesure GPS.	83
7.1	Caractéristiques des différents traitements effectués.	88
7.2	Statistiques du traitement par ligne de base pour les 15 stations du réseau.	88
7.3	Résidus de phase pour les différents traitements.	89
7.4	Statistiques des différences entre les mouvement verticaux observés et la référence correspondant aux courbes de la figure 7.2	89
7.5	Type et nombre de paramètres libérés pour les arcs de 2 jours	94
9.1	Exemple de sortie de <i>DOUBLE90</i> ; les 56 lignes de bases formées au premier passage.	103
9.2	Exemple de sortie de <i>DOUBLE90</i> ; les 16 lignes de bases (non redondantes) formées au deuxième passage.	104

Table des figures

2.1	Ecart entre les réalisations des échelles UTC(USNO) et GPS en 2005-2006 ; dates en jours MJD (Modified Julian Date)	22
2.2	Ecart entre les réalisations des échelles UTC(BIPM) et UTC(USNO) en 2005 ; dates en jours MJD (Modified Julian Date)	23
2.3	Différences entre horloges BRDC et horloges précises pour l'ensemble des satellites au cours d'une journée	25
2.4	Exemple de carte global de Ionosphère calculée à partir des observations GPS par l'Astronomisches Institut Universität Bern (AIUB), source http://www.cx.unibe.ch/aiub/ionosphere.html	27
2.5	Exemple de correction ionosphérique en mètres pour quatre passages à la station POTS. La correction de phase a été inversée pour la comparaison avec le code. Les valeurs issues du modèle IRI2001 (International Reference Ionosphere 2001) sont présentées à titre de comparaison (ref= http://nssdc.gsfc.nasa.gov/space/model/ionos/iri.html). On distingue nettement le bruit élevé des mesures de code par rapport à la phase surtout en début et fin de passage.	29
2.6	Trièdre ($\vec{X}, \vec{Y}, \vec{Z}$) définissant le repère des satellites GPS. On a aussi représenté les axes du repère ($\vec{X}', \vec{Y}', \vec{D}$) utilisé pour la modélisation dynamique.	32
2.7	Exemple de cartes de correction d'antenne pour les mesures de phase des antennes du type ASH701946 (en haut à gauche), avec "snow-cover" (en haut à droite) et les antennes TRM14177 (en bas à gauche) et LEIAT504 (en bas à droite). Données issues des cartes de ANTEX05 l'IGS.	36
2.8	Exemple de cartes de correction d'antenne pour l'antenne du satellite GRACE-A obtenues à partir de l'analyse de plus de 1.5 million résidus de mesures. En haut range iono-free et en bas phase iono-free. Les corrections atteignent ici plusieurs dm pour le range et la dizaine de mm pour la phase.	37
2.9	Quelques exemples de correction phase wind-up pour des passages non différenciés. En grisé , ensemble des passages de l'arc.	39
2.10	Corrections phase wind-up élémentaires avec continuité pour une même combinaison DD.	40
2.11	Corrections phase wind-up pour les passages doubles différences.	41

3.1	Représentation schématique des équations d'observations. A est la matrice des dérivées partielles, où l'on a distingué les dérivées partielles associées aux paramètres locaux de celles concernant les paramètres globaux, ΔX est le vecteur des paramètres à résoudre et enfin $(R + \epsilon)$ est le vecteur des résidus d'observations.	48
3.2	Représentation schématique des équations d'observations dans le cas où on combine différents types de mesures. A est la matrice des dérivées partielles, où l'on a distingué les dérivées partielles associées aux paramètres locaux de celles concernant les paramètres globaux, ΔX est le vecteur des paramètres à résoudre et enfin $(R + \epsilon)$ est le vecteur des résidus d'observations.	52
4.1	Représentation schématique des équations d'observations. A est la matrice des dérivées partielles, ΔX est le vecteur des paramètres à résoudre, R est le vecteur des résidus d'observations et enfin Q est la matrice de covariance associée aux observations. En haut, mesures non corrélées : la matrice de covariance est diagonale ; en bas situation pour les mesures GPS doubles différences : la matrice est bloc-diagonale.	56
4.2	Représentation d'une matrice de corrélation Q avant inversion. On a ici une époque avec 120 mesures. Seule la partie triangulaire supérieure de la matrice symétrique est représentée. Les formes qui apparaissent dépendent de l'ordre dans lequel sont rangées les mesures.	58
5.1	Histogrammes des ambiguïtés iono-free estimées exprimées en terme de nombre de cycles "narrow-lane". En haut (resp. en bas) avant, (resp. après) l'application de la correction "Wide-lane" (cf. équation 5.8). Les histogrammes centrés sur les entiers "narrow-lane" sont affinés ce qui diminue la taille de l'espace de recherche. La correction "narrow-lane" (cf. equation 5.9), qui n'est pas illustrée ici, a simplement pour effet de ramener l'ensemble de la distribution entre -0.5 et 0.5 cycles.	65
5.2	Comparaison 3D entre orbites GINS et IGS, par satellite et pour 2 jours de traitement sur un réseau global de 55 stations. Différentes valeurs du seuil de fixation ont été testées. Le taux de fixation des ambiguïtés entières est indiqué en pourcentage dans la légende. La valeur de 0.17 apparaît comme optimale pour ce problème. Des valeurs plus élevées dégradent le résultat. On constate une très nette amélioration de l'ensemble des orbites dans le cas où les ambiguïtés sont fixées à des valeurs entières par rapport au cas où elles restent réelles.	67
5.3	Ecart 3D globaux de la constellation / IGS pour une semaine de restitution pour les 3 cas non différenciées (NDIF), doubles différences (DDIF) et doubles différences avec ambiguïtés fixées (DDIF FIX ; seuil = 0.17). La fixation améliore nettement le résultat. La solution non différenciée donne ici une qualité équivalente	68

5.4	Expérience d'observation des mouvements dus à la surcharge des marées océaniques (campagne Bretagne ; 1 point par heure). Sans correction des centres de phase des antennes en azimuth/élévation et sans fixation des ambiguïtés entières (bleu pointillé) ; avec correction des centres de phase des antennes en azimuth/élévation (rouge) puis fixation des ambiguïtés entières (noir). Le gain apporté par la fixation des ambiguïtés est net en particulier sur la composante Est.	69
6.1	Les étapes du traitement GPS avec GINS (prétraitements et traitements). Ces étapes sont décrites en détail dans ce chapitre. "Mesures NDIF" = Mesures Non différenciées GPS ; "Mesures DDIF" = Mesures Doubles différences. En grisé : "Programmes"	72
6.2	Différences finies d'ordre 4 pour les mesures L_1 d'une station GPS au cours d'une journée. L'ensemble des passages sur tous les satellites sont superposés. Les anomalies représentent des sauts de cycles potentiels détectés sur seuil. Les sauts de grande amplitude sont clairement détectables (en bas). Avec ce seul observable, on détecte des sauts jusqu'à quelques dizaines de cycles (voir zoom sur la figure du haut).	74
6.3	Illustration de l'intérêt de la détection des sauts sur 3 jours de données. Les passages sont représentés par des traits bleus interrompus par des sauts (points rouges). En haut, le traitement sur 1 jour introduit des sauts artificiels (environ 30%) au date 0 et 86400 secondes à cause de la troncature du fichier. En bas, le traitement sur 3 jours fait disparaître les sauts artificiels. Une utilisation du programme sur 3 jours glissants permet de supprimer les sauts artificiels sur la durée voulue.	75
6.4	Historique des lancements, périodes d'activité des satellites GPS et type de bloc (II,IIA,IIR) des satellites GPS depuis 1990.	79
6.5	Représentation schématique des informations contenues dans le fichier des stations pour les récepteurs GPS. En bleu, coordonnées du MARQUEUR par rapport à l'origine du système de référence, en rouge le vecteur ECCENTRICITE reliant le point de référence du marqueur au point de référence de l'antenne et en vert le type l'antenne utilisée donnant accès au centre de phase des mesures.	80
7.1	Exemple de réseau local : observation des mouvements verticaux de la station de La Rochelle.	87
7.2	En haut, mouvement vertical observé pour la station LROC, en fonction des différentes caractéristiques des traitements. En bas, différences par rapport au mouvement de référence représenté en grisé.	90
7.3	De haut en bas, nombre de mesures éliminées, nombre de mesures conservées, résidus phase et résidus range pour le traitement diurne des mesures non différenciées des deux satellites GRACE. Dans ce cas, les horloges des deux récepteurs embarqués et les ambiguïtés non différenciées réelles sont les seuls paramètres de mesure estimés. Les anomalies (comme par exemple au jour 60) permettent de détecter les arcs à problèmes.	91
7.4	Réseau de stations utilisé pour la restitution en routine des orbites de la constellation GPS.	93

9.1	Exemples de décalages d'horloges de stations GPS typiques observés sur une journée. En bas horloges calées sur le temps GPS, au milieu, horloges à recalage régulier (quelques 0.1 microseconde par secondes), en haut, dérives libres (de l'ordre de quelques centièmes de nanosecondes par secondes).	99
9.2	Exemple de réseau formé par le programme <i>DOUBLE90</i> . L'algorithme de formation empêche à ce niveau la formation de E-F qui risquerait de créer des doubles différences non indépendantes.	101
9.3	Deux exemples de bases formées. Les segments colorés bleus et oranges indiquent la présence de données pour l'époque et la station concernée. En haut, passages d'une des premières lignes de bases choisies ($l = 217 \text{ km}$), en bas passages d'une des dernières ligne de base choisie par le programme de formation ($l = 4386 \text{ km}$).	105
9.4	Exemples de résidus Wide-lane (combinaison Melbourne-Wubben) et ambiguïtés estimées.	106
9.5	Distribution des résidus Wide-lane avant et après estimation des ambiguïtés.	107

Introduction

Avertissement

Ce document se veut une description aussi complète que possible des algorithmes et des méthodes utilisés pour le traitement des données GPS dans le logiciel d'orbitographie GINS. Les codes évoluent plus rapidement que les équations et nous avons volontairement limité les descriptions informatiques au profit des équations sur lesquelles sont basés les algorithmes. Néanmoins des indications sur le codage ou les routines concernées sont parfois mentionnées dans le document.

Ce document n'est pas un document sur GPS en général ou sur l'ensemble des applications possibles de GPS pour la géodésie, mais bien un document sur GPS et GINS. Nous nous sommes limités à la description des algorithmes GPS effectivement présents dans GINS à la fin de l'année 2006 afin de renseigner au mieux les futurs utilisateurs du logiciel. Les algorithmes présentés dans ce document ont tous été validés et utilisés pour des applications précises dont certaines sont décrites au chapitre 7, à la fin du document.

Historique

La façon dont sont organisés les traitements GPS dans GINS est partiellement liée à l'histoire du logiciel. Le logiciel GINS a été initialement conçu dans les années 70 pour traiter les données de géodésie spatiale disponibles à l'époque. Le logiciel pouvait alors traiter un seul satellite à la fois. Ses utilisations principales concernent :

- l'utilisation des mesures de géodésie spatiale pour la restitution de l'orbite précise des satellites
- le traitement et l'interprétation des données satellites des missions d'observation du champ de gravité de la Terre
- le positionnement précis des stations des réseaux des systèmes de suivi satellital pour la construction des systèmes de références

La mesure GPS est "arrivée" dans le logiciel avec le satellite Topex et les toutes premières mesures GPS réalisées par un récepteur embarqué au début des années 1990. C'est à cette époque que le logiciel a été modifié pour inclure les satellites de la constellation GPS et traiter les données des récepteurs embarqués et terrestres. Des modifications plus récentes (à partir des années 2000) ont visé à rendre le logiciel "opérationnel" pour effectuer des traitements massifs avec le lancement des missions satellite CHAMP (2000), puis GRACE(2002) qui embarquaient des récepteurs GPS comme instrument de suivi principal. Depuis début 2004, le logiciel sert à traiter en routine les données de réseaux de près

de 100 stations GPS pour la restitution des orbites précises des satellites GPS. Au cours de ces 15 années, le logiciel a suivi les évolutions des différents standards internationaux et les algorithmes n'ont pas cessé d'évoluer pour améliorer les modélisations.

Généralités sur GINS

Le logiciel GINS est un logiciel de traitement des données de géodésie spatiale terrestre et planétaire.

Le principe général du logiciel GINS est :

1. de calculer au mieux les résidus pondérés entre les mesures et les modèles de mesure (encore appelées quantités théoriques).
2. de construire des équations linéaires reliant les résidus aux corrections sur les paramètres des modèles.

Pour réaliser le 1. le logiciel contient les modèles les plus précis possibles intervenant dans les équations de mesure :

- a. Modèles de déplacement des stations de mesure,
- b. Modèles de rotation des corps (Terre ou planète..),
- c. Modèles de propagation des mesures dans l'atmosphère,
- d. Modèles dynamiques permettant de calculer les trajectoires précises des satellites artificiels. Les éphémérides des satellites artificiels sont intégrées numériquement au sein du logiciel,
- e. Modèles de pondération des mesures.

Pour réaliser le point 2. le logiciel contient :

- a. Les algorithmes de calcul de nombreuses dérivées partielles des paramètres géophysiques des modèles de force (Par exemple les coefficients du champ de gravité) et des dérivées partielles des modèles géométriques intervenant dans le calcul des quantités théoriques des mesures (Paramètre de rotation de la Terre, déplacement des stations,...) ;
- b. Des éléments d'algèbre linéaire permettant de former les équations linéarisées (équations normales) à partir des dérivées partielles et des résidus pondérés des mesures et des éléments pour résoudre ces équations ;
- c. Un ensemble d'éléments permettant la définition, la création, l'indication , bref la gestion au sens large des paramètres libérables par le logiciel.

Le logiciel permet en outre de faire des itérations pour ajuster une partie des modèles a priori aux observations (Eléments orbitaux, biais de mesures,..etc) et éliminer certaines mesures avant la formation des équations linéaires finales.

Les équations linéaires issues de GINS sont formées à convergence pour être cumulées, contraintes, réduites et finalement inversées par la chaîne de manipulation des équations normales DYNAMO.

Le logiciel GINS est un logiciel **multi-mesures**. Les mesures traitées en routine par le logiciel sont les mesures Laser (Satellite Laser Ranging et mesures laser-lune), les mesures doppler (DORIS), les mesures d'interférométrie à très longue base (VLBI), les mesures altimétriques (simples et points de croisement), les mesures GPS (non différenciées ou doubles différences), les mesures inter-satellites GRACE (distance, vitesse, accélération), les mesures "planétaires" effectuées entre les sondes martiennes et le réseau du Deep Space Network(DSN).

En outre on peut utiliser les éphémérides comme pseudo-mesures et faire de la simulation de mesure.

Des mesures de différents types peuvent être traitées lors d'un même arc pour contraindre simultanément certains des paramètres en communs.

De nombreux éléments de logiciel sont aujourd'hui communs à toutes les mesures pour assurer le plus de fiabilité (mouvement des stations, modèles de force, modèle de rotation, modèles de propagation troposphérique, fonction de mesure de distance entre deux objets, construction et inversion des équations normales).

Le logiciel est utilisé quotidiennement tant pour des études (simulations, tests de nouveaux modèles, préparation de futures missions,...) que pour des traitements intensifs systématiques (pour la génération des champs de gravité planétaires ou terrestres comme les modèles GRIM et plus récemment EIGEN ou la détermination des positions de stations et des paramètres de rotation de la Terre comme pour l'expérience des CRC et comme outil d'un des centres d'analyse de l'international Doris Service).

Chapitre 1

Equations d'observations GPS

1.1 Notations et définitions

On rappelle ici les équations de mesure GPS pour les observables élémentaires qui sont les mesures de code et de phase. Ces mesures sont effectuées sur une ou plusieurs fréquences $f_i, i = 1, 2, \dots$ par des récepteurs multicanaux qui reçoivent simultanément les signaux émis par les différents satellites GPS en visibilité. On utilisera les notations usuelles f_i pour la fréquence et λ_i pour la longueur de l'onde i .

1.1.1 Mesure de code

La mesure de code P est une mesure de différence entre la date tr_r de réception du code GPS au niveau du récepteur (donnée en temps récepteur) et la date d'émission te_e de ce code (donnée en temps émetteur). On exprime cette différence en terme de pseudo-distance P ou "range" en la multipliant par la vitesse de la lumière c . Ce qui s'exprime en tenant compte du bruit de mesure σ_P :

$$P = c(tr_r - te_e) + \sigma_P \quad (1.1)$$

1.1.2 Mesure de phase

La mesure de phase $\Delta\Phi$ est la mesure de la différence entre la phase Φ_{r_r} de la porteuse générée par le récepteur et la phase Φ_{e_e} de la porteuse émise par les satellites GPS et reçue via l'antenne. On l'exprime généralement en nombre de cycles (et fraction de cycles) F_c ou en unité de distance L (de bruit σ_L). Les différentes expressions sont reliées par les équations :

$$\begin{aligned} \Delta\Phi &= (\Phi_{r_r} - \Phi_{e_e}) + \text{bruit} && [\text{radians}] \\ F_c &= \Delta\Phi/2\pi + \text{bruit} && [\text{cycles}] \\ L &= cF_c/f + \sigma_L = \lambda F_c + \sigma_L && [\text{m}] \end{aligned} \quad (1.2)$$

Cette mesure est reliée à la différence entre les dates de réception et d'émission à une ambiguïté N près ; ce que l'on écrit (ref....) :

$$\begin{aligned}
 \Delta\Phi &= 2\pi f(tr_r - te_e) + 2\pi N + \text{bruit} && [\text{radians}] \\
 F_c &= f(tr_r - te_e) + N + \text{bruit} && [\text{cycles}] \\
 L &= cF_c/f + \sigma_L = c(tr_r - te_e) + \lambda N + \sigma_L && [\text{m}]
 \end{aligned}
 \tag{1.3}$$

1.1.3 Simultanéité des mesures

Les mesures GPS (code et phase) sont effectuées de manière simultanée pour l'ensemble des fréquences et pour les différents satellites en visibilité. Ceci est vrai au sein même des récepteurs mais aussi pour l'ensemble des récepteurs disposés sur la planète (s'ils sont réglés correctement). A ce jour la plupart des récepteurs GPS effectuent des mesures calées en temps GPS sur des multiples de 1, 10 ou 30 secondes. Cette simultanéité permet des combinaisons entre mesures du même récepteur et entre mesures de récepteurs différents, en particulier pour éliminer les biais et erreurs communes aux mesures.

1.1.4 Epoques

Une époque GPS est la date commune des mesures effectuées par l'ensemble des récepteurs calés sur le temps GPS. Toutes les mesures effectuées lors d'une même époque présentent des paramètres communs et peuvent être traitées simultanément. Les combinaisons des mesures (simple et doubles différences) s'effectuent entre les mesures d'une même époque. Plusieurs programmes exploitent la simultanéité des mesures et en particulier le programme de formation des doubles différences qui utilise des tableaux indicés en fonction des époques GPS (soit 2880 époques de 30 secondes dans la journée par exemple).

1.1.5 Passages

Un passage GPS est défini par l'ensemble des mesures de phase qui ont la même ambiguïté. Lorsqu'on travaille en bi-fréquence le passage est défini comme une période sans saut de cycle sur les deux fréquences. Lorsqu'on travaille avec des mesures doubles différences, un passage est défini comme la période sans saut de cycle pour l'ensemble des mesures participant à la double différence. Ainsi sur un même passage GPS, on considère que l'ambiguïté est constante. Attention, cette définition de passage diffère de la définition de passage pour les mesures Laser ou Doris (liée au passage du satellite au dessus de la station).

1.1.6 Fréquences GPS

Les signaux GPS sont émis sur plusieurs fréquences (f_i , $i = 1, 2, \dots$). Les récepteurs de qualité géodésique font des mesures simultanées sur les différentes fréquences reçues. Ces mesures peuvent être combinées entre elles pour éliminer certains effets comme par exemple le retard ionosphérique (voir paragraphe 2.2, page 27). Nous disposons donc à chaque date, de plusieurs mesures de phase et de plusieurs mesures de code entre le satellite et la station. De nombreuses combinaisons différentes (Phase-Code, Combinaison entre fréquences différentes, etc...) peuvent être formées dont certaines sont utilisées dans

GINS entre autre pour la détermination des passages et la résolution des ambiguïtés entières. Les valeurs des signaux GPS ainsi que les combinaisons les plus utiles sont rappelées dans le tableau 1.1. Les combinaisons seront abordées de manière détaillée dans la suite.

fréquence	longueur d'onde $\lambda = c/f$ ***	Bruit rel. L_1	commentaire
$f_0 = 10.23 \cdot 10^{+06} Hz$	$\lambda_0 = 29.31 m$	—	fréquence fondamentale
$f_1 = 154 \times f_0$ *	$\lambda_1 = 19.03 cm$ **	1	fréquence 1
$f_2 = 120 \times f_0$ *	$\lambda_1 = 24.42 cm$ **	1	fréquence 2
		3	“iono - free” (cf p.30)
$f_5 = f_1 - f_2$	$\lambda_5 = 86.19 cm$ **	5	“wide - lane” (cf p.62)
$f_3 = f_1 + f_2$	$\lambda_3 = 10.69 cm$ **	—	“narrow - lane” (cf p.63)
* En pratique, pour former les combinaisons entre différentes fréquences, il est très souvent préférable numériquement d'utiliser directement ces expressions, qui sont exactes, sans passer par la valeur en Hz. Ces valeurs sont définies dans le module GINS <i>common_constantes_gps.f90</i> .			
** Valeurs arrondies. *** $c = 2.99792458 E^{+08} ms^{-1}$			

TAB. 1.1: Fréquences et longueurs d'ondes des mesures GPS, de quelques combinaisons linéaires utiles.

1.1.7 Bruit des mesures GPS

La mesure de phase est une mesure beaucoup plus précise que la mesure de code. Les bruits de mesures dépendent évidemment des récepteurs (et en toute rigueur de la fréquence considérée). On peut raisonner en utilisant des valeurs typiques pour les récepteurs géodésiques de l'ordre de 20 – 30 cm pour le bruit de code et de l'ordre du millimètre pour le bruit de phase.

Une manière d'estimer le bruit de mesure de code à partir des données brutes est de former la combinaison Melbourne-Wubbena (voir combinaison Melbourne Wubbena page 62). Une autre manière est de regarder les résidus de traitement obtenus en sortie de GINS (Si les résidus sont dominés par le bruit de mesure).

1.1.8 Décalage d'horloge et temps de trajet

La différence ($tr_r - te_e$) qui apparait dans les équations 1.1 et 1.3 est une différence entre deux échelles de temps différentes : le temps récepteur et le temps émetteur.

On introduit le temps de trajet τ du signal GPS entre l'émission et la réception en tenant compte des décalages des horloges du récepteur, Δtr , et de l'émetteur Δte par rapport à un temps de référence commun (par exemple le temps GPS ou TAI), selon :

$$\begin{aligned}
tr_r &= tr_{gps} + \Delta tr \\
te_e &= te_{gps} + \Delta te
\end{aligned}$$

soit

$$\begin{aligned}
(tr_r - te_e) &= (tr_{gps} - te_{gps}) + \Delta tr - \Delta te \\
(tr_r - te_e) &= \tau + \Delta tr - \Delta te
\end{aligned}
\tag{1.4}$$

On obtient alors, à partir des équations 1.1 et 1.3, et pour chaque fréquence i considérée :

$$\begin{aligned}
P_i &= c\tau_i + c\Delta tr - c\Delta te + \sigma_P \\
L_i &= c\tau_i + c\Delta tr - c\Delta te + \lambda_i N_i + \sigma_L
\end{aligned}
\tag{1.5}$$

Les décalages d'horloges sont des inconnues que l'on résout (dans le cas du traitement des mesures non différenciées) ou que l'on élimine (dans le cas du traitement doubles différences).

1.2 Equations d'observations finales

Le temps de trajet τ du signal GPS est modélisé dans GINS comme pour n'importe quelle mesure de distance ou de différence de distance (Laser, Doris, etc...). Il inclut le temps de trajet géométrique entre les centres de phase des antennes émettrices et réceptrices, auquel il faut rajouter les corrections relativistes, et les retards ionosphériques, et troposphériques liés à la traversée de l'atmosphère (pour les récepteurs situés au sol).

On écrira donc classiquement :

$$\tau = \tau_{geom} + \tau_{iono}(f) + \tau_{tropo} + \tau_{relat}
\tag{1.6}$$

Le temps de trajet est identique pour la phase et le code SAUF pour la propagation à travers le milieu ionisé constitué par la ionosphère. En effet, on doit différencier dans ce cas entre la vitesse de phase du signal électromagnétique qui affecte la mesure de phase et la vitesse de groupe du signal de code qui affecte la mesure de code. Dans le premier cas, on aura une avance sur la propagation de la phase et un retard sur la propagation du code. Les deux effets dépendent de la fréquence f considérée et sont opposés au premier ordre pour le code et la phase.

On obtient ainsi les équations de mesure de code et de phase complètes utilisées dans GINS (Le calcul des différentes composantes est traité dans les paragraphes suivants) :

$$\boxed{
\begin{aligned}
P(f_i) &= c(\tau_{geom} + \tau_{iono}(f_i) + \tau_{tropo} + \tau_{relat}) + c\Delta tr - c\Delta te + \sigma_P \\
L(f_i) &= c(\tau_{geom} - \tau_{iono}(f_i) + \tau_{tropo} + \tau_{relat}) + c\Delta tr - c\Delta te + \lambda_i N_i + \sigma_L
\end{aligned}
}
\tag{1.7}$$

Chapitre 2

Fonction de mesure GPS non différentiée

2.1 Datation des mesures

Dans le chapitre 1, les dates des mesures ont été volontairement supprimées des équations. On devrait bien sûr écrire $P(t)$ et $L(t)$ en spécifiant la signification du terme t dans les équations 1.1 à 1.7.

Connaître avec le plus d'exactitude la date à laquelle est effectuée la mesure par rapport à un temps de référence, c'est à dire connaître la **datation** de la mesure, est une nécessité pour les calculs de géodésie précise. Le temps de référence pourrait être soit le temps GPS ou le TAI (voir le paragraphe 2.1.1) mais c'est le TAI qui est utilisé traditionnellement dans GINS. Nous distinguerons les calculs qui nécessitent une connaissance absolue de la datation des calculs ou hypothèses qui nécessitent une connaissance relative sur les horloges.

Dans GINS, les paramètres d'horloge relatifs estimés pour les traitements non différentiés et les décalages d'horloges absolus utilisés pour la datation sont deux choses distinctes. La datation absolue intervient dans le calcul des quantités théoriques (voir annexe 9.1). Une connaissance relative des horloges des émetteurs et récepteurs permet de faire des hypothèses simplificatrices lors de la différentiation des mesures ou lors de l'utilisation d'horloges calculées par ailleurs (voir paragraphe 2.1.3). Les méthodes utilisées dans GINS pour calculer la datation des mesures sont présentées dans le paragraphe 2.1.2.

2.1.1 Temps GPS et TAI (Temps Atomique International)

On rappelle que les satellites GPS communiquent via le message de navigation le décalage prédit de leur horloge bord par rapport au temps GPS. Les récepteurs ont donc accès à une réalisation du temps GPS via le message de navigation. Ceci permet aux récepteurs de connaître en temps réel leur décalage d'horloge par rapport au temps GPS et de recalibrer si besoin leur horloge. L'ensemble des récepteurs calés sur le temps GPS font des mesures simultanées entre eux.

Les horloges des satellites GPS sont référencées par rapport à l'horloge maitresse de l'USNO (US Naval Observatory) qui fait partie des horloges de référence constituant l'échelle de temps TAI. Les différences typiques entre l'échelle de temps GPS et l'échelle

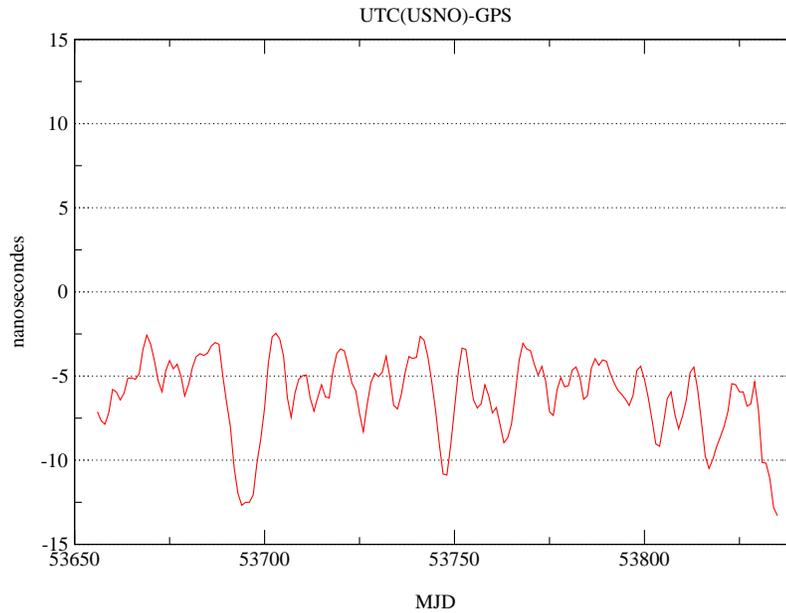


FIG. 2.1: Ecarts entre les réalisations des échelles UTC(USNO) et GPS en 2005-2006; dates en jours MJD (Modified Julian Date)

de temps UTC de l'USNO et la différence entre l'UTC(USNO) et l'UTC du temps atomique international (BIPM) sont illustrées sur les figures 2.1 et 2.2 (source : <http://tycho.usno.navy.mil/bipm.html>). Les écarts sont inférieurs à quelques dizaines de nanosecondes, ce qui est suffisamment faible pour considérer que les échelles de temps GPS et TAI sont équivalentes pour la datation.

Il existe un écart conventionnel constant de 19 secondes entre les échelles GPS et TAI tel que :

$$t_{GPS} = t_{TAI} - 19 \text{ (secondes)} \quad (2.1)$$

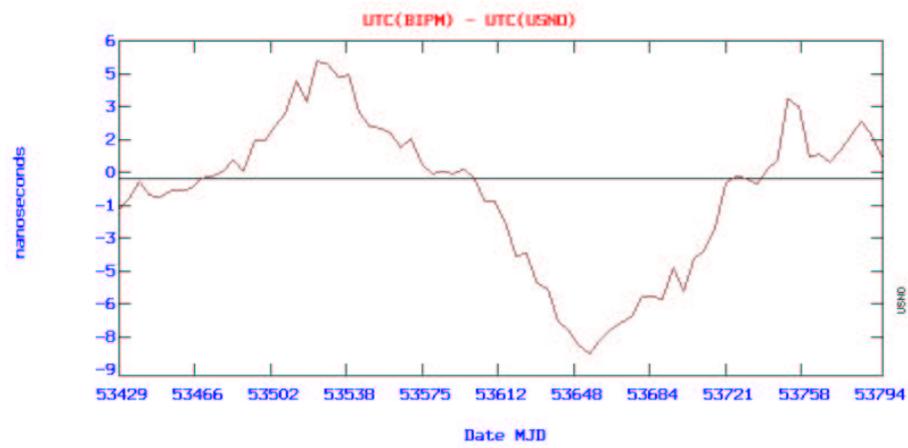


FIG. 2.2: Ecart entre les réalisations des échelles UTC(BIPM) et UTC(USNO) en 2005 ; dates en jours MJD (Modified Julian Date)

2.1.2 Calcul pratique de la datation

Deux méthodes similaires sont possibles pour déterminer la datation à partir des mesures de code. Ces deux méthodes sont utilisées dans GINS selon que l'on dispose de données prétraitées fournissant le décalage d'horloge récepteur ou non. Elles nécessitent toutes les deux la connaissance d'au moins un temps absolu (en TAI ou en TGPS) avec la précision suffisante, à savoir mieux que $0.1\mu s$ (voir en l'annexe 9.1, "Connaître la datation, oui... mais avec quelle exactitude?").

On connaît bien sûr dans tous les cas la date de mesure en temps récepteur tr_r (ou époque de mesure). Pour les deux méthodes on se sert des équations 1.1 et 1.4 rappellées ici :

$$\begin{aligned}
 tr_r &= tr_{gps} + \Delta tr \\
 te_e &= te_{gps} + \Delta te \\
 P &= c(tr_r - te_e) + \sigma_P \\
 P &= c(tr_{gps} - te_{gps}) + c\Delta tr - c\Delta te + \sigma_P
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

Datation à partir de l'horloge récepteur

Si on a réalisé, lors d'un prétraitement, le calcul du point GPS à partir des éphémérides radiodiffusées, on connaît avec une précision de $\approx 10 m$ les coordonnées et le décalage d'horloge $c\Delta tr$ par rapport au TGPS. On obtient alors la date de réception en temps GPS selon $tr_{gps} = tr_r - \Delta tr$. La date d'émission en temps GPS te_{gps} est calculée par itérations successives en utilisant le temps de propagation géométrique entre l'émetteur de coordonnées \vec{X}_e et le récepteur de coordonnées \vec{X}_r :

$$\begin{aligned}
 te_{gps)0} &= tr_{gps} \\
 \tau_0 &= \tau(\vec{X}_e(te_{gps)0}, \vec{X}_r(tr_{gps})) \\
 te_{gps)1} &= tr_{gps} - \tau_0 \\
 \tau_1 &= \tau(\vec{X}_e(tr_{gps)1}, \vec{X}_r(tr_{gps})) \\
 te_{gps)2} &= tr_{gps} - \tau_1 \\
 &\dots
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

On arrête les itérations lorsque l'écart entre deux dates successives est inférieur à un seuil (typiquement quelques nanosecondes). Cette méthode peut être aussi utilisée si on sait a priori que l'horloge du récepteur n'a pas de décalage significatif par rapport au TGPS, soit $tr_{gps} = tr_r$.

Datation à partir de l'horloge émetteur

C'est cette méthode qui est aujourd'hui systématiquement utilisée dans GINS. On suppose ici que l'on connaît le décalage de l'horloge émetteur Δte fourni par les éphémérides radio-diffusées (fichiers BRDC). On obtient tout d'abord à partir de l'équation de mesure du code :

$$te_e = tr_r - P/c$$

puis

$$te_{gps} = te_e - \Delta te$$

Le temps de réception de la mesure en temps GPS, tr_{gps} est enfin calculé par itérations successives jusqu'à convergence selon :

$$\begin{aligned} tr_{gps)0} &= te_{gps} \\ \tau_0 &= \tau(\vec{X}_e(te_{gps}), \vec{X}_r(tr_{gps)0)) \\ tr_{gps)1} &= te_{gps} + \tau_0 \\ \tau_1 &= \tau(\vec{X}_e(te_{gps}), \vec{X}_r(tr_{gps)1)) \\ tr_{gps)2} &= te_{gps} + \tau_1 \\ &\dots \end{aligned} \quad (2.4)$$

En général, dans GINS on utilise cette deuxième méthode et on se sert de la connaissance des décalages horloges issus des BRDC (Broadcast Ephemeris) ou d'autres sources (il suffit que les horloges soient absolues). Celles-ci sont attachées au niveau du programme de prétraitement *PDGR90* (voir paragraphe 6.4) et fournies aux routines de calcul de la quantité théorique.

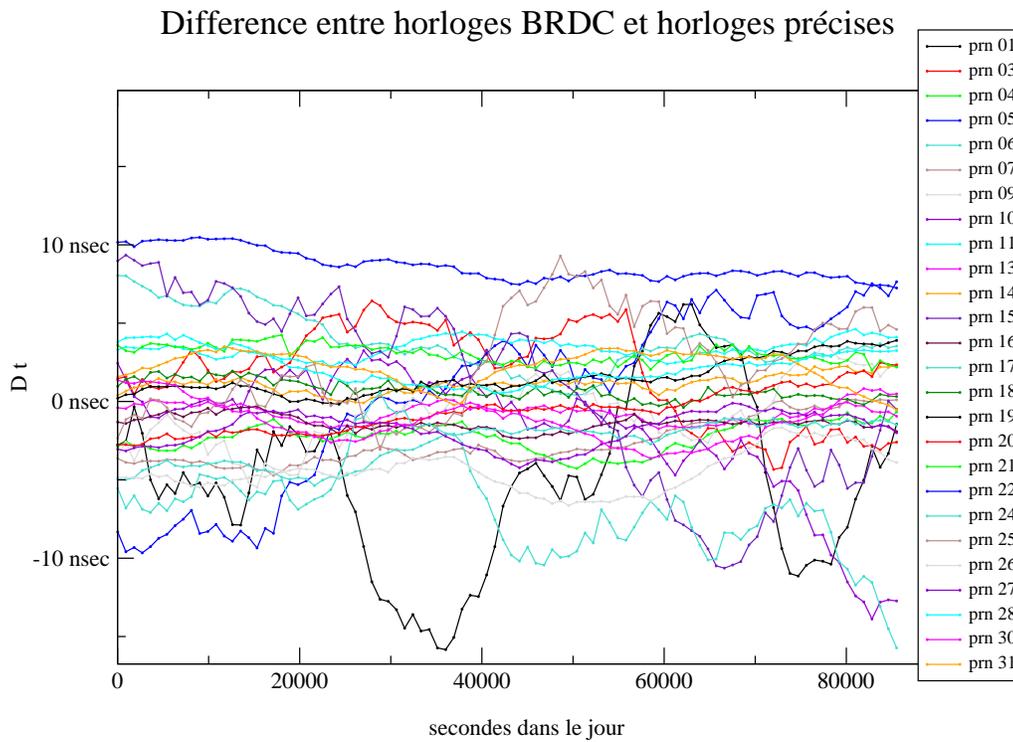


FIG. 2.3: Différences entre horloges BRDC et horloges précises pour l'ensemble des satellites au cours d'une journée

Les horloges BRDC (voir figure 2.3) sont de qualité suffisantes pour dater les mesures et calculer correctement la quantité théorique, mais on ne peut pas les utiliser pour corriger directement les corrections d'horloges affectant la mesure. En pratique, on détermine les biais d'horloge relatifs ou on les élimine (par différentiation des mesures).

2.1.3 Une condition pour la simultanéité des mesures

Les mesures effectuées par deux récepteurs différents doivent être simultanées pour respecter l'hypothèse selon laquelle les décalages d'horloge des satellites hauts vus par les récepteurs sont égaux ; sinon on devrait prendre en compte la dérive de l'horloge dans le calcul de la quantité théorique.

On observe des dérives $\frac{\delta\Delta te}{\delta t}$ maximales pour les horloges des satellites hauts de l'ordre de 1 nanoseconde/s (dérives constatées sous SA avant mai 2000). Les dérives actuelles sont de l'ordre du dixième de nanosecondes/seconde. Une condition de simultanéité s'obtient en comparant la différence d'horloge due à la dérive entre les dates de mesures t_1 et t_2 des deux récepteurs au bruit de la mesure de phase :

$$(t_1 - t_2) * c \frac{\delta\Delta te}{\delta t} < 1 \text{ mm} \quad (2.5)$$

soit,

$$\boxed{t_1 - t_2 < 3.3 \text{ millisecondes}} \quad (2.6)$$

2.2 Propagation ionosphérique et observables iono-free

2.2.1 Retard ionosphérique

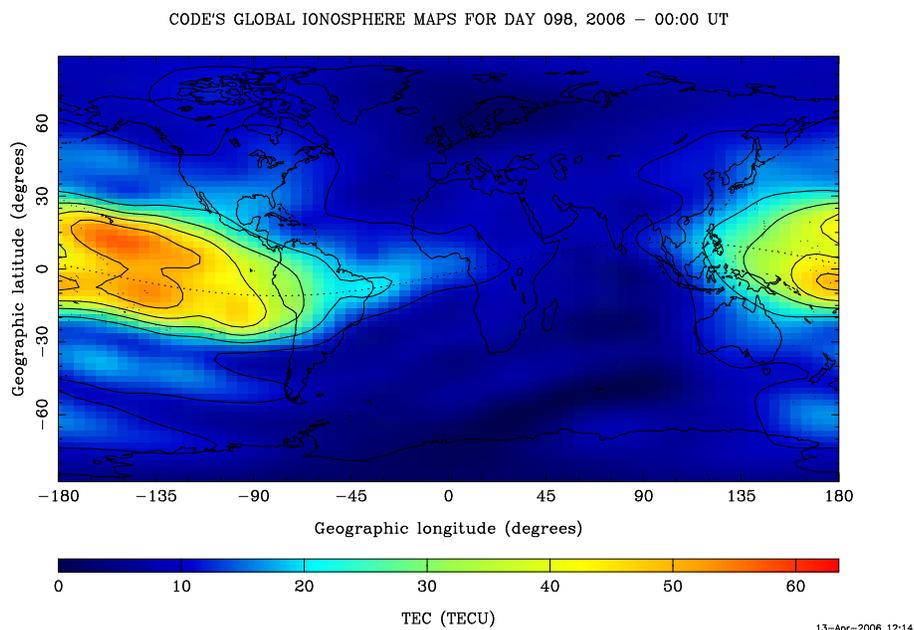


FIG. 2.4: Exemple de carte globale de Ionosphère calculée à partir des observations GPS par l’Astronomisches Institut Universität Bern (AIUB), source <http://www.cx.unibe.ch/aiub/ionosphere.html>

La ionosphère est un milieu dispersif ionisé par les radiations solaires. Le contenu électronique dépend du flux solaire reçu et varie majoritairement en fonction de l’heure du jour mais aussi du lieu considéré, de la période de l’année et des cycles solaires. Un exemple de carte globale du TEC est donné sur la figure 2.4.

Les signaux GPS, comme l’ensemble des signaux électromagnétiques, sont affectés par la traversée de ce milieu sous la forme d’une avance de phase de la porteuse et d’un retard pour le code dépendant de la fréquence considérée. Cet effet, qui peut atteindre plusieurs dizaines de mètres en terme de distance (jusqu’à la centaine de mètres pour les basses élévations), doit être corrigé pour exploiter correctement les mesures GPS pour la géodésie. La figure 2.5 présente des exemples de biais ionosphériques sur le code et la phase.

Disposer de mesures multi-fréquences permet de corriger les erreurs de propagation ionosphérique au premier ordre (bi-fréquence) ou au second ordre (tri-fréquence). Les effets du second ordre, non corrigés en bi fréquence sont de l’ordre de quelques centimètres. Cette erreur limite la détermination correcte des ambiguïtés entières sur les longues lignes de bases.

Au premier ordre en fréquence, on a les relations suivantes entre les délais ionosphériques de code et de phase entre deux fréquences i et j :

$$\begin{aligned} f_j^2 \tau_{code}^j &= f_i^2 \tau_{code}^i = \text{constante} \\ \tau_{phase}^i &= -\tau_{code}^i \end{aligned} \quad (2.7)$$

La combinaison iono-free présentée dans le paragraphe 2.2.2 est une combinaison entre deux fréquences pour les mesures de code et de phase qui permet de former un observable ne contenant plus les effets ionosphériques du premier ordre.

C'est cette combinaison qui est utilisée dans GINS pour le traitement des mesures non différenciées ou doubles différences. Elle est formée à la lecture des données dans PRE-PARS (*ndiflec.f90* pour les mesures non différenciées, *ddiflec.f90* pour les mesures doubles différences).

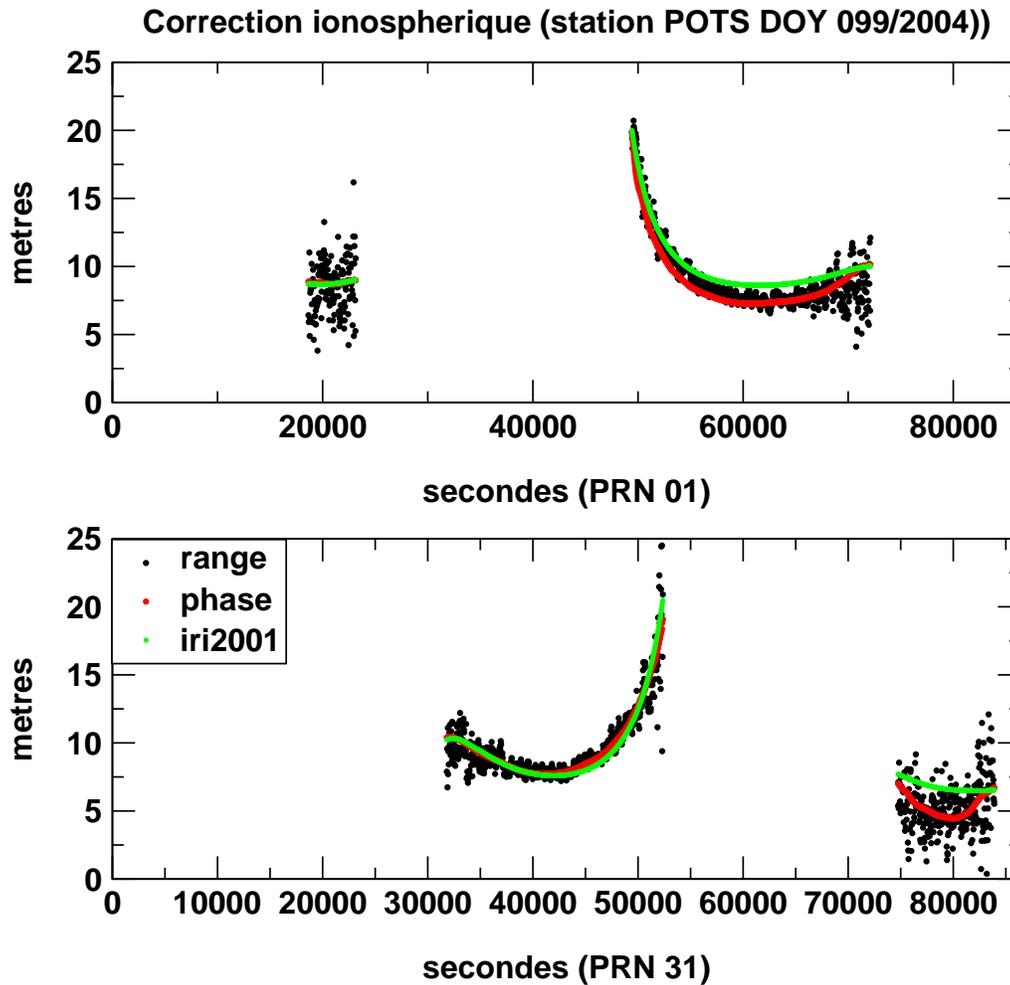


FIG. 2.5: Exemple de correction ionosphérique en mètres pour quatre passages à la station POTS. La correction de phase a été inversée pour la comparaison avec le code. Les valeurs issues du modèle IRI2001 (International Reference Ionosphere 2001) sont présentées à titre de comparaison (ref=<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/space/model/ionos/iri.html>). On distingue nettement le bruit élevé des mesures de code par rapport à la phase surtout en début et fin de passage.

2.2.2 Combinaison de mesure iono-free

Elle s'obtient de la même manière pour le code et la phase à partir des observables élémentaires sur chacune des fréquences 1 et 2 :

$$P_3 = \frac{1}{(f_1^2 - f_2^2)}(f_1^2 P_1 - f_2^2 P_2) \quad (2.8)$$

$$L_3 = \frac{1}{(f_1^2 - f_2^2)}(f_1^2 L_1 - f_2^2 L_2) \quad (2.9)$$

A partir des 4 observables élémentaires (code et phase pour les fréquences 1 et 2), on obtient alors deux nouveaux observables pour le code et la phase où on peut négliger les effets ionosphériques (cf. équations 1.7 et 2.7) :

$$\begin{cases} P_3 = c(\tau_{geom} + \tau_{relat} + \tau_{tropo}) + c\Delta tr - c\Delta te + \sigma_{P_3} \\ L_3 = c(\tau_{geom} + \tau_{relat} + \tau_{tropo}) + c\Delta tr - c\Delta te + R_3 + \sigma_{L_3} \end{cases} \quad (2.10)$$

Où R_3 est une combinaison **réelle** des ambiguïtés entières :

$$R_3 = \frac{1}{(f_1^2 - f_2^2)}(f_1^2 \lambda_1 N_1 - f_2^2 \lambda_2 N_2) \quad (2.11)$$

2.3 Quantité théorique géométrique + relativité

2.3.1 Distance géométrique

Les temps de trajet géométrique et relativiste $\tau_{geom} + \tau_{relat}$ sont calculés par la fonction de mesure générique de distance commune à la plupart des mesures de GINS. Cette fonction renvoie la distance $c(\tau_{geom} + \tau_{relat})$ entre deux objets ainsi que les dérivées partielles de la cette distance par rapport aux paramètres dynamiques et géométriques des objets considérés. Cette fonction renvoie la distance entre deux objets (voir tableau 2.1, page 32) selon la relation :

$$\begin{aligned} d_{geom} &= \|(P_{Os_2} + \Delta P_{Os_2}) - (P_{Os_1} + \Delta P_{Os_1})\| \\ d_{total} &= d_{geom} + d_{relat} - d_{cal} \end{aligned} \quad (2.12)$$

avec,

- P_{Os_1} resp. P_{Os_2} : position de l'objet 1 resp. 2
dans le repère de calcul ou d'intégration (soit J2000).
- ΔP_{Os_1} resp. ΔP_{Os_2} : corrections vectorielles à la position
(correction de centre de phase).
- d_{relat} : correction relativiste (calculé par l'équation 2.13)
- d_{cal} : correction scalaire (utilisée pour
la correction de centre de phase des satellites Laser
sphériques ou les corrections d'antennes GPS).

Pour la fonction de mesure GPS non différenciée l'objet 2 est toujours un satellite GPS émetteur, et l'objet 1 est, suivant les cas, un satellite bas avec un récepteur GPS embarqué ou une station au sol (mobile ou fixe).

Pour les satellites GPS hauts et les satellites bas, la position du centre de masse est interpolée à partir des éphémérides (à la date d'émission ou de réception du signal, voir 2.1.2, page 24). Les éphémérides sont, soit lues dans un fichier externe (éphémérides figées), soit issues de l'intégration numérique faite dans GINS.

Pour les satellites GPS hauts, la correction de centre de phase ΔP_{Os_2} est calculée à partir du fichier de correction au format ANTEX fourni en entrée en tenant compte de l'attitude nominale du satellite (voir paragraphe 2.4). Pour les satellites bas embarquant un récepteur, le centre de phase ΔP_{Os_2} est calculé à partir des centres de phase des satellites et de leur attitude (qui dépend du satellite considéré).

2.3.2 Correction relativiste de courbure

La correction relativiste liée à la courbure du trajet sous l'action gravitationnelle de la Terre est calculée selon :

$$d_{relat} = 2 \frac{GM^{0.5}}{c^2} \log \left(\frac{\|P_{Os_1}\| + \|P_{Os_2}\| + d_{geom}}{\|P_{Os_1}\| + \|P_{Os_2}\| - d_{geom}} \right) \quad (2.13)$$

2.3.3 Déplacement des stations terrestres

Le vecteur position du centre de phase de la mesure d'une station sol est calculé en repère terrestre en sommant l'ensemble des corrections pour la date t de réception du signal :

$$\begin{aligned} \vec{p}_{1terre}(t) = & \vec{p}_{ITRF}(t_0) & + \vec{v}_{ITRF}(t - t_0) & \text{position du marqueur à la date } t \\ & + \Delta \vec{p}_{ecc} & & \text{vecteur excentricité} \\ & + \Delta \vec{p}_{cdp} & & \text{vecteur point référence antenne-centre} \\ & & & \text{de phase} \\ & + \Delta \vec{p}_{marter}(t) & & \text{vecteur déplacement des} \\ & & & \text{marées solides} \\ & + \Delta \vec{p}_{oceanload}(t) & & \text{vecteur déplacement du à la charge} \\ & & & \text{des marées océaniques} \\ & + \Delta \vec{p}_{atmload}(t) & & \text{vecteur déplacement du à la charge} \\ & & & \text{atmosphérique} \\ & + \vec{m}_{geocentre}(t) & & \text{vecteur déplacement du géocentre} \\ & & & \text{(si modélisé)} \end{aligned}$$

La position et la vitesse initiales du marqueur sont renseignées dans le fichier station. Les coordonnées à la date de réception de la mesure sont ensuite converties dans le repère de calcul en appliquant la matrice de rotation terrestre de la date $M(t)$ selon :

$$P_{Os_1}(t) = M(t) \vec{p}_{1terre}(t) \quad (2.14)$$

Type d'objet	position p_{objet}	dérivées partielles calculées
satellite haut	centre de masse	- inconnues dynamiques - dérivées liées au centre de phase
satellite bas	centre de masse	- inconnues dynamiques - dérivées liées au centre de phase
station	point de référence de la station	- coordonnées du marqueur - paramètres de rotation terrestre

TAB. 2.1: Sorties de la fonction distance géométrique commune à tous les observables de GINS.

2.4 Attitude des satellites GPS

L'attitude des satellites GPS est une attitude dite "nominale" car nous ne disposons pas pour ces satellites de mesures d'attitude faites à bord qui nous donneraient l'attitude vraie. Il n'y a pas de modélisation particulière de l'attitude lors des phases d'éclipse partielle ou totale.

Le vecteur *centre de masse-centre de phase*, constant dans le repère satellite, est exprimé dans le repère d'intégration ou de calcul (J2000) avant d'être ajouté à la coordonnée du centre de masse du satellite (équation 2.12).

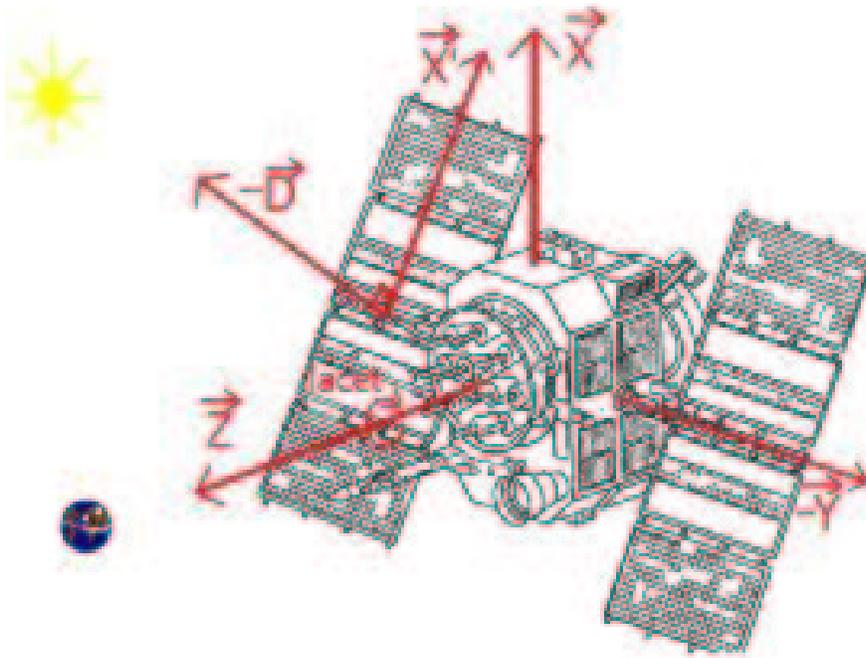


FIG. 2.6: Trièdre $(\vec{X}, \vec{Y}, \vec{Z})$ définissant le repère des satellites GPS. On a aussi représenté les axes du repère $(\vec{X}', \vec{Y}', \vec{D})$ utilisé pour la modélisation dynamique.

Le repère satellite (voir figure 2.6 est défini selon) :

- \vec{Z} : Vecteur unitaire du centre de masse vers la face portant l'antenne émettrice
 \vec{Y} : Vecteur unitaire aligné le long des axes des panneaux solaires
 \vec{X} : Vecteur unitaire complétant le trièdre tel que \vec{X} soit dans le demi-plan contenant le soleil

La matrice d'attitude nominale est obtenue en exprimant les axes du repère satellite (\vec{X}, \vec{Y} et \vec{Z}) dans le repère de calcul (J2000) à partir de la position de la Terre et du soleil selon :

$$\vec{Z} = -\frac{P\vec{OS}_2}{\|P\vec{OS}_2\|}$$

$$\vec{Y} = +\frac{\vec{Z} \wedge \vec{S}_{atsol}}{\|\vec{Z} \wedge \vec{S}_{atsol}\|}$$

et enfin

$$\vec{X} = +\vec{Y} \wedge \vec{Z}$$

L'ordre de calcul des produits vectoriels assure que le vecteur \vec{X} est toujours contenu dans le demi plan contenant le soleil.

2.5 Allongement troposphérique

La densité de la troposphère augmente le temps de propagation des ondes. On parle aussi d'allongement ou de retard troposphérique. Ce retard τ_{tropo} qui intervient dans l'équation 2.10 est indépendant de la fréquence considérée (contrairement au retard ionosphérique). Il dépend essentiellement des conditions de température, pression et humidité des couches les plus basses de l'atmosphère. On le modélise en utilisant des modèles simples (ne dépendant que de l'altitude) ou des modèles plus compliqués tenant compte de l'état observé de l'atmosphère traversée (par exemple en utilisant des cartes de correction basées sur des observations météo). Comme le retard augmente avec la quantité d'atmosphère traversée, celui ci sera plus important pour les observations à basse élévation. On utilise pour relier le retard à la verticale au retard à une élévation donnée une fonction de rabattement ou "mapping function". La correction troposphérique s'écrira ainsi de manière simple selon :

$$c\tau_{tropo} = B_{zen}(P, T, Hum) * f(\cos d_{zen}) \quad (2.15)$$

avec :

- B_{zen} : Biais zénithal (en mètres)
 P, T, Hum : Pression, Température, Humidité au niveau de la station de mesure
 d_{zen} : distance zénitale

Lorsque les conditions atmosphériques sont méconnues ou lorsque l'on préfère se fier aux mesures, on ajuste en général les biais de troposphère à la verticale. La dérivée partielle de la mesure par rapport au paramètre de biais zénithal est alors simplement égale à la fonction de rabattement f . On utilise typiquement un biais troposphérique pour 1 à 3 heures pour les traitements des données GPS. Les différents modèles de correction troposphérique disponibles dans GINS sont décrits succinctement dans le tableau 2.2.

Nom du modèle	nom abrégé	Arguments utilisés dans le calcul.
ANNULE		renvoie 0 pour la correction tropo.
MARINI	MRINI	modèle de Marini-Murray avec biais zénithal dépendant de p, t, u et λ , et fonction d'élévation dépendante de p, t et u .
SAASTA	SAAST	modèle de Saastamoinen avec biais zénithal dépendant de p et λ , et fonction d'élévation de Mendes (voir MENDE1).
MENDE1	MEND1	modèle de Mendes-Pavlis avec biais zénithal dépendant de p, t, u et λ , et fonction d'élévation de Mendes dépendante de p, t et u .
MENDE2	MEND2	idem MENDE1 pour le biais zenithal, mais fonction d'élévation indépendante des paramètres météo (la latitude et l'altitude de la station sont utilisées pour calculer des valeurs par défaut).
CNET_1	CNET1	modèle CNET1 avec biais zénithal dépendant de p, t et u , et fonction d'élévation simple (voir SIMPLE).
CNET_2	CNET2	modèle CNET2 avec biais zénithal dépendant de p, t et u , et fonction d'élévation simple (voir SIMPLE).
CNET_3	CNET3	modèle CNET3 avec type de climat continental ; biais zénithal dépendant de p, t et u , et fonction d'élévation simple (voir SIMPLE).
HOPF_1	HOPF1	modèle de Hopfield général ; biais zénithal et fonction d'élévation dépendante de p, t et u .
HOPF_2	HOPF2	modèle de Hopfield adapté pour Doppler (coindices CCIR 1963).
SIMPLE	SIMPL	mapping simple en $1. / ((1. - 0.017) \cos(d_{zen}^2) + 0.017)$, correction zenitale doit être fournie en entrée donc ajustée.
DSN	DSN_0	modèle pour DSN (pas codé)
NIELLS	NIELL	modèle de Niells pour VLBI (pas codé)
MECMWF	ECMWF	modèle basé sur l'interpolation des cartes de correction issues de la météo.

* p, t, u = pression, température, humidité. λ = longueur d'onde optique (pour Laser) ;
Une longueur d'onde λ par défaut a été choisie pour GPS et DORIS.

TAB. 2.2: Description synthétique des modèles de troposphère disponibles dans GINS

2.6 Modélisation des centres de phase GPS et corrections d'antenne

Le point géométrique où est effectué la mesure au sein de l'antenne est appelé centre de phase. Ce point dépend du type d'antenne ainsi que de la fréquence considérée. En pratique, comme l'on traite des mesures "iono-free", on applique une correction de centre de phase apparente "iono-free". En utilisant la combinaison iono-free (équation 2.9) et l'équation de calcul de la quantité géométrique (équation 2.12), on obtient directement le vecteur centre de phase iono-free \vec{p}_{cdp} selon :

$$\vec{p}_{cdp} = \vec{p}_{1cdp} + (\vec{p}_{1cdp} - \vec{p}_{2cdp}) \frac{f_2^2}{(f_1^2 - f_2^2)} \quad (2.16)$$

où \vec{p}_{1cdp} et \vec{p}_{2cdp} sont les centres de phase pour les mesures de fréquences f_1 et f_2 .

La correction vectorielle de centre de phase pour les antennes réceptrices est ajoutée à la coordonnée de la station avant transformation en repère de calcul (J2000) et la correction de centre de phase des antennes émettrices est tournée en repère J2000 (via la matrice d'attitude du satellite GPS, paragraphe 2.4) et sommée au centre de masse du satellite.

En plus de la correction vectorielle de centre de phase, on applique aujourd'hui des corrections scalaires issues de cartes de correction des antennes dépendant elles aussi de la fréquence considérée. Ces corrections sont issues d'ajustements ou de mesures faites au sol à l'aide de robots. Depuis 2006, l'IGS a délivré des corrections de centre de phase dits "absolus" et des cartes d'antennes pour l'ensemble des types d'antenne recensés (on se réfèrera pour une discussion historique au mail de Gerd Gendt and Ralf Schmid reproduit en annexe 9.7).

La correction scalaire est une correction supplémentaire dépendant de l'azimuth et de l'élévation de la ligne de visée par rapport à l'antenne. On ajoute ainsi à la quantité géométrique la correction :

$$\Delta\rho = \Delta\rho_{sat}(elev_{sat}, azimuth_{sat}) + \Delta\rho_{sta}(elev_{sta}, azimuth_{sta}) \quad (2.17)$$

où $elev_{sat}$, $azim_{sat}$ et $elev_{sta}$ et $azim_{sta}$ sont les angles d'élévation et d'azimuth de la ligne de visée par rapport à l'antenne satellite ou réceptrice. Les corrections $\Delta\rho$ proviennent de l'interpolation de cartes de corrections pour le range ou la phase dont quelques exemples sont donnés sur les figures 2.7 et 2.8.

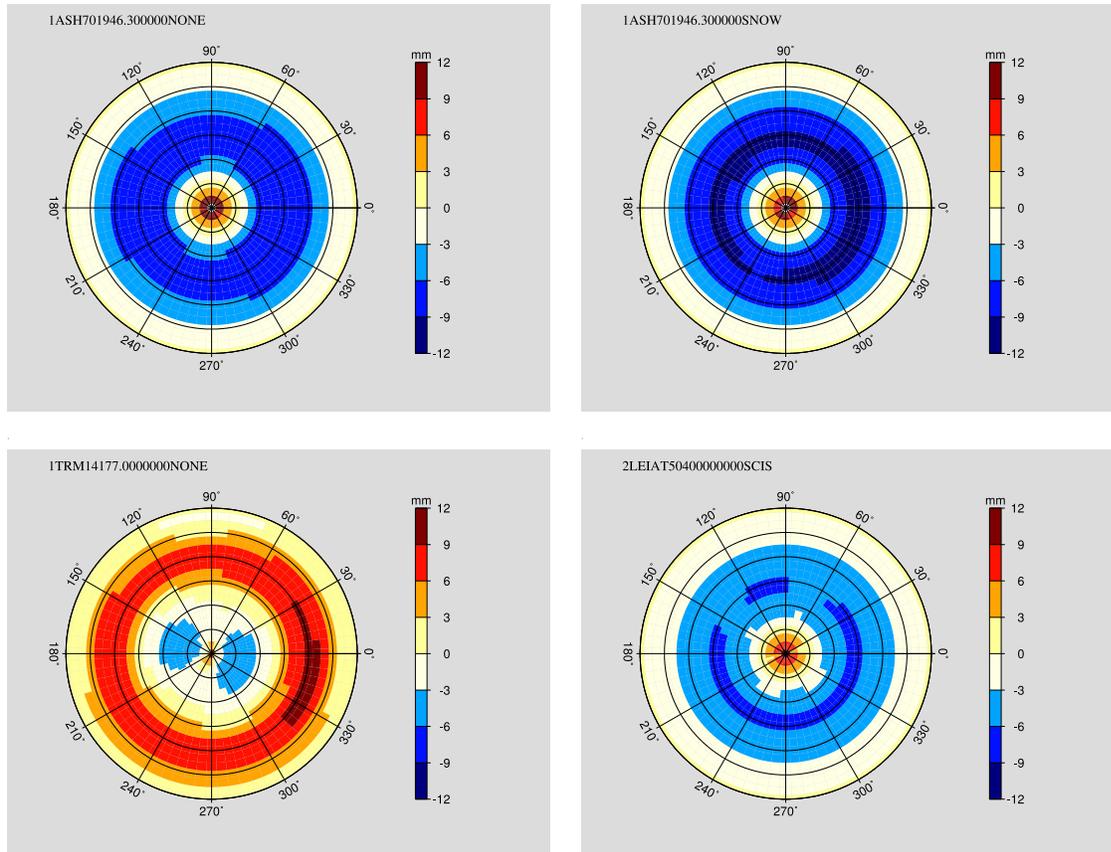


FIG. 2.7: Exemple de cartes de correction d'antenne pour les mesures de phase des antennes du type ASH701946 (en haut à gauche), avec "snow-cover" (en haut à droite) et les antennes TRM14177 (en bas à gauche) et LEIAT504 (en bas à droite). Données issues des cartes de ANTEX05 l'IGS.

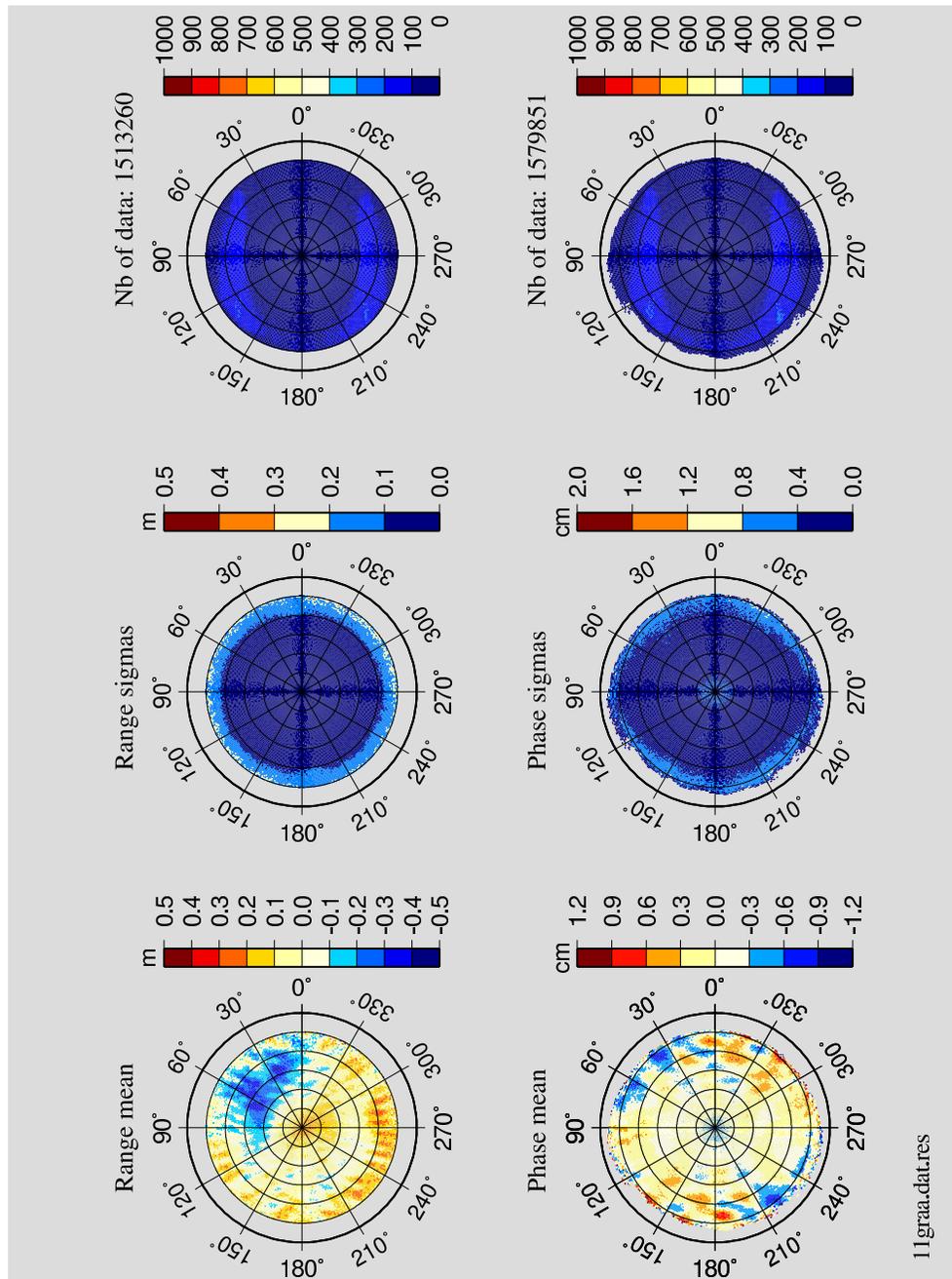


FIG. 2.8: Exemple de cartes de correction d'antenne pour l'antenne du satellite GRACE-A obtenues à partir de l'analyse de plus de 1.5 million résidus de mesures. En haut range iono-free et en bas phase iono-free. Les corrections atteignent ici plusieurs dm pour le range et la dizaine de mm pour la phase.

2.7 Correction de “phase wind-up” pour les mesures non différenciées

Le signal GPS est codé sur une porteuse qui est une onde électromagnétique circulaire polarisée. Cette onde peut être visualisée comme un champ électrique en rotation qui se propage entre l’antenne émettrice et l’antenne réceptrice. L’angle de phase mesuré au niveau de l’antenne de référence dépend de l’angle géométrique entre le champ électrique instantané et une direction de référence sur l’antenne. Ainsi, tout changement d’orientation de l’antenne réceptrice influe sur l’angle mesuré. Il en est de même pour l’antenne émettrice. Cet effet est petit (voir plus loin) mais il ne peut être ignoré pour les applications précises (Wu et al., 1993).

La correction de “phase wind-up” a été incluse dans la fonction de mesure GPS en février 2005. L’algorithme utilisé est celui décrit dans l’article de Jan Kouba ("A guide to using International GPS Service (IGS) Products", Jan KOUBA , February 2003).

2.7.1 Méthode

On calcule la correction pour chacun des couples station-satellite concernés. Les directions de référence des antennes émettrices et réceptrices sont données par les directions fixes du satellite (axes X et Y, voir page 32) et de la station sol (Nord et Est). La correction en elle-même est simple à calculer, mais le résultat obtenu est défini à un cycle près ! Le problème majeur est donc d’assurer la continuité à l’intérieur d’un même passage (sinon les discontinuités introduiraient des sauts de cycle non désirés). Ceci implique de conserver la valeur précédente pour la combinaison en cours (un test est fait si les écarts entre 2 calculs successifs sont plus grands que 0.5 cycle). Cette contrainte de continuité est assurée différemment pour le traitement des mesures non différenciées et doubles différences.

2.7.2 Algorithme de continuité

Dans ce cas des mesures non différenciées, les passages sont repérés par leur numéro qui est le numéro de l’inconnue d’ambiguïté. Dans le cas des mesures doubles différences , on utilise la continuité pour l’ensemble des mesures entre un satellite et un récepteur, quel que soit le passage concerné. La correction précédemment calculée PWU_{sauv} pour un passage ou une combinaison est sauvegardée. Elle est utilisée lorsque l’on rencontre une nouvelle mesure de ce passage selon :

$$\begin{aligned}
 &\text{Si } PWU_{courant} - PWU_{sauv} > 0.5 \text{ cycle alors } PWU_{courant} = PWU_{courant} - 1 \\
 &\text{Si } PWU_{courant} - PWU_{sauv} < 0.5 \text{ cycle alors } PWU_{courant} = PWU_{courant} + 1 \\
 &\text{Puis } PWU_{sauv} = PWU_{courant}
 \end{aligned}
 \tag{2.18}$$

La figure 2.9 donne quelques exemples de corrections phase wind-up pour des passages non différenciés. Les corrections peuvent atteindre 1/2 cycle (soit environ 5 cm) entre le début et la fin d’un passage. La correction est normalement comprise entre -0,5 et 0,5 cycle mais l’algorithme de continuité implique des excursions au delà.

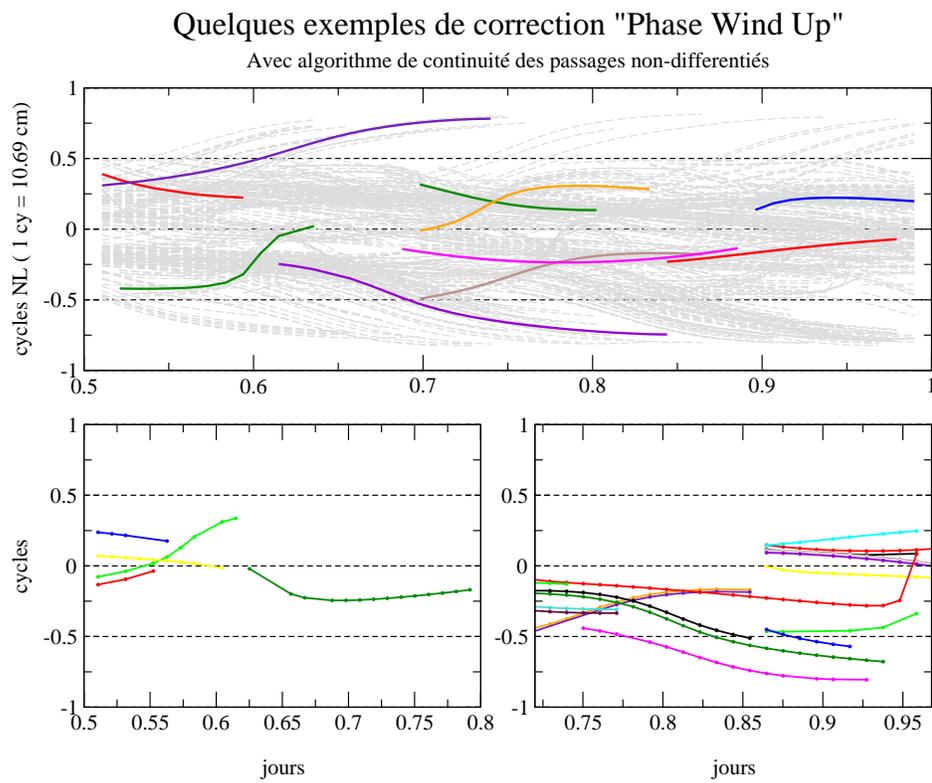


FIG. 2.9: Quelques exemples de correction phase wind-up pour des passages non différenciés. En grisé, ensemble des passages de l'arc.

Calcul de la correction de phase wind-up pour les doubles différences

Pour des raisons pratiques nous commentons ici le cas des doubles différences (cette mesure est décrite au chapitre 4).

Dans le cas des doubles différences, la méthode retenue pour la continuité impose la continuité entre 2 passages d'une même combinaison, même éloignés dans le temps, et introduit des décalages qui s'amplifient au cours de l'arc (voir figure 2.10).

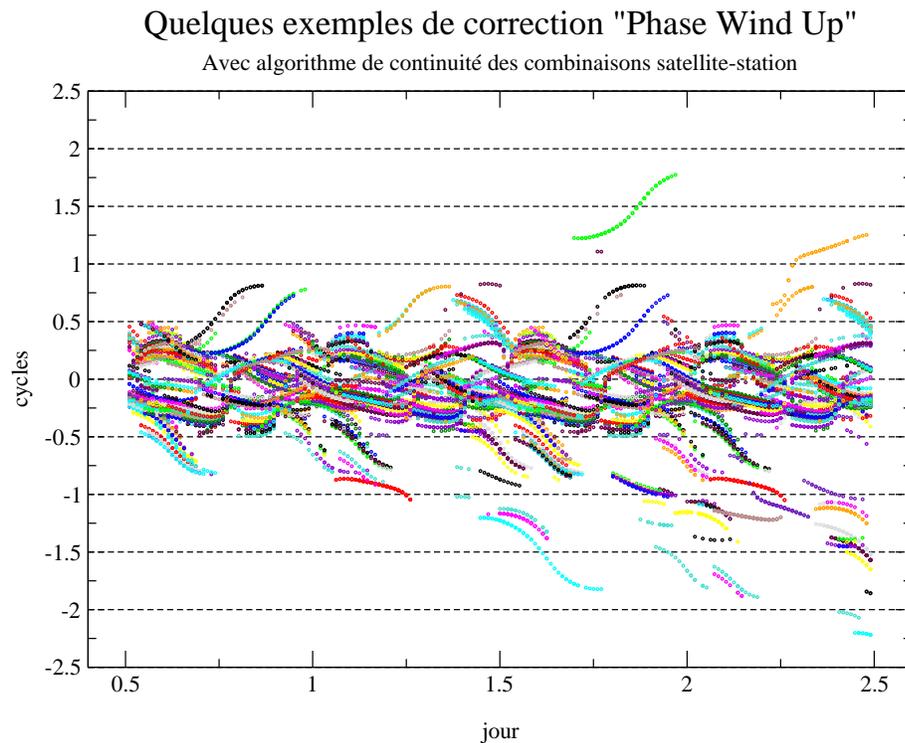


FIG. 2.10: Corrections phase wind-up élémentaires avec continuité pour une même combinaison DD.

Pour les doubles différences, la correction phase wind-up est la somme de 4 corrections non différenciées élémentaires. Les décalages ne perturbent en rien la restitution des différents paramètres puisqu'ils sont compensés par l'ajustement des ambiguïtés; mais au final ils étalent la distribution des ambiguïtés par rapport aux valeurs a priori calculées au prétraitement et augmentent l'espace de recherche des ambiguïtés entières. C'est pourquoi, après avoir formé les doubles différences des corrections phase wind-up, on corrige aussi de la valeur entière du premier point de la combinaison, comme cela est illustré sur la figure 2.11 (en bas).

Les corrections introduites pour les doubles différences ne dépassent pas 2 cm sur un passage. L'impact sur les résidus est beaucoup plus faible car une partie de la correction est absorbée par les autres paramètres ajustés (tropo/ambiguïtés/orbite)

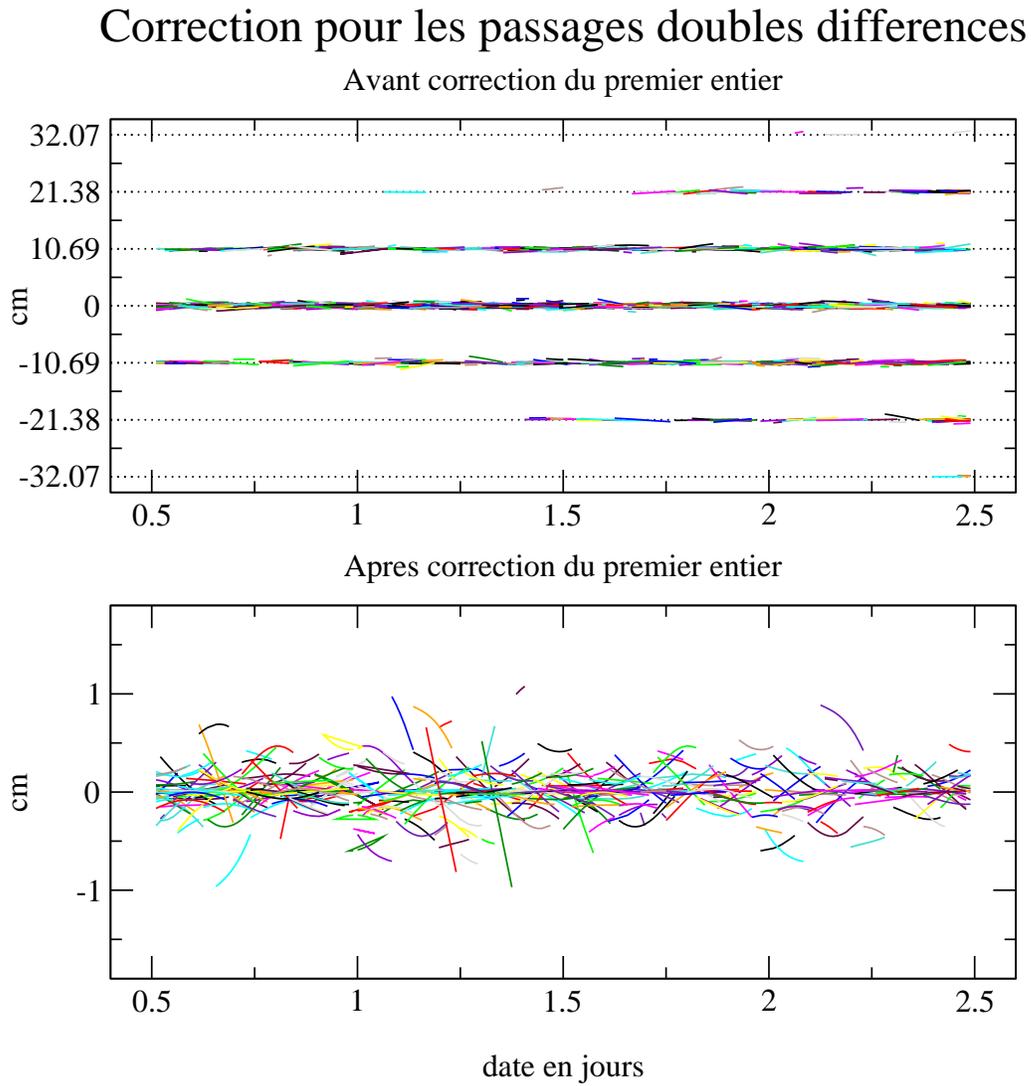


FIG. 2.11: Corrections phase wind-up pour les passages doubles différences.

2.7.3 Impact de la correction en terme d'orbitographie

Comme montré dans le tableau 2.3, l'impact en terme de résidus est mineur ou insignifiant, ce qui est peu surprenant étant donné l'amplitude des corrections (centimétriques et sub-centimétriques).

L'impact en terme d'orbitographie est mineur. On obtient des différences de l'ordre de 2 à 3 cm d'écart 3D entre les orbites calculées avec ou sans la correction phase wind-up.

Type de l'arc	sans		avec	
	résidus phase	résidus range	résidus phase	résidus range
DDIF PHASE	0.829	-	0.828	-
DDIF PHASE+RANGE	0.829	60.6	0.828	60.9
NDIF PHASE+RANGE	0.348	34.9	0.347	34.9

TAB. 2.3: Statistiques sur les résidus de mesure en cm avec ou sans correction phase wind-up (les tests ont été réalisés sans élimination de mesures).

2.8 Equations aux dérivées partielles et notations

2.8.1 Equations d'observation

La fonction de mesure non différentiée (*teondif_new*) est appelée pour chaque mesure individuelle.

Elle renvoie comme les autres fonctions de mesure dans GINS la quantité théorique de la mesure et les dérivées partielles par rapport aux paramètres libérés (le choix des paramètres libérés est défini par l'utilisateur).

Les dérivées partielles et les résidus pondérés de plusieurs mesures forment les équations d'observation, soit pour chaque mesure i considérée :

$$\sum_{j=1}^p \frac{\partial Z_{qt}}{\partial X_j} \Big|_i dX_j = Z_{qm} - Z_{qt} \Big|_i = R_i \quad (\pi_i) \quad (2.19)$$

avec,

- p : Nombre de paramètres
- Z_{qt} : Quantité théorique de la mesure
- $\frac{\partial Z_{qt}}{\partial X_j} \Big|_i = A_{ij}$: Dérivées partielles de la mesure i par rapport au paramètre X_j
- $Z_{qm} \Big|_i$: Quantité mesurée = Mesure de phase ou de code iono-free (dans le cas du GPS)
- R_i : Résidu de la mesure i
- π_i : Poids de la mesure i

Lorsque l'on considère l'ensemble des n mesures, on obtient les équations linéaires d'observation qui peuvent se mettre sous forme matricielle selon :

$$A (n \times p) dX (p) = R (n) \quad (\pi(n)) \quad (2.20)$$

Les dérivées partielles des observations GPS sont calculées par la fonction de mesure générique de distance qui est commune à plusieurs types de mesures (Laser , Doris, éphémérides, points de croisement, altimétrie...) La dérivée partielle de l'ambiguïté a pour convention la valeur +1, celles des paramètres d'horloges des émetteurs (resp. des récepteurs) ont par convention les valeurs -1 (resp. +1) conformément à l'équation 1.5. Dans le traitement non différentié les ambiguïtés restent des paramètres réels.

Les paramètres libérés sont soit des **paramètres dynamiques**, c'est à dire affectant le calcul des forces agissant sur le(les) satellite(s) (par exemple, bulletins, forces empiriques,...), soit des **paramètres de mesure**, c'est à dire affectant uniquement les mesures (par exemple biais d'horloges, ambiguïtés, biais troposphériques,...).

2.8.2 Equation normale et solutions

A partir de l'équation d'observation 2.20, on forme l'équation normale de taille p :

$$\begin{aligned} A^t \pi A dX &= A^t \pi R \\ C dX &= D \end{aligned} \quad (2.21)$$

Avec $C (p \times p)$, matrice normale et $D (p)$ vecteur du second membre.

Si le système est bien conditionné et la matrice normale inversible, on obtient les solutions selon :

$$dX = C^{-1} D \quad (2.22)$$

Chapitre 3

Paramètres d'horloges et méthode locale

3.1 Introduction

Le traitement des mesures GPS non différenciées implique a priori de résoudre les nombreux paramètres d'horloge définis pour chaque époque de mesure. Le nombre de paramètres d'horloge à résoudre par époque de mesure est égal à la somme du nombre de satellites GPS, et du nombre de récepteurs effectuant des mesures sur l'arc moins une horloge conservée comme référence. Par exemple, pour des observations à 30 secondes et pour un réseau de 30 stations observant 27 satellites en orbite on obtient plus de 164000 paramètres d'horloge (voir tableau 3.1). Il est possible de résoudre ce nombre important de paramètres grâce aux nombreuses mesures simultanées effectuées à chaque date par les récepteurs. On peut estimer a priori le nombre de paramètres et de mesures pour un traitement donné :

Si l'on note :

- N_{obs} : nombre total d'observations pour l'arc
- N_{param} : nombre total de paramètres pour l'arc
- N_h : nombre total de paramètres d'horloges
- n_{sat} : nombre de satellites GPS considérés (< 30 pour la constellation actuelle)
- n_{rec} : nombre de récepteurs
- n_{epq} : nombre d'époques de l'arc (durée de l'arc / pas des données)
- \hat{n} : nombre moyen d'inconnues par récepteur hors horloges (tropo, coordonnées de stations...
le nombre est variable suivant les cas (de qqs paramètres à qqs dizaines/jour))
- \hat{n}_{dyn} : nombre moyen d'inconnues par satellites en cas de restitution d'orbite
(typique entre 10 et 20 paramètres par satellite et par arc)
- \hat{n}_{amb} : nombre moyen d'inconnues d'ambigüités par récepteur sur l'arc
(≈ 3 /jour en moyenne pour les observables iono-free)
- \hat{n}_{can} : nombre moyen de mesures effectuées par époque et par récepteur (≈ 7).

On obtient les relations suivantes :

$$N_h = n_{epq}(n_{sat} + n_{rec} - 1)$$

$$N_{obs} = n_{epq} * n_{rec} * \hat{n}_{can}$$

et

$$N_{param} = n_{epq}(n_{sat} + n_{rec} - 1) + \hat{n}_{dyn} * n_{sat} + n_{rec} * (\hat{n} + \hat{n}_{amb})$$

Le rapport attendu entre le nombre de paramètres et le nombre d'observation pour le traitement des mesures non différenciées avec restitution des horloges est donc donné par :

$$\begin{aligned} r &= N_{param}/N_{obs} \\ &= (n_{sat} + n_{rec} - 1)/(n_{rec} * \hat{n}_{can}) \quad (\text{horl.}) \\ &\quad + (\hat{n}_{dyn} * n_{sat})/N_{obs} \quad (\text{sat.}) \\ &\quad + (\hat{n} + \hat{n}_{amb})/(n_{epq} * \hat{n}_{can}) \quad (\text{rec.}) \end{aligned} \quad (3.1)$$

Les 3 termes de l'équation ci-dessus doivent être < 1 (ainsi que leur somme) pour travailler dans un contexte sur-déterminé. Quel que soit le cas considéré, le nombre moyen de mesures par paramètres ne peut pas augmenter indéfiniment.

Le premier terme (horloges) est le terme dominant pour le traitement des réseaux. La condition pour avoir une valeur suffisamment faible (de l'ordre de 0.25 paramètre par mesure) est de disposer d'un réseau de stations suffisamment grand (typiquement > 30 stations). En augmentant le nombre de stations, on obtient une valeur limite de ce terme de $(1/\hat{n}_{can} \approx 0.14)$; c'est à dire qu'à partir d'un certain nombre de stations (typiquement au dessus de 200), l'augmentation du nombre de stations ne permet pas de diminuer le nombre moyen de paramètres par mesure.

Le deuxième terme est dans la pratique (dès que les arcs sont assez long) toujours faible par rapport aux deux autres.

Le troisième terme qui implique les paramètres liés au récepteur ne dépend pas du nombre de récepteurs considérés mais est très variable suivant que l'on travaille avec des stations fixes $\ll 0.01$ où que l'on libère les coordonnées à chaque époque de mesure (0.6 environ); dans ce dernier cas, il est préférable de travailler avec un réseau figé et une station mobile.

Pour certains scénarios, et en particulier pour la restitution des orbites et des horloges des satellites GPS on se retrouve dans une situation où le nombre de paramètres d'horloge domine d'un ordre de grandeur les autres paramètres. Un traitement global de l'équation linéaire devient alors très pénalisant en temps de calcul, voire impossible.

C'est pourquoi il a été développé dans GINS une méthode "locale".

	exemple 1	exemple 2	exemple 3
Durée totale (1 arc)	1 jour	1 jour	2 jours
Intervalle entre deux époques	300 sec	30 sec	900 sec
nb satellites	27	27	27
nb stations	40	40	70
nb époques	288 (86400/300)	2 880	192
nb paramètres d'horloge	19 008 (288 × 66)	190 080 (2880 × 66)	18 432 (192 × 96)
nb de mesures (\simeq)	80 000	800 000	94 000

TAB. 3.1: Exemples de valeurs de différents paramètres dans le traitement de mesures GPS non différenciées.

3.2 Méthode globale et méthode locale

Deux méthodes sont possibles pour résoudre ces paramètres dans GINS : soit on considère que les paramètres d'horloges sont des paramètres comme les autres et ils participent à la matrice normale complète (**Méthode globale**) ; soit on les considère comme des paramètres "locaux" et ils sont réduits et résolus à part (**Méthode locale**). Le paragraphe suivant décrit la méthode de résolution locale utilisée pour la détermination de ces paramètres d'horloge dans le logiciel GINS.

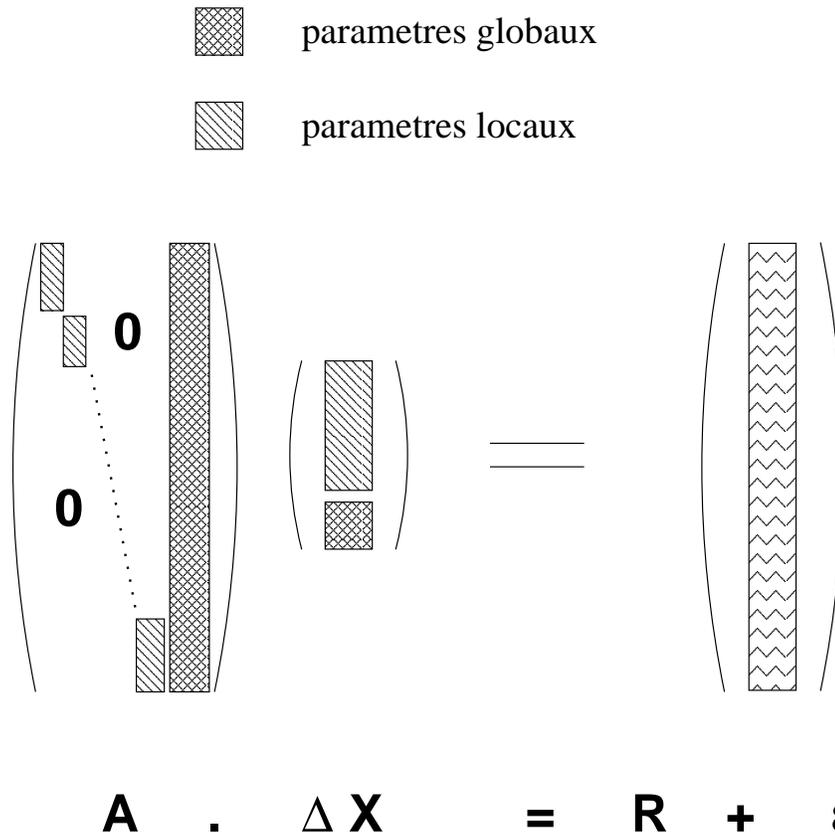


FIG. 3.1: Représentation schématique des équations d'observations. A est la matrice des dérivées partielles, où l'on a distingué les dérivées partielles associées aux paramètres locaux de celles concernant les paramètres globaux, ΔX est le vecteur des paramètres à résoudre et enfin $(R + \epsilon)$ est le vecteur des résidus d'observations.

Les paramètres que l'on cherche à résoudre seront séparés en deux groupes : les **paramètres globaux** d'une part, qui participent a priori à la modélisation de l'ensemble des mesures (par exemple, le vecteur d'état initial du satellite, les coordonnées moyennes des stations ou les paramètres d'ambiguïté communs à plusieurs époques,...), et les **paramètres locaux** d'autre part qui participent uniquement à la modélisation d'un sous-ensemble du jeu de mesures (Les paramètres d'horloges définis à chaque époque ne dépendent que des mesures de l'époque considérée).

A chaque sous-ensemble de mesures d'une même époque, on associe ainsi un sous-ensemble de paramètres locaux de telle manière que les équations d'observation puissent se mettre sous la forme donnée par la figure 3.1.

3.3 Résolution par blocs

La matrice des dérivées partielles A (cf figure 3.1) peut être décomposée en blocs correspondant à chacune des époques considérées (allant de 1 à n_{epq}). On l'écrira, on notant Dl_i (respectivement E_i) les blocs correspondant aux paramètres locaux (respectivement globaux) :

$$A = \left(\begin{array}{ccc|c} Dl_1 & & 0 & E_1 \\ & Dl_2 & & E_2 \\ & & \ddots & \vdots \\ 0 & & & Dl_{n_{epq}} \\ & & & E_{n_{epq}} \end{array} \right) \quad (3.2)$$

La méthode des moindres carrés permet de résoudre ce système. La solution s'obtient, si le système est convenablement conditionné, par :

$$\Delta X = (A^t \pi A)^{-1} A^t \pi R \quad (3.3)$$

où l'on a tenu compte de la matrice π représentant les incertitudes et corrélations associées aux mesures. La résolution du système (3.3) implique l'inversion de la matrice normale $(A^t \pi A)$. Si on écrit A sous la forme donnée par l'équation (3.2), la matrice normale prend la forme particulière suivante :

$$A^t \pi A = \left(\begin{array}{cccc|c} H_1 & & & 0 & Y_1^t \\ & H_2 & & & Y_2^t \\ & & \ddots & & \vdots \\ 0 & & & H_{n_{epq}} & Y_{n_{epq}}^t \\ \hline Y_1 & Y_2 & \cdots & Y_{n_{epq}} & G \end{array} \right) \quad (3.4)$$

avec :

$$\begin{aligned} H_i &= Dl_i^t \pi_i Dl_i && \text{pour } i = 1 \text{ à } n_{epq} \\ Y_i &= E_i^t \pi_i Dl_i && \text{pour } i = 1 \text{ à } n_{epq} \end{aligned} \quad (3.5)$$

$$G = \sum_{i=1}^{n_{epq}} E_i^t \pi_i E_i$$

Pour la suite, on introduit les notations supplémentaires :

$$D^t l = \left(Dl_1^t \quad Dl_2^t \quad \cdots \quad Dl_{n_{epq}}^t \right) \quad (3.6)$$

$$E^t = \left(E_1^t \quad E_2^t \quad \cdots \quad E_{n_{epq}}^t \right) \quad (3.7)$$

$$Y = \left(Y_1 \quad Y_2 \quad \cdots \quad Y_{n_{epq}} \right) \quad (3.8)$$

$$\text{et } H^{-1} = \begin{pmatrix} H_1^{-1} & & & 0 \\ & H_2^{-1} & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & H_{n_{epq}}^{-1} \end{pmatrix} \quad (3.9)$$

A chaque époque correspond une matrice H_i de taille $(p_i \times p_i)$ où p_i est le nombre de paramètres locaux pour l'époque i . La taille de la matrice G est $(p_g \times p_g)$ où p_g est le nombre de paramètres globaux. La partie située en haut et à gauche est bloc-diagonale. La matrice donnée par l'équation (3.4) peut s'inverser par blocs. Ce calcul est rappelé à l'annexe 9.4, et on obtient :

$$(A^t \pi A)^{-1} = \left(\begin{array}{c|c} H^{-1} + H^{-1} Y^t K^{-1} Y H^{-1} & -H^{-1} Y^t K^{-1} \\ \hline -K^{-1} Y H^{-1} & K^{-1} \end{array} \right) \quad (3.10)$$

où $K = G - Y A^{-1} Y^t$ qui peut encore s'écrire, en se servant des relations (3.5) :

$$K = \sum_{i=1}^{n_{epq}} (E_i^t \pi_i E_i - E_i^t \pi_i D l_i H_i^{-1} D l_i^t \pi_i E_i) \quad (3.11)$$

L'intérêt d'une telle méthode est le nombre de calculs restreints qu'elle comporte par rapport à la résolution d'un système matriciel monobloc de même taille. Le nombre des produits matriciels nécessaires à la formation du système est fortement réduit puisque la méthode tient compte du nombre important de blocs contenant des zéros. Dans le cas présenté ici, l'inversion proprement dite ne nécessite "que" l'inversion des blocs H_i et du bloc K . Les produits nécessaires à la formation Un algorithme de calcul époque par époque se dégage des relations (3.10) et (3.11). Cet algorithme sera décrit après la présentation des formules associées aux solutions.

3.4 Solutions

La solution du système d'équations présenté figure 3.1 est donnée par l'équation (3.3). Si on sépare le vecteur solution en deux parties selon :

$$\Delta X = \begin{pmatrix} \Delta X_{local} \\ \Delta X_{global} \end{pmatrix} \quad (3.12)$$

on obtient, pour les paramètres globaux :

$$\Delta X_{global} = K^{-1} E^t (\pi - \pi D l H^{-1} D l^t \pi) R \quad (3.13)$$

avec les notations données par les relations (3.9) à (3.6).

La solution pour les paramètres locaux est donnée par :

$$\Delta X_{local} = (H^{-1} + H^{-1} Y^t K^{-1} Y H^{-1}) D l^t \pi R - H^{-1} Y^t K^{-1} E^t \pi R \quad (3.14)$$

ou, en se servant de l'équation (3.13) :

$$\Delta X_{local} = H^{-1} D^t \pi (R - E \Delta X_{global}) \quad (3.15)$$

On peut enfin réécrire cette dernière équation en la décomposant époque par époque :

$$X_{local,i} = H_i^{-1} D_i^t \pi_i (R_i - E_i \Delta X_{global}) \quad \text{pour } i = 1 \text{ à } n_{epq} \quad (3.16)$$

C'est cette dernière équation qui a été retenue pour la résolution des paramètres locaux.

3.5 Algorithme de calcul époque par époque

L'algorithme de calcul époque par époque tel qu'il a été implémenté dans GINS est finalement constitué des étapes suivantes :

DEBUT Initialisation : $K = 0$, puis pour chaque époque i de 1 à n_{epq} :

1. calcul des résidus et des dérivées partielles pour chaque mesure de l'époque i .
On obtient R_i , D_i et E_i pour l'époque i .
2. calcul de $H_i = D_i^t \pi_i D_i$, $Y_i = E_i^t \pi_i D_i$
3. inversion de H_i
4. incrémentation de $K = K + (E_i^t \pi_i E_i - Y_i H_i^{-1} Y_i^t)$ et calcul du second membre modifié de l'époque $D'_i = E_i^t \pi_i R_i - E_i^t \pi_i D_i H_i^{-1} D_i^t \pi_i R_i$
5. Retour au 1. pour l'époque suivante

FIN. Inversion de K , puis calcul des solutions globales par l'équation (3.13) : $\Delta X_{global} = K^{-1} D'_i$

3.6 Calcul des paramètres d'horloges seuls

Les paragraphes précédents décrivent la situation générale où les paramètres locaux et globaux sont résolus simultanément. Mais on peut vouloir résoudre les paramètres locaux seuls en travaillant à paramètres globaux figés. Dans ce cas, on a $\Delta X_{global} = 0$ et l'équation (3.16) se ramène à :

$$X_{local,i} = H_i^{-1} D_i^t \pi_i R_i \quad \text{pour } i = 1 \text{ à } n_{epq} \quad (3.17)$$

Ce dernier système se résout très rapidement puisque l'on inverse dans ce cas que les blocs (nombreux, mais de petites tailles).

3.7 Gestion des équations d'observation ne dépendant pas des paramètres locaux

Ce cas de figure se présente quand on combine des mesures GPS non différenciées avec des mesures d'un autre type (laser, éphémérides, Doris...etc). Les dérivées partielles de ces mesures par rapport aux biais d'horloges GPS sont évidemment nulles et les équations

d'observations peuvent se mettre sous la forme décrite par la figure 3.2. Pour garder le classement temporel des mesures, les blocs sont maintenant séparés par des lignes où les coefficients de la partie gauche de la matrice A sont nuls. Cette structure particulière ne présente pas de problèmes particuliers et on peut appliquer la méthode précédente à condition de tenir compte des "trous" pour les produits entre A et E (équations (3.5) ou (3.11) et (3.15)).

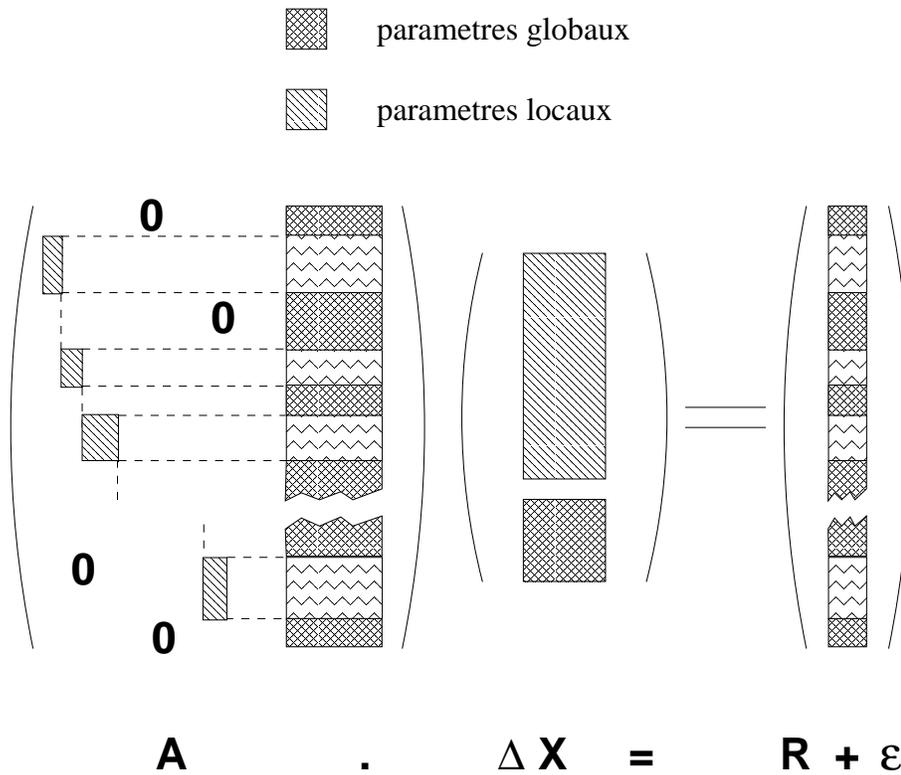


FIG. 3.2: Représentation schématique des équations d'observations dans le cas où on combine différents types de mesures. A est la matrice des dérivées partielles, où l'on a distingué les dérivées partielles associées aux paramètres locaux de celles concernant les paramètres globaux, ΔX est le vecteur des paramètres à résoudre et enfin $(R + \epsilon)$ est le vecteur des résidus d'observations.

Chapitre 4

Fonction de mesure GPS double différence

4.1 Principe

Les mesures doubles différences ont été massivement utilisées dans les traitements GPS. Une mesure double différence se forme à partir de mesures élémentaires simultanées et permet d'éliminer les paramètres communs aux mesures ainsi que certaines erreurs de modélisation pour les courtes lignes de bases principalement (erreur d'orbites, erreurs de modélisation de la troposphère ou termes ionosphériques de second ordre non corrigés par la combinaison bi-fréquence). Le problème devient plus petit : le nombre de mesures et le nombre de paramètres diminuent. Mais il se complexifie car il faut former des doubles différences indépendantes et tenir compte de la corrélation des mesures entre elles (lorsqu'une même mesure non différenciée est utilisée dans plusieurs doubles différences).

L'opérateur de formation des doubles différences noté DD_{ijkl} entre les 4 mesures non différenciées élémentaires L_i, L_j, L_k et L_l s'écrit :

$$DD_{ijkl} = L_i - L_j - (L_k - L_l) \quad (4.1)$$

où les L_i sont des mesures de code ou de phase élémentaires. Dans la suite on notera simplement cet opérateur DD . Les biais d'horloges des stations s'annulent lors de la différenciation et si les mesures sont simultanées entre les deux récepteurs (voir pages 18 et 26), les différences des biais d'horloges des satellites peuvent être négligées devant le bruit de mesure.

Les paragraphes suivants traitent la mesure double différence (4.2), la corrélation des mesures entre elles (4.5) et la résolution des ambiguïtés entières (5).

La formation des mesures doubles différences à partir d'un jeu de mesures non différenciées est effectuée avant le programme GINS, au niveau des prétraitements. Cette étape est décrite dans le paragraphe 6.5 (page 81) et l'algorithme de formation est détaillé dans l'annexe 9.2 (page 100).

4.2 Observable iono-free double différence

De la même manière que pour les mesures non différenciées (cf équation 2.10), il est possible de former un observable iono-free sur les doubles différences. C'est cet observable qui est traité dans GINS :

$$\begin{aligned} DD P_3 &= c(DD \tau_{geom} + DD \tau_{relat} + DD \tau_{tropo}) + DD \sigma_{P3} \\ DD L_3 &= c(DD \tau_{geom} + DD \tau_{relat} + DD \tau_{tropo}) + DD R_3 + DD \sigma_{L3} \end{aligned} \quad (4.2)$$

Le bruit de la nouvelle mesure double différence $DD \sigma_{L_3}^2$ est une combinaison des bruits de mesures individuelles. L'ambiguïté double différence $DD R_3$ est une combinaison **réelle** des doubles différences des ambiguïtés entières élémentaires ($DD N_1, DD N_2 \in \mathbb{N}$) et elle s'écrit :

$$DD R_3 = \frac{1}{(f_1^2 - f_2^2)} (f_1^2 \lambda_1 DD N_1 - f_2^2 \lambda_2 DD N_2) \quad (4.3)$$

Cette ambiguïté peut aussi s'exprimer comme la combinaison linéaire des ambiguïtés "wide-lane" et "narrow-lane" (voir paragraphe 5.2). Ces notions sont utiles pour la résolution des ambiguïtés entières (paragraphe 5).

4.3 Notion de passage doubles différences

Un passage de double différence est défini par l'intervalle où la quantité $DD R_3$ est constante ; c'est à dire qu'aucune ambiguïté non différenciée élémentaire ne présente de saut durant cette durée.

4.4 Quantité théorique double différence

La quantité théorique de l'observable DD se calcule par quatre appels successifs à la fonction de mesure non différenciée. Les seules différences concernent les paramètres d'horloge qui sont omis, la prise en compte d'un paramètre d'ambiguïté par passage double différence, et la gestion de la continuité de la correction de "phase wind up".

Les dérivées partielles des mesures doubles différences sont obtenues par différentiation des dérivées partielles de la mesure non différenciée.

4.5 Corrélation des mesures doubles différences

4.5.1 Introduction

Le traitement des mesures GPS doubles différences implique de tenir compte des corrélations des mesures entre elles car une même mesure non différenciée peut participer à plusieurs mesures doubles différences. La partie suivante justifie et décrit les algorithmes de prise en compte des corrélations de mesures dans GINS.

Durée totale de l'arc	86400 sec	86400 sec	2 jours
Intervalle entre deux époques	900 sec	300 sec	900 sec
nombre de satellites	27	27	27
nombre de stations	58	58	58
nombre d'époques	$(86400/900) = 96$	288	192
nb de mesures non différenciées (\simeq)	65000	195000	130000
nb de mesures doubles différences (\simeq)	25000	75000	50000
nb de mesures doubles différences / époque (= taille des blocs de Q)	260	260	260

TAB. 4.1: Nombre de mesures doubles différences pour trois exemples typiques.

Les mesures doubles différences sont corrélées à l'intérieur d'une même époque mais décorrélées des mesures des époques suivantes ou précédentes. Cette structure par blocs de la matrice de covariance est prise en compte lors de l'implantation informatique car l'inversion d'une matrice complète serait très coûteuse en temps de calcul (le nombre total de mesures est typiquement de plusieurs dizaines de milliers, alors que la taille de chaque bloc est de quelques centaines de mesures ; il dépend du nombre de stations et de satellites mais pas de la durée de l'arc (voir tableau 4.1).

L'algorithme tel qu'il a été implémenté dans GINS permet de constituer rigoureusement la matrice normale et le second membre associé, époque par époque, selon le formalisme décrit dans les paragraphes suivants.

4.5.2 Matrice de covariance et équations normales pour des mesures corrélées

Définitions et propriétés

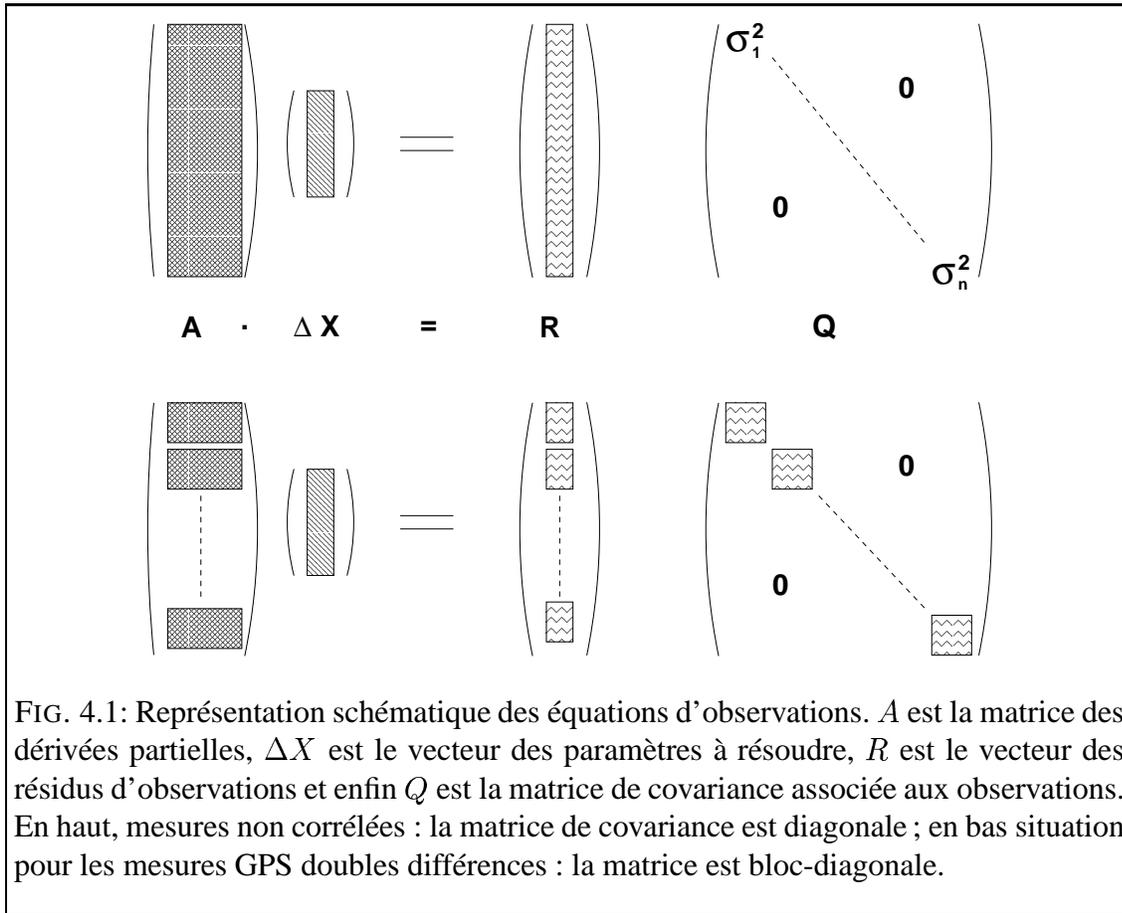
La matrice de covariance des mesures $(x_i, i = 1, n)$ est définie par la donnée pour tous les couples (i, j) de :

$$Q(i, j) = Cov(x_i, x_j) = \langle x_i x_j \rangle - \langle x_i \rangle \langle x_j \rangle \quad (4.4)$$

Pour les éléments de la diagonale, on a :

$$Q(i, i) = Cov(x_i, x_i) = \langle x_i^2 \rangle - \langle x_i \rangle^2 = \sigma_i^2$$

Pour les combinaisons linéaires de mesures, ce qui est bien utile avec les doubles différences, on déduit de (4.4) la propriété suivante :



$$Cov \left(\sum_{i=1}^n a_i x_i, \sum_{j=1}^{n'} b_j y_j \right) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{n'} a_i b_j Cov(x_i, y_j). \quad (4.5)$$

Dans les cas des mesures doubles différences, la sommation porte sur $n = n' = 4$ mesures et les a_i et b_j valent $+1$ ou -1 .

Si on note x_i, x_j, x_k et x_l les mesures non différenciées et $d_{ijkl} = x_i - x_j - (x_k - x_l)$ la mesure double différence formée à partir de ces mesures non différenciées, on déduit par exemple de l'équation 4.5 (avec la convention que les indices i', j', k', l' sont tous différents des indices i, j, k, l) :

$$Cov(d_{ijkl}, d_{i'j'k'l'}) = 0 \quad \text{aucune mesure en commun}$$

$$Cov(d_{ijkl}, d_{ij'k'l'}) = \sigma_i^2 \quad \text{une mesure en commun}$$

$$Cov(d_{ijkl}, d_{i'jk'l'}) = -\sigma_i^2 \quad \text{une mesure en commun}$$

$$Cov(d_{ijkl}, d_{ijk'l'}) = \sigma_i^2 + \sigma_j^2 \quad \text{deux mesures en commun}$$

$$Cov(d_{ijkl}, d_{ijkl}) = \sigma_i^2 + \sigma_j^2 + \sigma_k^2 + \sigma_l^2 \quad \text{terme diagonal}$$

etc...

Et plus généralement, si F est la matrice de formation des n mesures doubles différences à partir des m mesures non différenciées(*), π la matrice (diagonale) des covariances des mesures non différenciées ($\pi(i, i) = \sigma_i^2$ et $\pi(i, j) = 0$ pour $i \neq j$), on obtient la matrice de covariance Q des mesures doubles différences selon :

$$Q (n \times n) = F (n \times m) \pi (m \times m) F^t (m \times n) \quad (4.6)$$

*(Pour préciser les choses : la ligne de F correspondant à la double différence d_{ijkl} sera de la forme $(0 \dots 0 + 1 0 \dots 0 - 1 0 \dots 0 + 1 0 \dots 0 - 1 0 \dots 0)$ si les indices $ijkl$ sont croissants.)

Algorithme de formation des équations normales doubles différences

Si les mesures sont triées dans l'ordre des dates de mesure, ce qui est le cas dans GINS, les équations d'observation prennent la forme particulière de la figure 4.1. La méthode des moindres carrés appliquée à ce système implique la formation des équations normales :

$$(A^t Q^{-1} A) \Delta X = A^t Q^{-1} R \quad (4.7)$$

qui ont pour solution, si le système est convenablement conditionné,

$$\Delta X = (A^t Q^{-1} A)^{-1} A^t Q^{-1} R \quad (4.8)$$

La constitution du système (4.7) implique l'inversion de la matrice Q ; la forme particulière de celle ci suggère un calcul par blocs :

$$C = A^t Q^{-1} A = \sum_{k=1}^{nblocs} (A_k^t Q_k^{-1} A_k) \quad (4.9)$$

et

$$D = A^t Q^{-1} R = \sum_{k=1}^{nblocs} (A_k^t Q_k^{-1} R_k), \quad (4.10)$$

L'inversion de la matrice Q n'est pas effectuée en pratique telle quelle mais utilise la décomposition de Cholesky.

Implantation pratique dans GINS

La matrice F de formation des doubles différences est reconstruite dans le programme GINS et non pas lors de la formation des mesures. Cette maladresse apparente est néanmoins largement compensée par :

- la possibilité de tenir compte correctement des poids individuels des mesures non différenciées servant à la formation des doubles différences. En particulier on peut adopter une pondération dépendante des élévations calculées dans GINS ;
- une gestion simplifiée de l'élimination des mesures au cours des itérations (Si on calculait explicitement la matrice Q de chaque époque au niveau des prétraitements, il serait de toute façon nécessaire de connaître D pour éliminer une mesure).

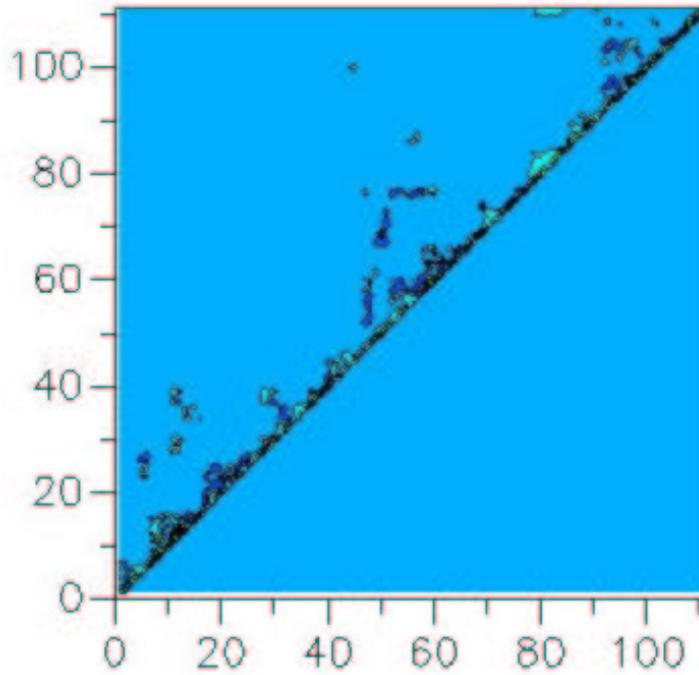


FIG. 4.2: Représentation d'une matrice de corrélation Q avant inversion. On a ici une époque avec 120 mesures. Seule la partie triangulaire supérieure de la matrice symétrique est représentée. Les formes qui apparaissent dépendent de l'ordre dans lequel sont rangées les mesures.

Dans GINS, le remplissage ligne à ligne de la matrice F et le calcul par blocs de la matrice Q sont effectués à chaque itération. La contribution de Q au système normal se fait en plusieurs étapes selon :

- remplissage ligne à ligne de la matrice F_k du bloc k .
- puis à la fin de chaque bloc k :

1. calcul de $Q_k = F_k \pi_k F_k^t$ (équation (4.6)).

2. calcul de la décomposition de Cholesky de $Q_k = L_k L_k^t$
(où L est triangulaire inférieure).

3. inversion de L_k .

4. calcul des produits $A_k^t = A_k^t L_k^{t-1}$ et $R_k' = L_k^{-1} R_k$. (4.11)

5. contribution à la matrice C du bloc k : $C = C + A_k^t A_k'$.

6. contribution à la matrice D du bloc k : $D = D + A_k^t R_k'$.

L'inversion du système (équation 4.8) est dès lors similaire au cas corrélé. Les opérations décrites en (4.11) sont réalisées par la routine `CALCUL_POIDD` en faisant un usage intensif des routines `ESSL` et `BLAS` qui optimisent les différents produits et l'inversion de la matrice symétrique définie positive Q . Un exemple illustré d'une telle matrice de corrélation est donné sur la figure 4.2.

Gestion des mesures à poids nul

Si on conserve une ou des mesures à poids nul, on se retrouve avec une matrice Q non inversible. Les mesures éliminées sont a priori distribuées aléatoirement et il est nécessaire de les traiter de manière indépendante des autres mesures. La solution retenue consiste à séparer Q_k en deux sous-blocs : un bloc contenant les mesures à poids non nul et un bloc contenant les mesures à poids nul. On inverse alors uniquement le premier bloc. Cette solution nécessite une permutation des éléments de Q (et de A et de R) avant l'inversion et les produits de l'algorithme 4.11, puis une permutation inverse pour retrouver ses petits dans la suite. Le défaut de cette méthode est que la ou les mesures individuelles ayant contribué à un fort résidus et donc à l'élimination de la mesure double différence ne sont pas détectées individuellement.

Chapitre 5

Algorithme de recherche des valeurs entières et fixation/réduction de la matrice normale inverse dans GINS

5.1 Principes généraux

L'intérêt de fixer les ambiguïtés entières est de pouvoir transformer les observables de double différence de phase **biaisés** en observables non biaisés. Cela revient encore à transformer les mesures de phase en un observable du type du code avec un bruit de mesure millimétrique. Dans un traitement classique utilisant la mesure de phase, le nombre de paramètres d'ambiguïtés domine (par exemple, pour une ligne de base et une journée de traitement, on a respectivement 3 coordonnées, 20 paramètres de biais zénital troposphérique et 50 ambiguïtés doubles différences). Si on fixe les valeurs des ambiguïtés on réduit considérablement la taille du système à résoudre et en augmente par conséquent la stabilité des solutions pour les autres paramètres.

La **difficulté** principale est de fixer les ambiguïtés aux bonnes valeurs.

Toutes les méthodes de fixation de ambiguïtés entières passent par les étapes suivantes :

- le calcul des meilleures quantités théoriques possibles
- l'estimation des valeurs réelles des ambiguïtés
- la recherche des valeurs entières des ambiguïtés
- la fixation proprement dite qui consiste à supprimer le paramètre ambiguïté de l'estimation en utilisant la valeur trouvée.

5.2 Les combinaisons utiles pour les doubles différences

La littérature est nombreuse pour le problème de la résolution des ambiguïtés entières. Pour plus de détails on se referera utilement aux thèses de Leos Mervart (1995) et de Elmar Brockmann(1997), et éventuellement, pour la théorie sur des méthodes plus complexes que celle utilisée dans GINS, et les problèmes d'implantation pratique on pourra se référer à Paul de Jonge (1996).

L'objet de toute méthode de résolution des ambiguïtés entières est d'isoler les paramètres d'ambiguïtés ou des combinaisons de ceux ci dans les résidus de mesure ou en formant des combinaisons de mesures ne contenant plus que les ambiguïtés. On présente ci dessous les combinaisons qui sont utilisées dans GINS. Les combinaisons sont ici effectuées entre les mesures de fréquence 1 et 2 mais on pourra définir dans l'avenir des combinaisons équivalentes avec l'arrivée de fréquence supplémentaire pour GPS et les fréquences Galileo.

5.2.1 Combinaison "wide-lane"

La combinaison wide-lane s'obtient à partir des mesures doubles différences sur les deux fréquences ($DD L_1$ et $DD L_2$) et fait apparaître la longueur d'onde $\lambda_5 \simeq 86.19$ cm (cf. tableau 1.1, page 19). Elle se forme à partir des doubles différences sur les deux fréquences f_1 et f_2 selon :

$$DD L_5 = \frac{1}{(f_1 - f_2)}(f_1 DD L_1 - f_2 DD L_2) \quad (5.1)$$

D'après l'équation 2.10, on obtient :

$$\boxed{DD L_5 = c\tau + \lambda_5 DD N_5 + \frac{f_1}{f_2} DD I} \quad (5.2)$$

avec $\lambda_5 = \frac{c}{(f_1 - f_2)}$

et l'ambiguïté "wide-lane" : $DD N_5 = DD N_1 - DD N_2$

5.2.2 Combinaison "Melbourne - Wubben"

La combinaison Melbourne-Wubben utilise est une combinaison entre les mesures doubles différences de code et la combinaison "wide-lane" sur la phase. Elle permet de supprimer la contribution de la ionosphère et la contribution de la distance géométrique. On introduit d'abord la combinaison des mesures de code (attention, les signes sont différents de ceux de l'équation 5.1) :

$$\begin{aligned} DD P_5 &= \frac{1}{(f_1 + f_2)}(f_1 DD P_1 + f_2 DD P_2) \\ &= c\tau + \frac{f_1}{f_2} DD I \end{aligned} \quad (5.3)$$

puis :

$$\boxed{DD L_5 - DD P_5 = \lambda_5 DD N_5} \quad (5.4)$$

Cette combinaison est utilisée dans GINS pour estimer a priori sur l'ambiguïté $DD N_5$ afin de limiter l'espace de recherche. Elle peut aussi être utilisée pour les études sur le bruit de la mesure de code.

5.2.3 Ambiguïtés “narrow-lane”

On peut réécrire l’ambiguïté réelle iono-free $DD R_3$ en introduisant l’ambiguïté wide-lane $DD N_5 = DD N_1 - DD N_2$ (équation (5.2)) selon :

$$\begin{aligned}
 DD R_3 &= \frac{1}{(f_1^2 - f_2^2)} (f_1^2 \lambda_1 DD N_1 - f_2^2 \lambda_2 DD N_2) \\
 &= \frac{c}{(f_1^2 - f_2^2)} (f_1 DD N_1 - f_2 DD N_2) \\
 &= \frac{cf_2}{(f_1^2 - f_2^2)} DD N_5 + \frac{c}{(f_1 + f_2)} DD N_1
 \end{aligned} \tag{5.5}$$

soit

$$\boxed{DD R_3 = \alpha_5 DD N_5 + \lambda_3 DD N_1} \tag{5.6}$$

avec $\lambda_3 \simeq 10.69 \text{ cm}$
 et $\alpha_5 = \frac{f_1}{(f_1 - f_2)} \lambda_3$

Les ambiguïtés réelles iono-free s’expriment ainsi comme la somme de deux termes. Si l’ambiguïté “wide lane” (N_5) est connue, on obtient :

$$DD R'_3 = DD R_3 - \alpha_5 DD N_5 = \lambda_3 DD N_1 \tag{5.7}$$

5.2.4 Choix des valeurs entières et réglages proposés

La méthode utilisée dans GINS est inspirée de la méthode Quasi-ionosphère free du Bernese software (QIF). Un certain nombre de problèmes d’implantation pratique a été résolu dans le logiciel pour inclure cette méthode.

On utilise tout d’abord quelques itérations pour éliminer les mesures aberrantes et obtenir les meilleurs résidus possibles (de 4 à 6 itérations typiquement). Au cours de ces itérations préalables, on estime les valeurs réelles de l’ambiguïté double différence iono-free ($DD R_3$, équation 4.3). On dispose aussi à ce niveau de la matrice de covariance et des erreurs $\sigma DD R_3$ associées).

Ces ambiguïtés sont ensuite corrigées d’un a priori entier de l’ambiguïté wide-lane (équation 5.7) estimé à partir de la combinaison Melbourne-Wubbena (équation 5.2). Pour l’estimation de la wide lane, on utilise les mesures non éliminées du passage en tenant compte de la pondération selon (voir annexe 9.3) :

$$DD \tilde{N}_5 = nint \left\langle \frac{DD L_5 - DD P_5}{\lambda_5} \right\rangle \tag{5.8}$$

$$DD R'_3 = DD R_3 - \alpha_5 DD \tilde{N}_5$$

L'impact de cette correction sur la distribution des ambiguïtés est illustré sur la figure 5.1. Puis, elles sont corrigées d'un a priori entier de la narrow-lane (routine *corrige_nlgps.f90*) selon :

$$DD R_3'' = DD R_3' \text{int}(DD R_3' / \lambda_3) \lambda_3 \quad (5.9)$$

A cette étape on dispose, à condition d'avoir de bons résidus de mesure, d'une ambiguïté $DD R_3''$ ne contenant plus que le bruit de la détermination et les erreurs sur les entiers estimés lors des étapes précédentes. L'expérience montre que l'on fait rarement une erreur de plus d'un cycle N_5 lors de la correction "wide - lane", ce qui permet de limiter l'espace de recherche des doubles ($DD N_1, DD N_5$) de l'étape suivante.

Les ambiguïtés DD sont alors prises une par une dans l'ordre de leur $\sigma DD R_3$ croissant, de la mieux déterminée à la moins bien déterminée. Pour chaque ambiguïté, on cherche la combinaison ($DD N_1, DD N_5$) donnant la valeur $DD R_3^{fixe}$ la plus proche de l'estimation réelle $DD R_3''$. La combinaison est retenue si :

1. La quantité $|DD R_3^{fixe} - DD R_3''| / \lambda_3$ est inférieure à un seuil défini dans le directeur (typiquement 0.17 cycles)
2. Si l'écart relatif entre la meilleure combinaison et la deuxième meilleure est supérieur à 50%.

Si la combinaison est retenue, on recalcule l'ensemble des valeurs estimées et on teste l'ambiguïté suivante.

Le recalcul de l'ensemble de la solution est a priori coûteux en temps de calcul (on doit recalculer la solution à chaque ambiguïté) et un algorithme spécifique a été développé. Il est effectué en pratique par la réduction de la matrice inverse (car on ne dispose pas à ce moment de la matrice normale). Le détail de ce calcul est développé dans la partie suivante.

5.2.5 Réduction de la matrice inverse

On utilise les notations suivantes :

- p : nombre de mesures
- n : nombre de paramètres total
- k : nombre de paramètres fixés
- R_p : vecteur des résidus de mesure, taille p
- A_{pn} : matrice des dérivées partielles
- dX_n : vecteur des solutions du système complet
- dX_{k0} : vecteur des k valeurs fixées
- \tilde{dX}_{n-k} : vecteur des solutions modifiées
- Q^{-1} : matrice de pondération
- N_{nn} : matrice normale
- N_{11}, N_{22}, N_{21} : sous blocs de la matrice normale
- B_n : second membre
- $M_{nn} = N_{nn}^{-1}$: matrice inverse
- M_{11}, M_{22}, M_{21} : sous blocs de la matrice inverse

Les équations d'observations de l'ensemble des mesures se mettent sous la forme :

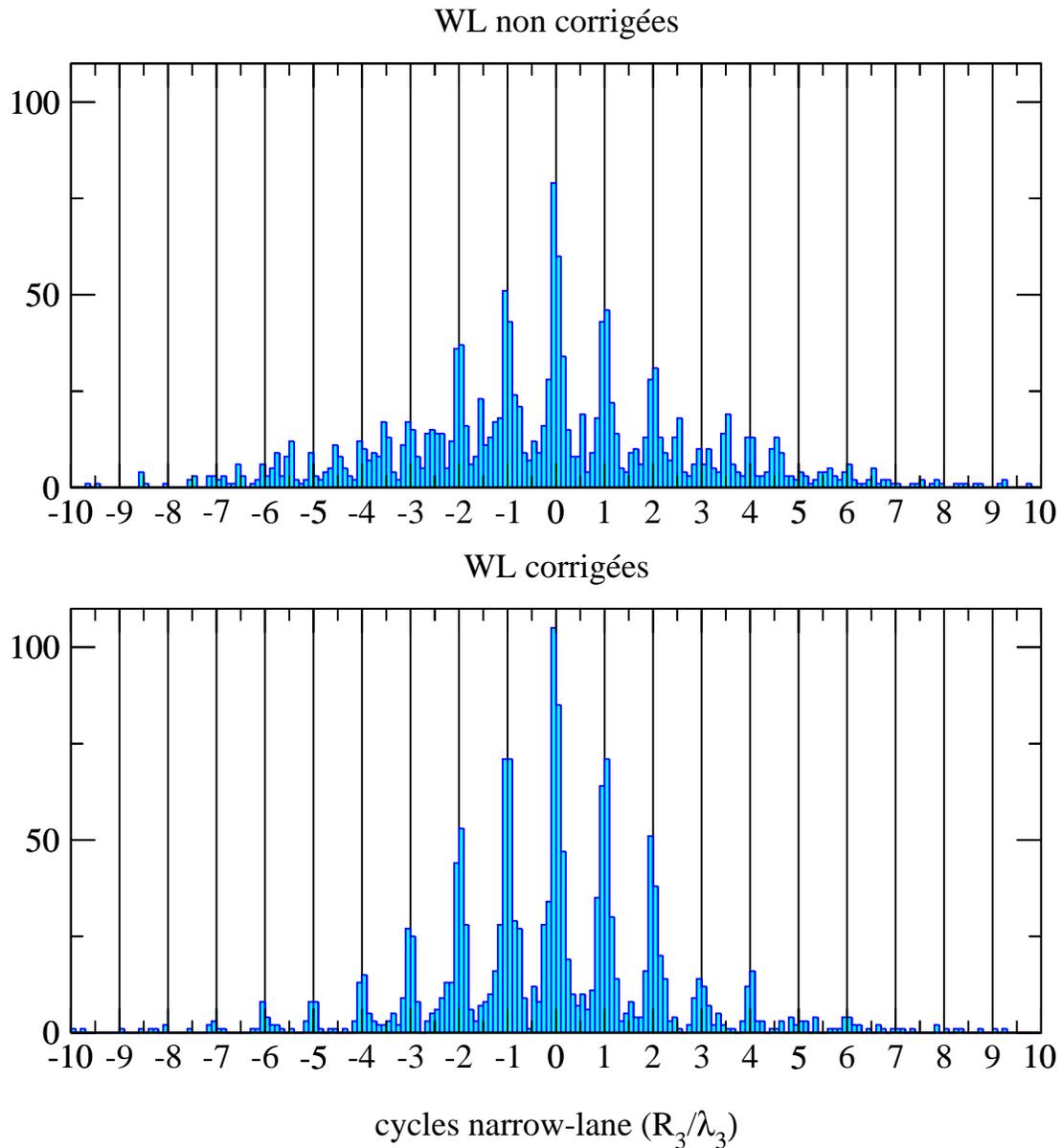


FIG. 5.1: Histogrammes des ambiguïtés iono-free estimées exprimées en terme de nombre de cycles “narrow-lane”. En haut (resp. en bas) avant, (resp. après) l’application de la correction “Wide-lane” (cf. équation 5.8). Les histogrammes centrés sur les entiers “narrow-lane” sont affinés ce qui diminue la taille de l’espace de recherche. La correction “narrow-lane” (cf. equation 5.9), qui n’est pas illustrée ici, a simplement pour effet de ramener l’ensemble de la distribution entre -0.5 et 0.5 cycles.

$$A_{pn}dX_n = R_p \quad (5.10)$$

On forme les équations normales de taille n :

$$(A_{np}^t Q_{pp}^{-1} A_{pn})dX = A_{np}^t Q_{pp}^{-1} R_p \quad (5.11)$$

$$\text{soit} \quad N_{nn}dX_n = B_n$$

et qui possède après inversion la solution :

$$dX_n = N_{nn}^{-1}B_n \quad (5.12)$$

Fixer un sous jeu de taille k des n paramètres initiaux revient à résoudre un système de taille inférieure pour lequel on a des résidus de mesure modifiés par les valeurs fixées. C'est-à-dire si l'on sépare le système 5.11 entre les $n - k$ inconnues libres et les k inconnues fixées en deux blocs selon :

$$\left(\begin{array}{c|c} N_{11} & N_{21}^t \\ \hline N_{21} & N_{22} \end{array} \right) \begin{pmatrix} dX_{n-k} \\ dX_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_{n-k} \\ B_k \end{pmatrix} \quad (5.13)$$

et le système inverse 5.12 selon :

$$\begin{pmatrix} dX_{n-k} \\ dX_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M_{11} & M_{21}^t \\ \hline M_{21} & M_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B_{n-k} \\ B_k \end{pmatrix} \quad (5.14)$$

La solution du système fixé pour les k valeurs dX_{k0} s'obtient selon (voir annexes 9.5 et 9.6) :

$$\begin{aligned} N_{11}^{-1} &= M_{11} - M_{21}^t M_{22}^{-1} M_{21} \\ d\tilde{X}_{n-k} &= N_{11}^{-1} B_{n-k} + M_{21}^t M_{22}^{-1} dX_{k0} \\ &= dX_{n-k} + M_{21}^t M_{22}^{-1} (dX_{k0} - dX_k) \\ d\tilde{X}_k &= dX_{k0} \end{aligned} \quad (5.15)$$

Cette "réduction" est codée dans la routine *fixe_mullag.f90* de GINS90. Pour la fixation des ambiguïtés entières, elle est appelée à chaque ambiguïté. Le sous bloc à inverser est donc à chaque fois de taille $k = 1$ et nécessite uniquement l'inversion d'un bloc de taille 1 pour chaque ambiguïté fixée.

5.2.6 Exemples pratiques

Les graphes 5.2, 5.3 et 5.4 présentent quelques exemples d'utilisation de la fixation des ambiguïtés entières avec GINS.

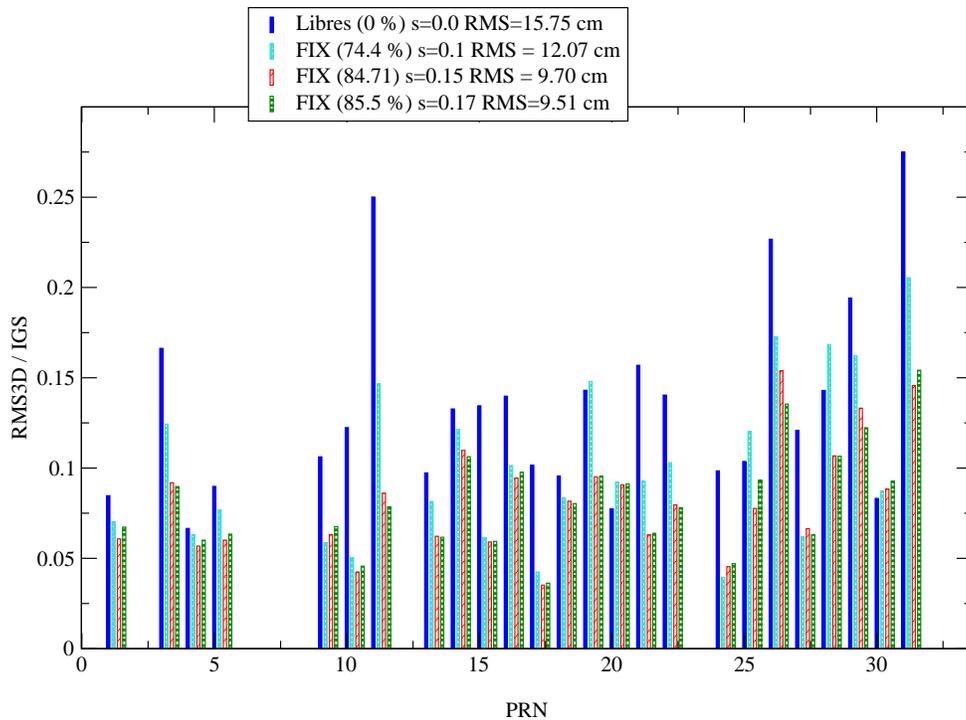


FIG. 5.2: Comparaison 3D entre orbites GINS et IGS, par satellite et pour 2 jours de traitement sur un réseau global de 55 stations. Différentes valeurs du seuil de fixation ont été testées. Le taux de fixation des ambiguïtés entières est indiqué en pourcentage dans la légende. La valeur de 0.17 apparaît comme optimale pour ce problème. Des valeurs plus élevées dégradent le résultat. On constate une très nette amélioration de l'ensemble des orbites dans le cas où les ambiguïtés sont fixées à des valeurs entières par rapport au cas où elles restent réelles.

5.3 Correction phase wind-up pour les doubles différences

Le calcul de la correction de phase wind-up se fait en combinant les corrections des 4 mesures élémentaires (voir 2.7). La méthode utilisée pour assurer la continuité des passages est décrite dans le paragraphe 2.7.2

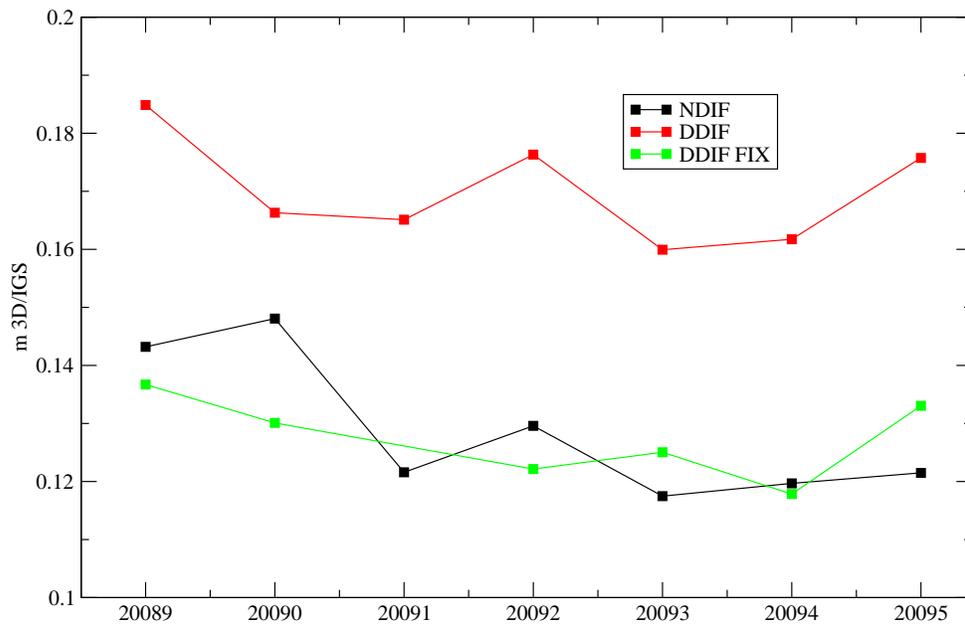


FIG. 5.3: Ecart 3D globaux de la constellation / IGS pour une semaine de restitution pour les 3 cas non différenciés (NDIF), doubles différences (DDIF) et doubles différences avec ambiguïtés fixées (DDIF FIX ; seuil = 0.17). La fixation améliore nettement le résultat. La solution non différenciée donne ici une qualité équivalente

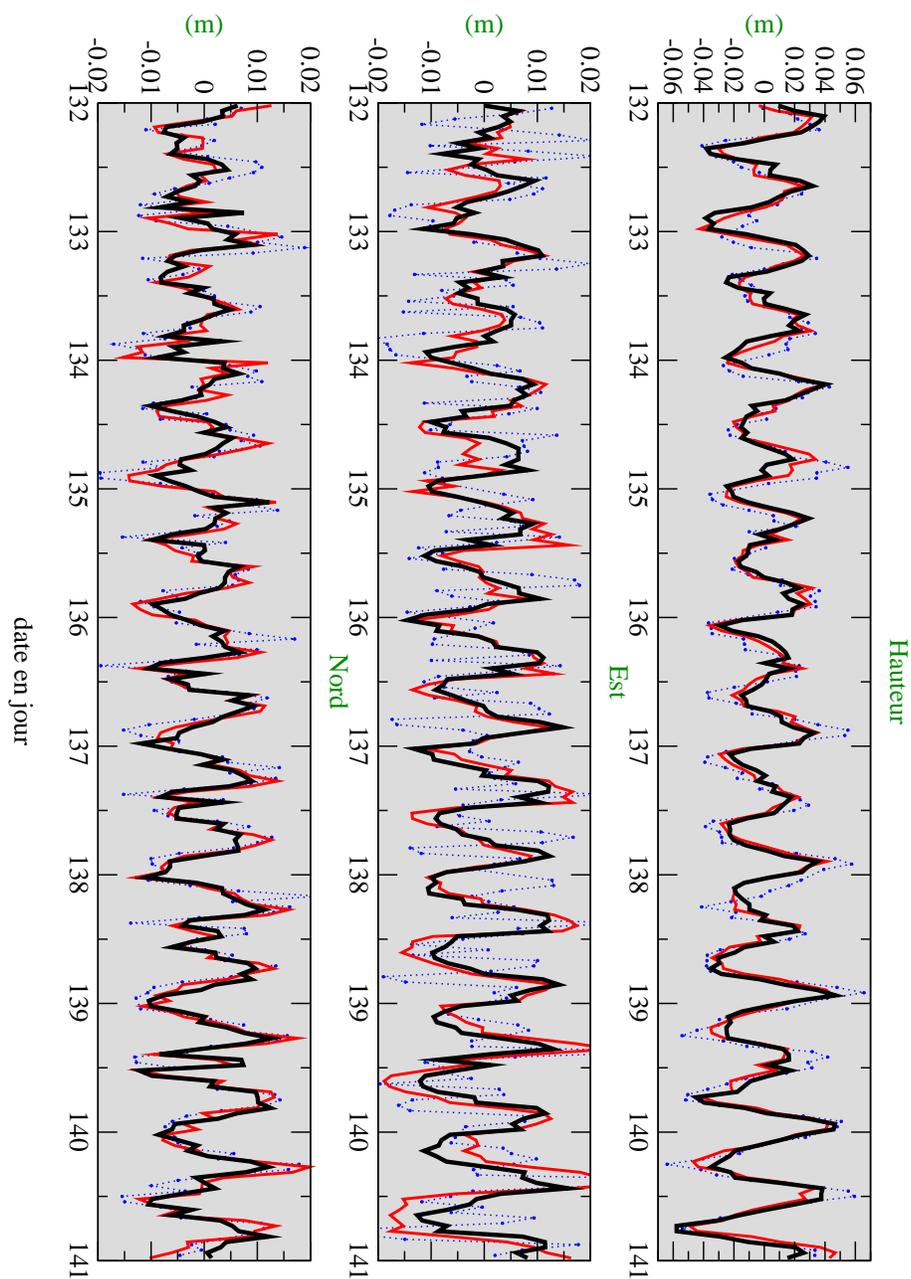


FIG. 5.4: Expérience d'observation des mouvements dus à la surcharge des marrées océaniques (campagne Bretagne ; 1 point par heure). Sans correction des centres de phase des antennes en azimuth/élévation et sans fixation des ambiguïtés entières (bleu pointillé) ; avec correction des centres de phase des antennes en azimuth/élévation (rouge) puis fixation des ambiguïtés entières (noir). Le gain apporté par la fixation des ambiguïtés est net en particulier sur la composante Est.

Chapitre 6

Prétraitements et Traitements

6.1 Flux des données et prétraitements des données GPS

Le flux des données GPS est représenté sur la figure 6.1. Les différents programmes sont indépendants les uns des autres et disposent de réglages individuels. Les deux types de traitements (mesure non différenciées et mesures doubles différences) partagent la majeure partie de la chaîne en commun mais le traitement double différence nécessite une étape de formation supplémentaire effectuée par le programme *DOUBLE90*. Les différents programmes organisés comme des “boîtes” à partir desquelles on construit un traitement spécifique adapté à chaque application. Pour les traitements systématiques et intensifs, on réalise des shells automatisant le flux des données et l’enchaînement des différents programmes.

L’ensemble des étapes affecte (éventuellement) la valeur des ambiguïtés doubles différences obtenues en sortie de GINS.

6.2 Rappatriement des données

Les données que l’on veut traiter sont rappatriées depuis les serveurs de l’IGS ou du CDDIS (1 fichier au format *RINEX* par jour et par station). C’est le point de départ des traitements.

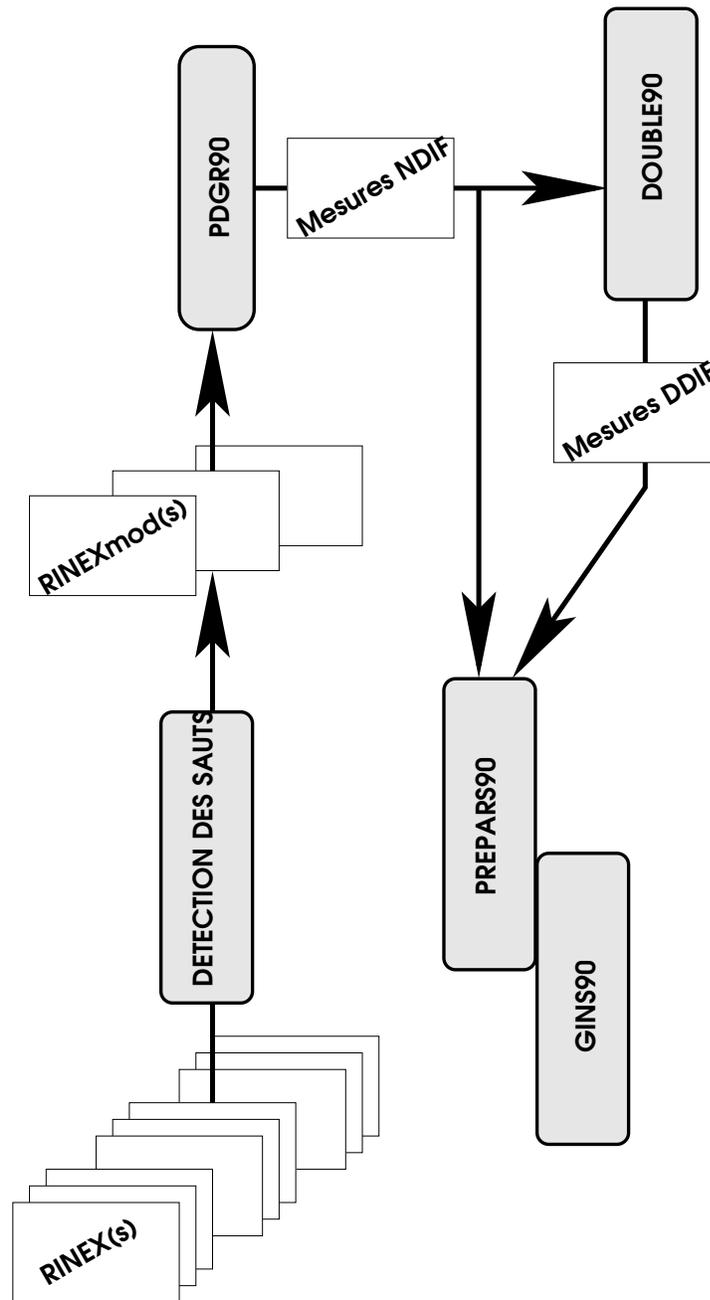


FIG. 6.1: Les étapes du traitement GPS avec GINS (prétraitements et traitements). Ces étapes sont décrites en détail dans ce chapitre. “Mesures NDIF” = Mesures Non différenciées GPS ; “Mesures DDIF” = Mesures Doubles différences. En grisé : “Programmes”

6.3 Détection des sauts de cycles

Cette étape produit à partir d'un ou plusieurs fichiers RINEX d'une même station (1 à 3 fichiers journaliers) un fichier *RINEX modifié* contenant l'ensemble des données sur la période. Le fichier de sortie est enrichi de nouveaux "observables" qui sont les valeurs estimées des ambiguïtés N_1 et des différences $N_1 - N_2$, (sur les mesures non différenciées). Il réalise le découpage en passage d'ambiguïtés N_1 et $N_1 - N_2$ constantes. Les sauts de cycles sont détectés à partir des différences finies d'ordre 4 sur les observables élémentaires ou des combinaisons (Il n'y a pas de calcul de la quantité théorique des observables à ce niveau). Un exemple de différences d'ordre 4 pour la mesure de phase L_1 est présenté sur la figure 6.2. L'ensemble des traitements effectués est décrit dans le tableau 6.1 issu de la documentation de Flavien Mercier (référence : DCT/SB/OR/2005-1708).

Etape	Observables	Combinaison	Traitements principaux
Code C/A fréquence 1	C_1	C_1	Ordre 4 seuil 100 m
Phase fréquence 1	L_1	L_1	Ordre 4 seuil 50 cycles
Biais intercode	C_1, P_2	-	C_1 +biais, P_2 +biais
Code P fréquence 1	P_1	P_1	Ordre 4 seuil 100 m
Code P fréquence 2	P_2	$P_2 - \gamma P_1$ (*)	Ordre 4 seuil 100 m
Phase fréquence 2	L_2	$L_2 - \gamma \lambda_1 L_1 / \lambda_2$ (*)	Ordre 4 seuil 2 cycles
Calcul des ambiguïtés	L_1, L_2, P_1, P_2	N_1, N_5	Calcul moyenne et écart type mini 10 mesures, $\sigma_{N_5} < 0.5cy$
Ecriture Rinex de sortie	$L_1, L_2, P_1, P_2, N_1, N_5$	-	Ecriture des mesures, nouveaux indicateurs, décimation et lissage du code

(*) $\gamma = f_1^2 / f_2^2$. Les combinaisons formées sont donc à un facteur près, le code et la phase sur la fréquence 2, corrigées de la iono observée sur la fréquence 1 (voir équations 2.8 et 2.9)

TAB. 6.1: Etapes principales du programme de détection des sauts (selon F. Mercier)

Le prétraitement sur plusieurs jours évite de couper artificiellement les passages à chaque nouvelle journée et permet de former des passages plus longs ; pour des stations sol, le nombre de passages artificiels représenterait environ 30% de paramètres inutiles supplémentaires. (voir figure 6.3).

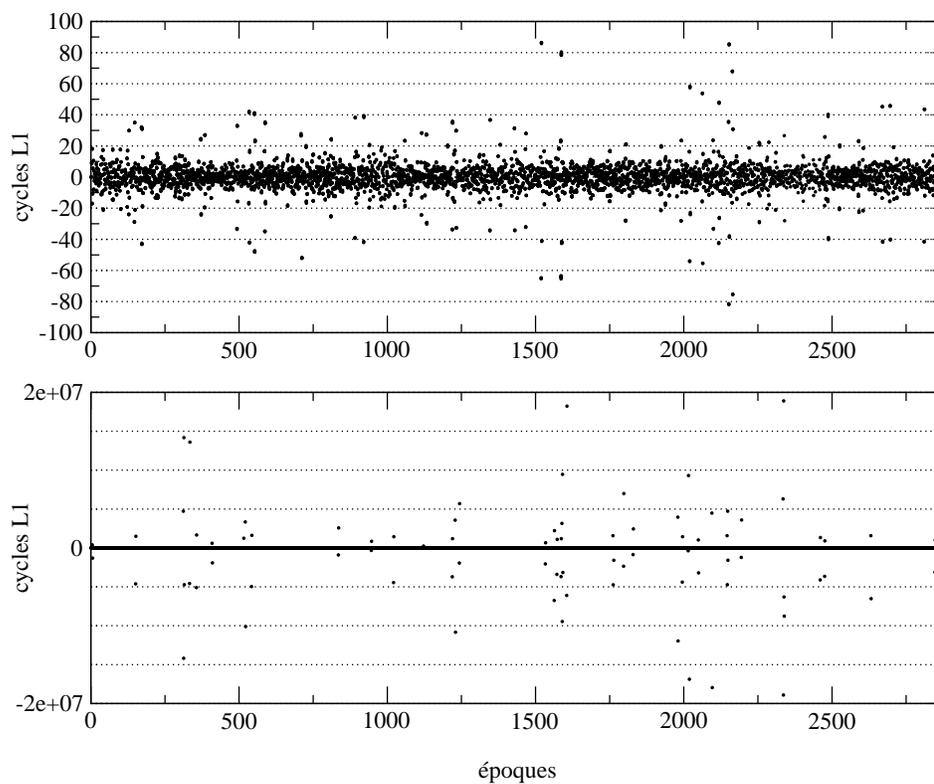


FIG. 6.2: Différences finies d'ordre 4 pour les mesures L_1 d'une station GPS au cours d'une journée. L'ensemble des passages sur tous les satellites sont superposés. Les anomalies représentent des sauts de cycles potentiels détectés sur seuil. Les sauts de grande amplitude sont clairement détectables (en bas). Avec ce seul observable, on détecte des sauts jusqu'à quelques dizaines de cycles (voir zoom sur la figure du haut).

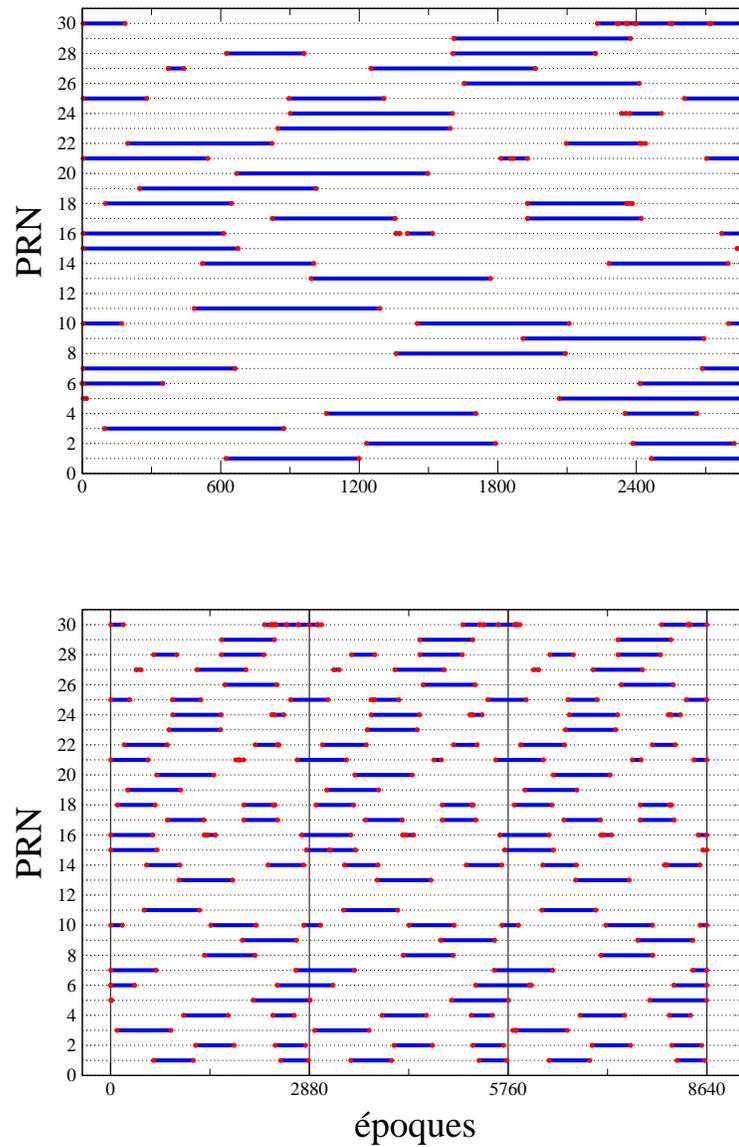
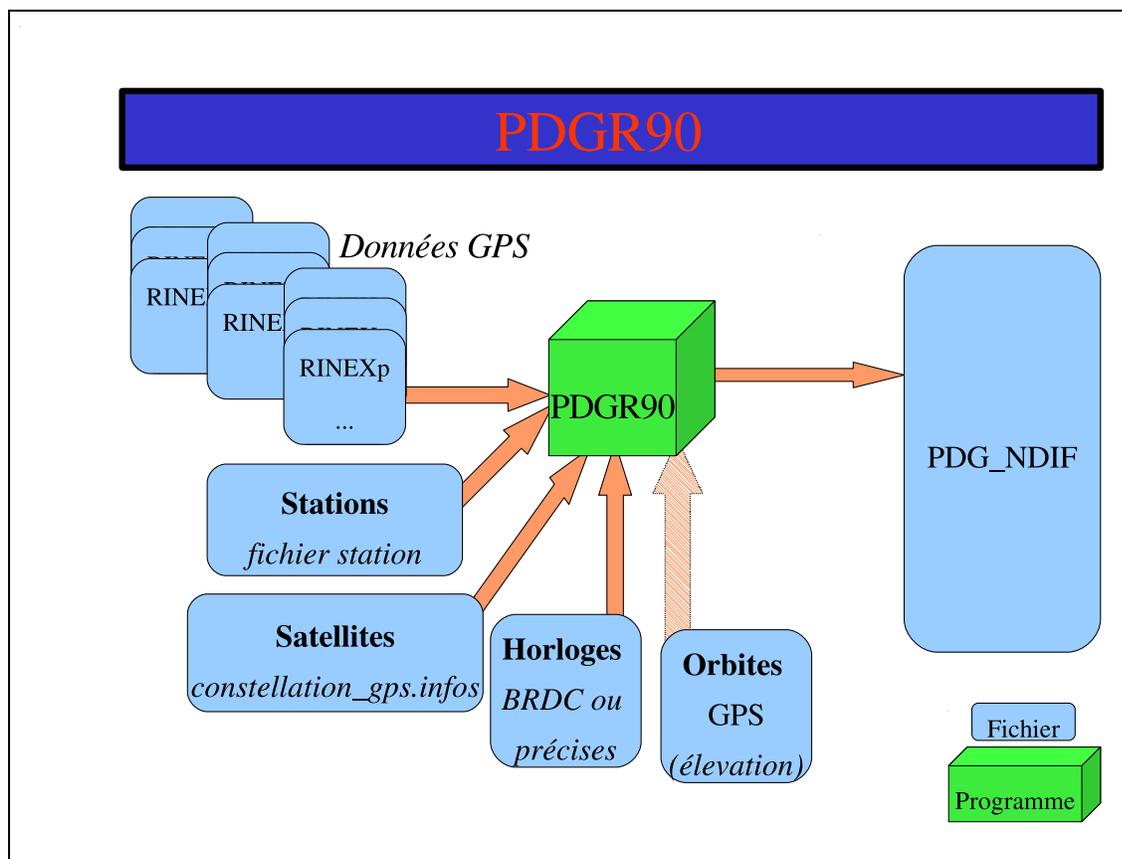


FIG. 6.3: Illustration de l'intérêt de la détection des sauts sur 3 jours de données. Les passages sont représentés par des traits bleus interrompus par des sauts (points rouges). En haut, le traitement sur 1 jour introduit des sauts artificiels (environ 30%) au date 0 et 86400 secondes à cause de la troncature du fichier. En bas, le traitement sur 3 jours fait disparaître les sauts artificiels. Une utilisation du programme sur 3 jours glissants permet de supprimer les sauts artificiels sur la durée voulue.

6.4 Prétraitement de mise en forme : PDGR90



Ce programme, commun pour les données des récepteurs sol ou embarqués, permet la mise au format des données GPS pour les programmes *double90* et *prepars90*.

Il réalise les fonctions suivantes :

- Suppression des données incomplètes en cas absence des observables (L_1, L_2, P_1 et P_2) ou en cas d'absence d'anomalie lors de l'étape de détection des sauts (une donnée n'appartenant à aucun passage est supprimée). La liste des conditions pour conserver une donnée est donnée dans le tableau 6.2 ;
- Lien des données avec le fichier station ; voir description au paragraphe 6.4.2 ;
- Lien des données avec le fichier satellite (ou fichier constellation) ; voir description paragraphe 6.4.1 ;
- Lien des données avec un fichier d'horloges hautes : cette étape nécessite des horloges absolues (pour la datation) **ET** éventuellement précises (pour les traitements où les horloges ne sont pas résolues) ;
- Sélection éventuelle du pas des données ;
- Sélection éventuelle en fonction de l'élévation (nécessite un fichier d'orbites GPS).

Le programme lit l'ensemble des données proposées en entrées (sous forme de fichier RINEX modifiés de 1 à 3 jours) et les écrit sous format ligne (une mesure par ligne) dans un fichier unique.

Condition	Détails et commentaires.
-bi-fréquence	recquis , les données mono-fréquences sont éliminées.
-horloges	si le fichier horloges hautes est attaché, ne garde que les mesures pour lesquelles on a une valeur d'horloge non nulle.
-ambiguïtés	élimine les mesures pour lesquelles les ambiguïtés du prétraitement précédent sont absentes.
-numéro station	la station doit être connue dans le fichier station.
-nombre de mesures par stations	si le pourcentage des mesures éliminées par les étapes précédentes est supérieur à un certain seuil, (typiquement 30-40% des données), toutes les données de la station sont éliminées.
-nombre de passages par stations	si supérieur à un certain seuil (typiquement 80-100 passages /jours), les données sont éliminées

TAB. 6.2: Conditions de validité d'une mesure au niveau du programme *PDGR90*

Les observables sont inchangés en valeur (mais pas en format) à part les mesures de phase qui sont corrigées de la valeur entière estimée de leur ambiguïté (celle issue du programme précédent de détection des sauts) et exprimées en mètres (voir équation 1.3).

Les dates sont transformées en jour julien et en TAI ($TAI = TGPS + 19$ secondes).

Les données en sortie de PDGR90 peuvent être attachées directement dans le directeur de GINS pour faire un traitement non différencié. Elles peuvent aussi être lues par le programme de formation des doubles différences, *DOUBLE90*.

Numéro GINS	Bloc
999xx	Bloc I
888xx	Bloc II
777xx	Bloc IIA
666xx	Bloc IIR
555xx	... etc

TAB. 6.3: Lien entre numéro GINS et le bloc du satellite GPS. xx représente le numéro PRN (de 1 à 40).

6.4.1 Fichier historique de la constellation GPS

Les satellites GPS forme une constellation qui évolue dans le temps (voir figure 6.4). Les satellites possèdent des caractéristiques différentes qui dépendent de leur type ou bloc (bloc I, II, IIA, IIR,...etc). Ces caractéristiques (forme, antennes, dynamiques, ...) doivent être connues pour effectuer des calculs précis de la quantité théorique ou de dynamique orbitale. Il contient des informations depuis 1984 et le lancement des premiers satellites BLOC I. Chaque numéro de satellite apparaissant dans les fichiers RINEX est ainsi relié en fonction de la date de mesure à un satellite donné. On distingue les numéros satellites PRN (Pseudo Range Number, de 1 à 40) qui sont mentionnés dans les fichiers RINEX et les numéros SVN (Satellite Vehicle Number) qui sont affectés une fois pour toute pour chaque satellite lancé. Les PRN ne représentent pas forcément le même satellite pour deux dates différentes.

Le fichier constellation permet donc :

- de gérer l'historique des satellites de la constellation GPS et de relier les numéros PRN aux numéros des satellites internes de GINS qui sont construits à partir du type de bloc et du PRN selon la correspondance donnée dans le tableau 6.3 ;
- de spécifier des périodes (manoeuvres, anomalies,...) pour lesquelles les données de tel ou tel satellite ne seront pas traitées.

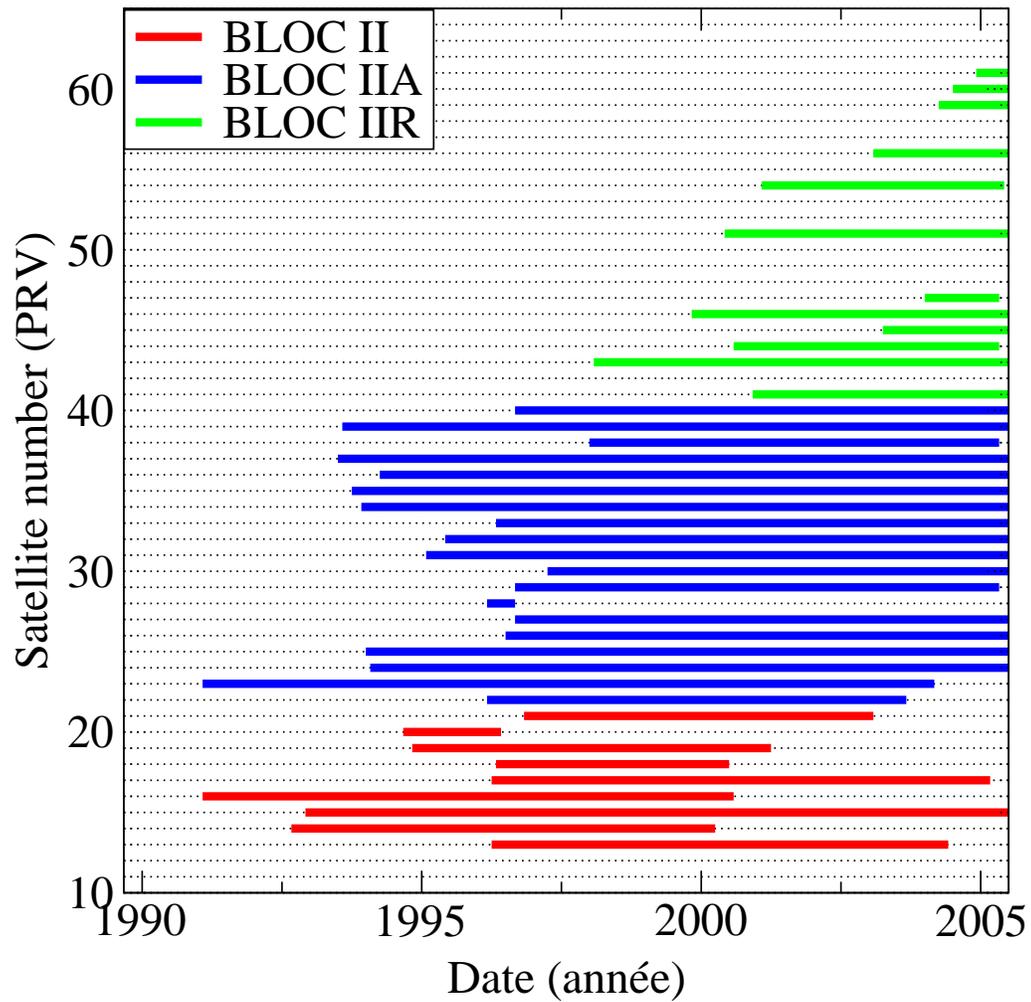


FIG. 6.4: Historique des lancements, périodes d'activité des satellites GPS et type de bloc (II,IIA,IIR) des satellites GPS depuis 1990.

6.4.2 Fichier des stations

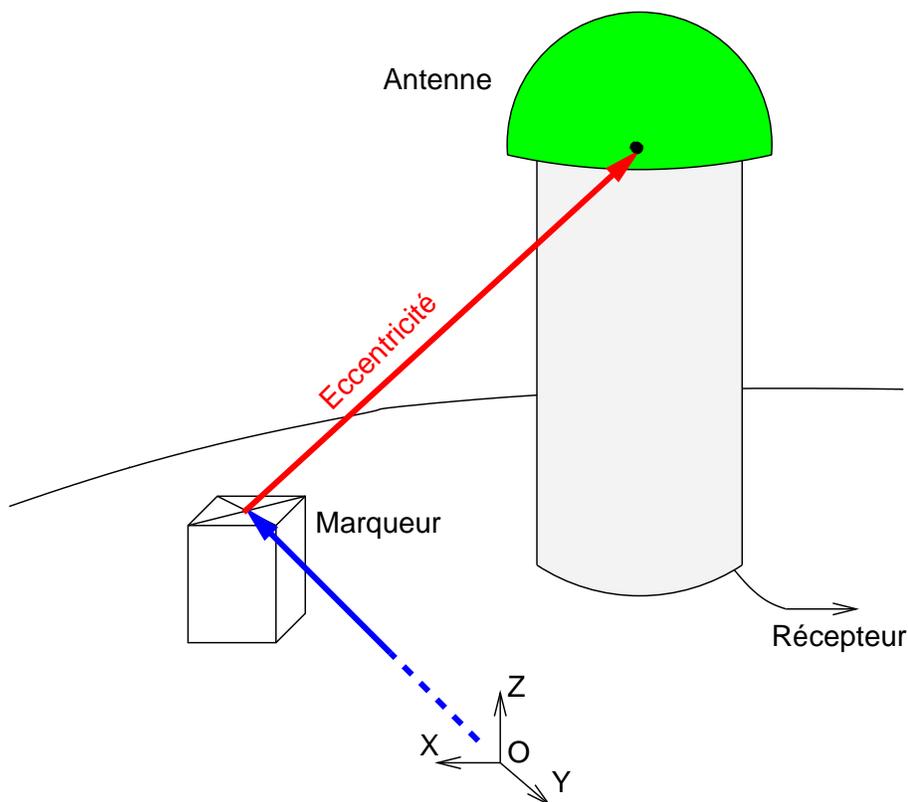


FIG. 6.5: Représentation schématique des informations contenues dans le fichier des stations pour les récepteurs GPS. En bleu, coordonnées du MARQUEUR par rapport à l'origine du système de référence, en rouge le vecteur ECCENTRICITE reliant le point de référence du marqueur au point de référence de l'antenne et en vert le type l'antenne utilisée donnant accès au centre de phase des mesures.

Le fichier de stations contient la liste des stations connues de GINS ainsi que leurs caractéristiques. Ce fichier est utilisé par GINS (à renseigner dans le directeur) et aussi par le programme de prétraitement PDGR90. Le format de ce fichier est commun à tous les types de stations de mesures (VLBI, DORIS ou Laser par exemple).

Pour chaque station, le fichier contient les informations datées suivantes :

- nom et numéro des stations.
- type de mesure concerné.
- coordonnées et vitesse du marqueur en XYZ.
- historique des excentricités du centre de phase des mesures.
- pour les stations GPS, on renseigne aussi le type d'antenne (convention ANTEX) et le centre de phase est calculé dans le GINS. Les caractéristiques des différentes antennes connues sont elles stockées dans le fichier des antennes (voir paragraphe 6.4.4).

6.4.3 Fichiers d'horloges GPS

Le fichier d'horloge est un fichier contenant pour chaque date et chaque satellite, la valeur des horloges $c\Delta t$ en mètres. Le format de ce fichier est interne à GINS. On doit attacher un tel fichier au niveau du programme *PDGR90* pour associer les observables au décalage d'horloge des satellites GPS. Ces horloges sont utilisées pour calculer la datation et doivent donc être absolues (c'est-à-dire référencées au TAI). Dans le cas où l'on fait des traitements avec des horloges hautes figées, elles doivent être de plus précises pour ne pas affecter la modélisation théorique de la mesure. Un certain nombre de programmes permet de visualiser et comparer les horloges ainsi que de les mettre au format GINS (par exemple à partir des fichiers BRDC).

6.4.4 Fichiers d'antennes GPS

Le fichier antennes GPS contient les informations relatives aux corrections de centre de phase des antennes. Il contient les vecteurs centre de référence de l'antenne - centre de phase pour les différentes fréquences ainsi que les cartes de correction en fonction de l'azimut et de l'élévation. Le format retenu pour ce fichier est le format ANTEX (voir paragraphe 2.6, page 35). La description du format est accessible sur le site <ftp://igscb.jpl.nasa.gov/igscb/station/general/antex13.txt>. Ce fichier est attaché au niveau du directeur de GINS.

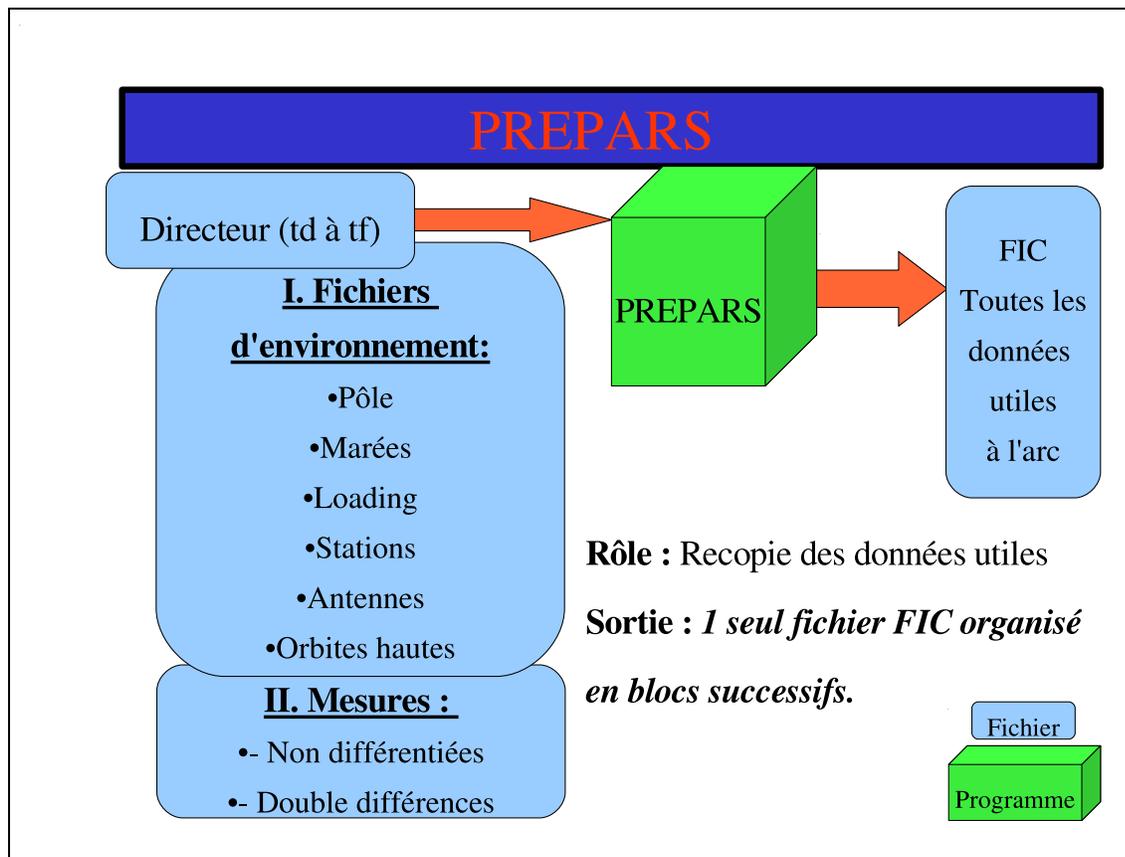
6.5 Formation des doubles différences

Le programme *DOUBLE90* permet de former les doubles différences. Il a été écrit en août et septembre 2004 pour remplacer l'ancien programme qui ne permettait pas de former des passages assez longs.

Les fonctions réalisées par le programme *DOUBLE90* sont les suivantes :

- Lit le fichier de mesures non différenciées en sortie de *PDGR90* ;
- Va chercher les coordonnées des stations dans le fichier station pour le calcul de la longueur des lignes de bases ;
- Forme les lignes de bases indépendantes entre stations dans l'ordre des stations ayant en commun le maximum de mesures (Voir annexe 9.2) ;
- Pour chaque ligne de base , forme les combinaisons indépendantes de satellites donnant le plus grand nombre de mesures. (Voir annexe 9.2) ;
- Réinjecte un certain nombre de mesures pour reformer des doubles différences à partir des mesures non différenciées non utilisées au point 4 ;
- Pour chaque ligne de base, calcule les doubles différences par passages, résout et corrige la wide-lane sur les doubles formées en utilisant la relation 5.4 (Voir annexe 9.3) ;
- Ecrit les données bi-fréquences au format GINS Doubles Différences.

6.6 Programme *PREPARS90*



Le programme *PREPARS90* ne fait pas de calcul mais gère la prise en compte des données. Les données ne sont donc pas modifiées à ce niveau (on y forme les observables iono-free, mais les informations permettant de reconstruire les deux fréquences sont conservées pour la suite).

Les données lues dans les fichiers sortant des programmes *PDGR90* ou *DOUBLE90* sont éventuellement sous-échantillonnées. Les données en dehors de la période définie pour l'arc, les données basse-élévation, les données appartenant à des passages courts peuvent éventuellement être éliminées sur seuil à la demande. L'ensemble des mesures conservées est recopié dans le fichier interne et transmis au programme *GINS90*.

Paramètres	nom (ELS)	(équation)	type NDIF/DDIF	commentaire
Biais zénithal troposphérique	MZB	2.15	NDIF/DDIF	n paramètres par station
Horloge haute ou émetteur	MNG	2.10	NDIF	1 paramètre par satellite
Horloge récepteur	MNS	2.10	NDIF	1 paramètre par époque et par récepteur
Ambiguïté	MNA	2.10	NDIF	1 paramètre par passage
Ambiguïté double différence	MND	4.2 et 5.6	DDIF	1 paramètre par passage double différence
Coordonnées station	S(XYZ) S(PLH)	2.12	NDIF/DDIF	libérable sur l'arc ou par période, en x, y, z ou ϕ, λ, h
Paramètres de rotation (pole)	PX, PY	2.14	NDIF/DDIF	1 à 4 par jour
Paramètres de rotation UT1	PT		NDIF/DDIF	1 à 4 par jour
Paramètres de nutation	NE, NP		NDIF/DDIF	1 à 4 par jour

TAB. 6.4: Paramètres géométriques libérables dans GINS et affectant la mesure GPS.

6.7 Programme GINS90

Le programme *GINS90* calcule les quantités théoriques sur les observables non différenciées ou doubles différences iono-free, les résidus de mesure et les dérivées partielles des paramètres libérés (équation 2.19). GINS effectue plusieurs itérations entre lesquelles les paramètres de troposphère, les paramètres d'horloge et les ambiguïtés et l'ensemble des paramètres dynamiques en cas de restitution d'orbite sont ajustés, les quantités théoriques recalculées et certaines mesures éliminées sur des critères de seuil spécifiés par l'utilisateur. Dans le cas des mesures doubles différences il est possible d'activer ou non la résolution des ambiguïtés entières. GINS fait des itérations successives jusqu'à convergence des résidus de mesures. On obtient en sortie (si demandé) :

- un listing détaillé.
- une équation normale à convergence contenant l'ensemble des paramètres et prête à être manipulée par la chaîne DYNAMO.
- les orbites ajustées à convergence
- un fichier statistiques comprenant entre autre les résidus des mesures individuelles.
- un fichier horloges contenant les paramètres d'horloge à convergence (dans le cas d'une utilisation de la méthode locale).

La liste des paramètres de mesure et leur caractéristique est résumée dans le tableau 6.4.

Chapitre 7

Quelques cas pratiques

7.1 Horloges et orbites figées et traitement des données sol doubles différences

7.1.1 Généralités

Ce type de traitement concerne la restitution des positions des stations d'une ou plusieurs stations locales. Il a été utilisé pour effectuer des rattachement de coordonnées, le suivi du mouvement d'une station (sur plusieurs mois ou quelques heures) ou le suivi d'une bouée embarquant une antenne GPS (suivi de la surface de la mer ou d'un lac).

La caractéristique locale du réseau ne permet pas d'utiliser ces données pour recalculer les positions précises des satellites, on utilise alors le logiciel en mode "éphémérides figées" ; les coordonnées des centres de masse des satellites sont issues d'un traitement antérieur (on peut par exemple, utiliser les orbites de l'IGS). De plus on ne dispose pas toujours de suffisamment de stations dans le réseau pour résoudre les paramètres d'horloges des satellites hauts (Si on cherche à faire un rattachement, par exemple, on peut même utiliser uniquement deux stations : la station de référence et la station dont on cherche les coordonnées). Il est donc toujours préférable dans ce cas d'utiliser les mesures doubles différences qui permettent d'éliminer les paramètres d'horloge des satellites hauts.

La première étape consiste à disposer d'un fichier de stations contenant les coordonnées aussi précises que possibles des récepteurs du réseau dans le même système de référence (ITRF2000 ou ITRF2005 par exemple). Les données GPS (RINEX) des différentes stations subissent ensuite les étapes de pré-traitement suivant :

- Détection des sauts : cette étape s'exécute de manière individuelle sur chacune des stations en passant les fichiers par paquets de 1j ou 3j de données pour éviter le découpage des sauts en fin de journées (voir 6.3).
- On passe ensuite le prétraitement de mise en forme (PDGR90) en attachant le fichier stations et le fichier contenant les valeurs des décalages des horloges des satellites hauts. Ces horloges seront utilisées pour la datation des mesures, elles doivent donc être "absolues" et référencées par rapport au TAI (voir paragraphe 2.1). On peut utiliser à ce niveau les horloges BRDC (issues des éphémérides radiodiffusées). Cette étape forme un fichier contenant l'ensemble des données du réseau sur 1 ou 3 jours.

- Le fichier précédent sert d'entrée au programme de formation des doubles différences qui sont formées au mieux en utilisant l'algorithme décrit paragraphe 6.5. On obtient en sortie un fichier de mesures doubles différences découpé en passages d'ambiguïtés constantes, contenant les horloges et les numéros de station introduits au niveau de PDGR90.

L'ensemble de ces étapes peut être "automatisé" pour traiter les données du réseau sur plusieurs jours ou plusieurs mois.

On passe les programmes PREPARS et GINS en faisant attention à utiliser le même fichier station qu'au prétraitement et en spécifiant que l'on veut utiliser les mesures éphémérides figées. On peut aussi attacher un fichier de correction d'antenne. C'est à ce niveau que l'on spécifie l'ensemble des paramètres du traitement, à savoir les bruits a priori des mesures de phase, les critères d'élimination des données sur angle de site ou sur seuils de résidus, les modèles a priori de déplacement des stations (marées, loading atmosphérique, ...), le modèle de correction troposphérique, ainsi que la longueur des arcs. On choisit aussi le type et le nombre de paramètres ajustés à savoir le nombre de biais troposphériques, la résolution des ambiguïtés entières, les stations fixées ou libérées en spécifiant le type de libération (coordonnées géographiques ou cartésiennes) et le nombre de jeux de coordonnées estimés par jour (jusqu'à un jeu de coordonnées par minute).

A la fin de l'exécution du programme, on obtient le listing détaillé, ainsi qu'une équation normale à convergence contenant l'ensemble des paramètres libérés. Cette équation peut être manipulée par la chaîne d'inversion DYNAMO afin d'obtenir les solutions du système. Pour éviter de manipuler des équations normales contenant de nombreux paramètres, il est utile de scinder les traitements en lots de données en morceaux (un traitement de plusieurs mois sera par exemple découpé en jours ou semaines). Chaque traitement individuel produit une équation normale avec des paramètres communs et des paramètres de mesure (ambiguïtés, paramètres de troposphère,...) qui peuvent être réduits dans les équations individuelles avant sommation avec les autres matrices du traitement complet.

7.1.2 Exemple : Mouvement vertical de la station de La Rochelle

Un exemple de ce type d'application est l'observation de la surcharge océanique de la station la Rochelle sur une journée en utilisant comme point d'appui un sous réseau du réseau européen (voir figure 7.1). L'ensemble des stations du réseau sont fixées à part la station de la Rochelle dont les coordonnées sont libérées toutes les heures. On utilise un pas de mesure de 900 secondes (15 minutes). Différentes modélisations ont été réalisées pour quantifier l'impact de certaines corrections ; les différences entre les cas traités sont listées dans le tableau 7.1. Le cas de référence utilise les orbites IGS combinées avec les corrections d'antennes relatives. L'utilisation des corrections d'antennes absolues (Antex05) crée une incompatibilité avec les orbites IGS utilisées (voir annexe 9.7). Les orbites "GINS" sont, pour ce test, des orbites de qualité inférieures à celle de l'IGS (elles présentent des écarts de l'ordre de 15 cm 3D). Le nombre total d'ambiguïtés pour ce cas est de 544 pour l'ensemble du réseau (64 dans le cas "Mini"). Les détails du nombre de passages et de mesures retenues par ligne de base est listé dans le tableau 7.2 et les résidus sont présentés dans le tableau 7.3. Les résultats obtenus sont présentés en terme de mouvement vertical (1pt / heure) sur la figure 7.2 et dans le tableau 7.4. On observe un mouvement vertical de quelques centimètres dominé par la période semi-diurne pour

toutes les solutions. Les cas les plus dégradés sont ceux obtenus avec les orbites radio-diffusées (BRDC) ou un réseau réduit (Mini).

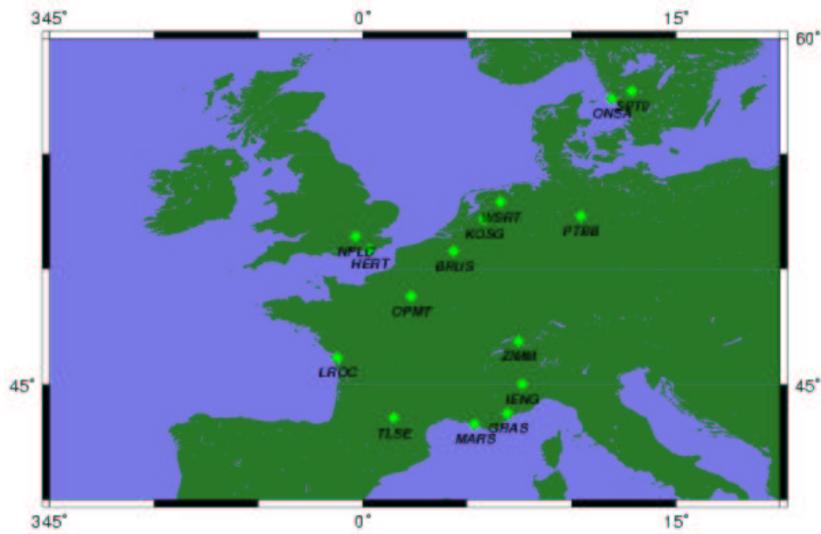


FIG. 7.1: Exemple de réseau local : observation des mouvements verticaux de la station de La Rochelle.

Nom traitement	Orbites hautes	Antennes	Divers
Référence	IGS	ANTEX01	Ambiguïtés fixées
GINs	GINs	ANTEX01	Ambiguïtés fixées
BRDC	BRDC	ANTEX01	Ambiguïtés fixées
Antex05	IGS	ANTEX05	Ambiguïtés fixées
N free	IGS	ANTEX01	Ambiguïtés réelles
Nomaps	IGS	-	Ambiguïtés fixées ; pas de correction d'antenne
Nopwu	IGS	ANTEX01	Ambiguïtés fixées ; pas de correction phase wind-up
Mini	IGS	ANTEX01	Ambiguïtés fixées ; seules 3 stations sont conservées (GRAS, LROC et BRUS)

TAB. 7.1: Caractéristiques des différents traitements effectués.

Base GPS	stations	longueur	nb mesures	passages	nb mesures par passages
4 3	LROC TLSE	358.965 km	437 mes.	29 pass.	15.1
5 4	MARS LROC	610.753 km	502 mes.	29 pass.	17.3
11 2	NPLD GRAS	1010.216 km	497 mes.	29 pass.	17.1
11 4	NPLD LROC	588.511 km	503 mes.	30 pass.	16.8
11 7	NPLD SPTO	1101.358 km	528 mes.	38 pass.	13.9
11 9	NPLD BRUS	336.200 km	507 mes.	33 pass.	15.4
11 10	NPLD HERT	77.565 km	424 mes.	26 pass.	16.3
12 1	KOSG OPMT	445.900 km	471 mes.	32 pass.	14.7
12 2	KOSG GRAS	939.513 km	17 mes.	11 pass.	1.5
12 3	KOSG TLSE	1009.926 km	7 mes.	3 pass.	2.3
12 4	KOSG LROC	841.712 km	9 mes.	5 pass.	1.8
12 5	KOSG MARS	989.108 km	6 mes.	3 pass.	2.0
12 6	KOSG ONSA	700.521 km	534 mes.	44 pass.	12.1
12 7	KOSG SPTO	764.077 km	40 mes.	18 pass.	2.2
12 8	KOSG IENG	807.337 km	344 mes.	26 pass.	13.2
12 9	KOSG BRUS	183.682 km	17 mes.	10 pass.	1.7
12 10	KOSG HERT	406.854 km	2 mes.	1 pass.	2.0
12 11	KOSG NPLD	432.275 km	548 mes.	48 pass.	11.4
13 11	WSRT NPLD	502.983 km	479 mes.	37 pass.	12.9
13 12	WSRT KOSG	98.074 km	20 mes.	9 pass.	2.2
14 12	ZIMM KOSG	601.455 km	531 mes.	50 pass.	10.6
15 12	PTBB KOSG	317.857 km	486 mes.	33 pass.	14.7

TAB. 7.2: Statistiques du traitement par ligne de base pour les 15 stations du réseau.

Nom traitement	Résidus (mm)	Nb mesures conservées	% d'ambi. fixées
Référence	9.4	5652	96.3
GINS	9.6	5096	94.6
BRDC	15.2	5651	69.4
Antex05	9.3	5646	96.5
N free	8.4	5645	-
Nomaps	9.6	5657	95.4
Nopwu	9.2	5645	95.7
Mini	11.2	851	98.4

TAB. 7.3: Résidus de phase pour les différents traitements.

Solution	max	moy. (mm)	Std (mm)
NOMAPS	3.9	0.9	1.6
NOPWU	6.2	-1.7	2.5
ANTEX05	7.4	-1.5	2.8
N FREE	12.2	0.1	9.3
Orb. 1.5	23.0	3.4	10.1
MINI	40.9	3.8	17.9
BRDC	41.7	13.0	18.9

TAB. 7.4: Statistiques des différences entre les mouvement verticaux observés et la référence correspondant aux courbes de la figure 7.2

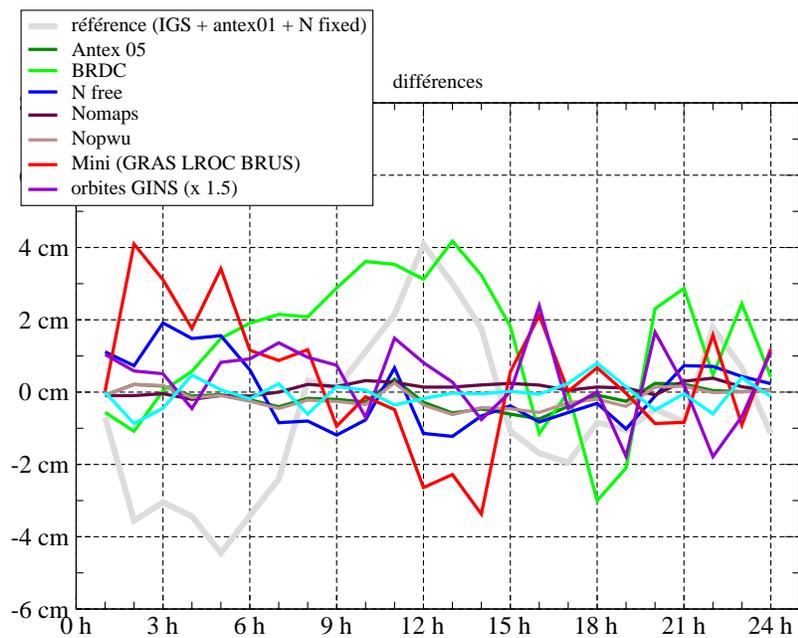
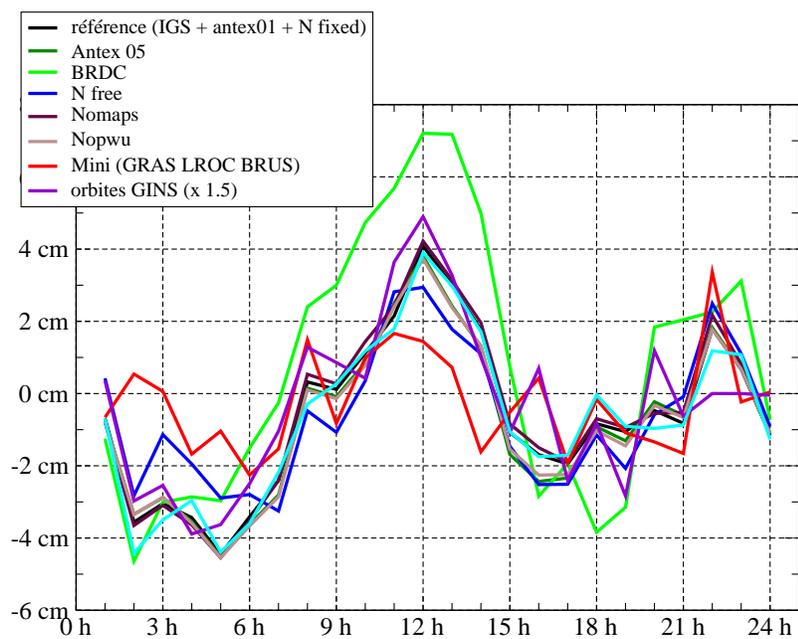


FIG. 7.2: En haut, mouvement vertical observé pour la station LROC, en fonction des différentes caractéristiques des traitements. En bas, différences par rapport au mouvement de référence représenté en grisé.

7.2 horloges et orbites figées et traitement des données embarquées

Ce type de traitement a été utilisé de manière intensive pour le suivi des orbites des satellites gravimétriques CHAMP et GRACE. Pour éviter de traiter les données des stations sol, on utilise dans ce cas des mesures non différenciées. Les orbites hautes sont figées ainsi que les décalages d'horloges des émetteurs : on doit donc disposer dans ce cas de jeux d'horloges absolus (pour la datation) et précis (pour la correction des mesures). Ces horloges, disponibles au pas des mesures (30 secondes) doivent être compatibles avec les orbites figées utilisées. Le prétraitement pour les données embarquées est similaire à celui des données sol à part quelques différences de réglages au niveau du programme de détection des sauts. On s'arrête ici à l'étape de mise en forme PDGR90 avant d'attaquer le logiciel de restitution GINS. Dans ce cas c'est l'ensemble de la modélisation du mouvement du satellite bas qui est spécifiée au niveau du programme. Les observables GPS utilisés sont les mesures de range et de phase dont on peut spécifier le bruit a priori et les critères d'élimination des mesures. Typiquement on traite dans ce cas des mesures à 30 secondes par arcs d'un jour avec des bruits a priori de 3.5 mm pour la phase et de 35 cm pour le range

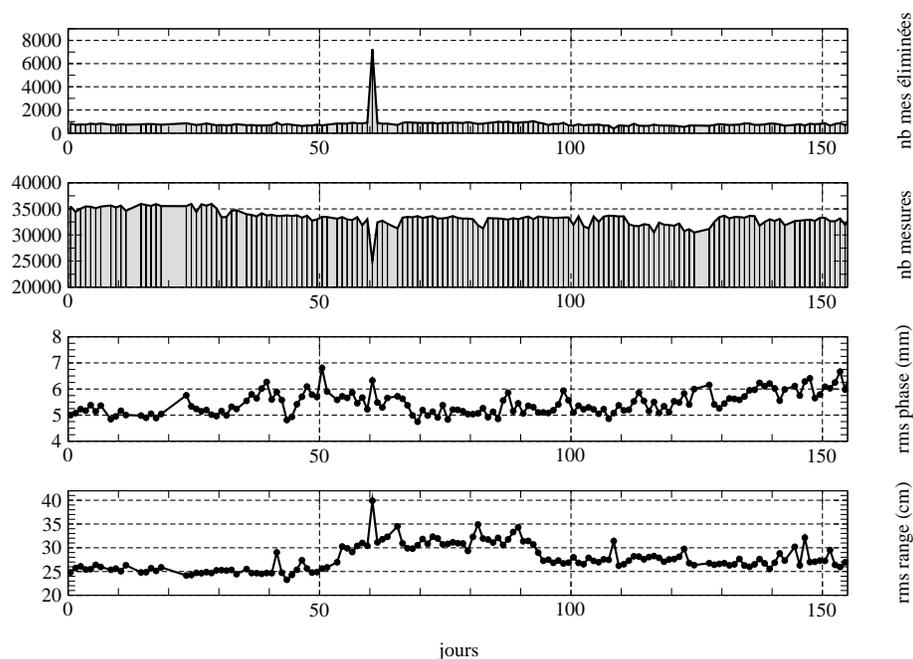


FIG. 7.3: De haut en bas, nombre de mesures éliminées, nombre de mesures conservées, résidus phase et résidus range pour le traitement diurne des mesures non différenciées des deux satellites GRACE. Dans ce cas, les horloges des deux récepteurs embarqués et les ambiguïtés non différenciées réelles sont les seuls paramètres de mesure estimés. Les anomalies (comme par exemple au jour 60) permettent de détecter les arcs à problèmes.

A titre d'exemple, le nombre typique de mesures par jour pour les deux satellites GRACE est de 30000 (pour un pas de 60 secondes), le nombre de mesures éliminées sur des critères

de seuil ou de site est de quelques milliers pour des résidus de phase compris entre 4.8 et 7 mm et des résidus de range autour de 30 cm (voir figure 7.3). On résout uniquement les paramètres d'horloges des récepteurs embarqués (1 horloge par époque et par satellite, soit 2880 paramètres par jour) ainsi que les ambiguïtés réelles par passage non différencié (typiquement 750 passages au total pour les deux satellites GRACE).

7.3 Restitution des orbites hautes

L'objet de ce type de traitement est la détermination simultanée des positions des satellites de la constellation GPS, des séries temporelles des coordonnées des stations et des paramètres de rotation de la Terre. Le traitement est effectué en routine depuis 2004 et délivre des produits similaires aux produits générés par les centre d'analyse de l'IGS : orbites précises des satellites de la constellation et équations normales contenant les dérivées partielles hebdomadaires des coordonnées des stations du réseau, ainsi que les paramètres de rotation de la Terre (1 point/6 heures).

La détermination des orbites précises implique de disposer d'un réseau global. Nous utilisons aujourd'hui environ 70 stations (voir figure 7.4). Les mesures sont ici sous échantillonnées avec un pas de 900 secondes et les arcs découpés en traitements de 2 jours (J-12h à J+1+12H). Le volume de mesures non différenciées pour ces arcs est supérieur à 120000 (Range et Phase confondues). On utilise le prétraitement sur 3 jours glissants (voir paragraphe 6.3). Le nombre total de paramètres est tel (tableau 7.5) qu'il est nécessaire de faire des réductions successives au cours du traitement jusqu'à l'obtention de matrices cumulées hebdomadaires. On ne conserve in fine que quelques milliers de paramètres par semaines.

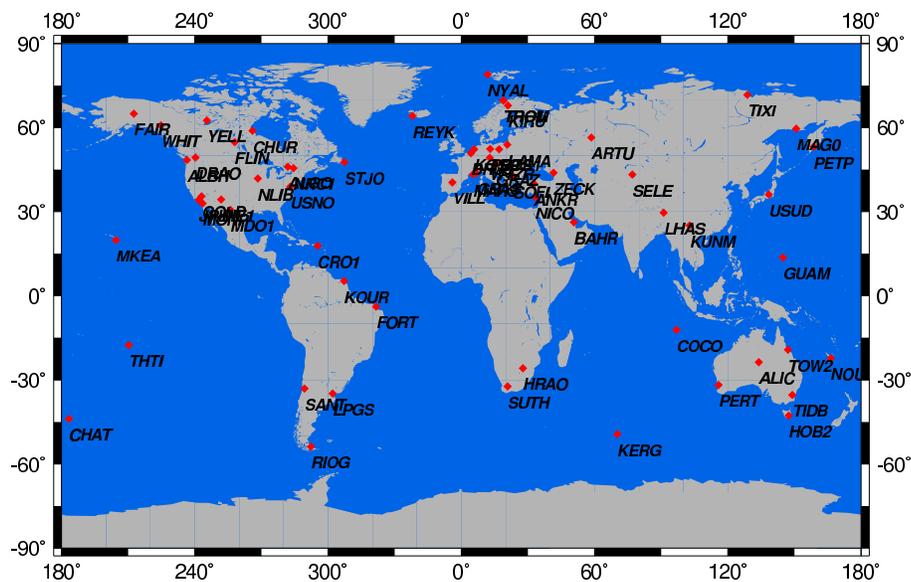


FIG. 7.4: Réseau de stations utilisé pour la restitution en routine des orbites de la constellation GPS.

Paramètres	description	nombre/arc	niveau de réduction
BY	biais (force empirique)	60	Avant cumul hebdomadaire
E{X,Y,Z}	position du satellite	90	Avant cumul hebdomadaire
E{X,Y,Z}P	vitesse du satellite	90	Avant cumul hebdomadaire
FS	coefficient global pour la pression solaire	300	Avant cumul hebdomadaire
MNS	paramètres d'horloges	$\simeq 17000$	Au cours du traitement (méthode locale ; voir partie 3)
MNA	ambiguïtés	$\simeq 4500$	Avant cumul hebdomadaire
MZB	biais troposphérique zénithal	1200	Avant cumul hebdomadaire
NX,NY	paramètres de nutation	10	Conservés
PT	écart UT1 à une époque donnée	5	Conservés
P{X,Y}	coordonnées du pôle	10	Conservés
S{X,Y,Z}	coordonnées d'une station	120	Conservés
Total		23385	

TAB. 7.5: Type et nombre de paramètres libérés pour les arcs de 2 jours

Chapitre 8

Références

- Beutler, G., E. Brockmann, W. Gurtner, U. Hugentobler, L. Mervart, and M. Rothacher (1994), Extended Orbit Modeling Techniques at the CODE Processing Center of the International GPS Service for Geodynamics (IGS) : Theory and Initial Results, *Manuscripta Geodaetica*, 19, pp. 367-386, April 1994.
- Blewitt, G. (1989), Carrier Phase ambiguity resolution for the global positioning system applied to geodetic baselines up to 2000 km. *J. of Geodesy Research* 94, pp 10187-10203.
- Blewitt, G. (1990), An automatic editing algorithm for GPS data, *Geophysical Research Letters*, 17 (3), pp. 199-202.
- Brockmann Elmar (thèse 1997), Combination of Solutions for Geodetic and Geodynamic Applications of the Global Positioning System, Vol. 55, *Geodatisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz (Suisse)*.
- Fliegel, H. F., T. E. Gallini, and E. R. Swift (1992), Global Positioning System Radiation Force Model for Geodetic Applications, *Geophysical Research Letters*, 97 (B1), pp. 559-568.
- Gao, Y. Lahaye, F. et al. (2001), Modeling and estimation of C1-P1 bias in GPS receivers, *Journal of Geodesy*, 74, pp 621-626, 2001.
- Gurtner, W. (1994), RINEX : The Receiver-Independent Exchange Format, *GPS World*, 5 (7), pp. 48-52, July 1994.
- Hugentobler, U., S. Shaer, P. Fridez (2001), *Bernese GPS Software Version 4.2*.
- Paul de Jonge, Tiberius, Ch., The LAMBDA method for integer ambiguity estimation : implementation aspects, August 1996, *Publications of the Delft Geodetic Computing Centre*, No 12.
- Kouba, J. (2003) "A Guide to using international GPS Services (IGS) Products". GSD, Ottawa, Ontario Canada, February 2003.
- Leick A., (1990) *GPS Satellite Surveying (Hardcover)*, John Wiley & Sons Inc, Ed.
- McCarthy, D.D. (1992), *IERS Standards (1992)*, IERS Technical Note 13, Observatoire de Paris, Paris, July 1992.
- McCarthy, D.D. (1996), *IERS Conventions (1996)*, IERS Technical Note 21, Observatoire de Paris, Paris, July 1996.

Melbourne, W. G. (1985), The Case for Ranging in GPS Based Geodetic Systems, in Proceedings 1st International Symposium on Precise Positioning with the Global Positioning System, edited by Clyde Goad, pp. 373-386, U.S. Department of Commerce, Rockville, Maryland.

Mervart, L. (thèse 1995), Ambiguity Resolution Techniques in Geodetic and Geodynamic Applications of the Global Positioning System, Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz, Band 53, Schweizerische Geodätische Kommission, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, Eidg. Technische Hochschule Zürich, Zürich.

Mervart, L., G. Beutler, and U. Wild (1994), Ambiguity Resolution Strategies using the Results of the International GPS Geodynamics Service (IGS), Bulletin Géodésique, 68, pp. 29-38.

Mervart, L., G. Beutler, M. Rothacher, and S. Schaer (1995), The Impact of Ambiguity Resolution on GPS Orbit Determination and on Global Geodynamics Studies, presented at the XXI. General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics, Boulder, Colorado, July 2-14, 1995.

Ray, R. D., D. J. Steinberg, B. F. Chao, and D. E. Cartwright (1994), Diurnal and Semidiurnal Variations in the Earth's Rotation Rate Induced by Oceanic Tides, Science, 264, pp. 830-832.

Rothacher, M. (1992), Orbits of satellite Systems in Space Geodesy, University of Berne, Berne, Switzerland.

Schaer, S. (1998), CODE's Global Ionosphere Maps (GIMs), voir le site de l'université de Bern (www.aiub.unibe.ch/ionosphere.html).

Schmid, R., M. Rothacher (2003), Estimation of elevation dependent satellite antenna phase center variations of GPS satellites, Journal of Geodesy, 77, pp. 440-446.

Springer, T.A. (1999), Modeling and Validating Orbits and Clocks Using the Global Positioning System, Ph.D. dissertation, Astronomical Institute, University of Berne, Berne, Switzerland, November 1999.

Springer, T.A. (1999), Beutler, G., M. Rothacher, Improving the orbit estimates of GPS satellites, Journal of geodesy (J. geod.) ISSN 0949-7714, vol. 73, no3, pp. 147-15.

Wu, J.T., Wu, S.C., Hajj G.A., Bertiger, W.I., Lichten S.M., Effects of antenna orientation on GPS carrier phase, manuscripta geodetica (1993), vol ; 18, pp. 91-98.

Wübbena, G. (1985), Software Developments for Geodetic Positioning with GPS Using TI 4100 Code and Carrier Measurements, in Proceedings First International Symposium on Precise Positioning with the Global Positioning System, edited by Clyde Goad, pp. 40, U.S. Department of Commerce, Rockville, Maryland.

Chapitre 9

Annexes

9.1 Annexe : Connaître la datation, oui,... mais avec quelle exactitude ?

L'exactitude de la datation de la mesure doit permettre de calculer la quantité théorique avec des erreurs négligeables par rapport au bruit de la mesure de phase.

En notant \tilde{t} la datation approchée et t la datation vraie ($\epsilon = |\tilde{t} - t|$), on obtient la condition suivante à partir de l'équation 1.5 :

$$|L(\tilde{t}) - L(t)| < \epsilon (c|d\tau/dt| + c|d\Delta tr/dt| + c|d\Delta te/dt|) \ll \sigma_L \quad (9.1)$$

Soit la condition sur ϵ :

$$\epsilon \ll \frac{\sigma_L}{(c|d\tau/dt| + c|d\Delta tr/dt| + c|d\Delta te/dt|)} \quad (9.2)$$

Les termes au dénominateur du membre de droite sont évalués ci dessous :

Dérive des horloges :

Depuis l'arrêt de la SA les dérives constatées des horloges des satellites GPS sont inférieures à la dizaine de nanosecondes par seconde soit $c|d\Delta te/dt| < qqs \text{ m/s}$

Les dérives des horloges station peuvent être plus importantes et atteindre $0.1 \mu s/secondes$ (voir figure 9.1) ce qui donne $c|d\Delta tr/dt| \approx 30m/s$. Ces valeurs peuvent être négligées devant le terme du au temps de trajet.

Variation du temps de trajet τ :

La variation du temps de trajet est dominée par la vitesse relative entre l'émetteur et le récepteur. Les vitesses typiques sont de 4 km/s pour les satellites GPS, 7 km/s pour les satellites en orbite basse et 500 m/s pour les récepteurs situés au sol (vitesse induite par la rotation terrestre). En prenant une vitesse maximale entre émetteur et récepteur de $v_{max} = 10 \text{ km/s}$, et un bruit de 1 mm pour la phase, on obtient une contrainte de

$$\epsilon \ll \sigma_L/v_{max} \approx 0.1\mu s$$

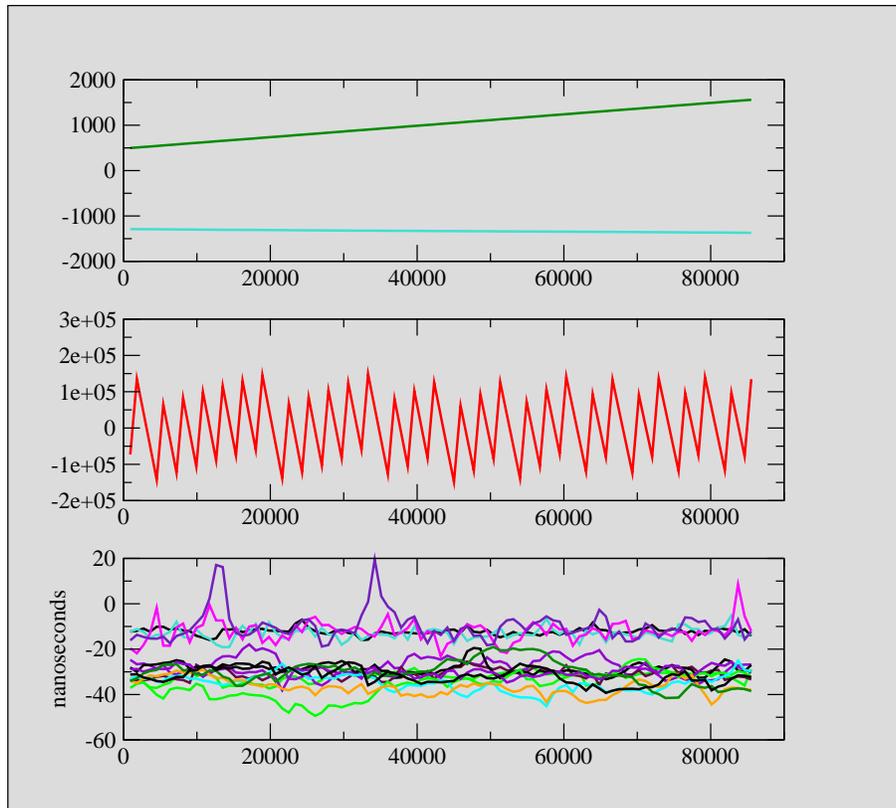


FIG. 9.1: Exemples de décalages d'horloges de stations GPS typiques observés sur une journée. En bas horloges calées sur le temps GPS, au milieu, horloges à recalage régulier (quelques 0.1 microseconde par secondes), en haut, dérives libres (de l'ordre de quelques centièmes de nanosecondes par secondes).

9.2 Annexe : Algorithme de formation des doubles différences :

9.2.1 Contraintes

Le programme de formation des doubles différences réalise un compromis entre différentes contraintes (a priori incompatible) :

- a. former de long passages de mesures ayant la même ambiguïté doubles différence.
- b. utiliser le plus de mesures non différenciées possibles parmi celles disponibles.
- c. générer des jeux de mesures indépendantes. Une mesure non différenciée pouvant a priori participer à plusieurs mesures doubles différences, on ne doit pas former des doubles différences qui seraient reliées entre elles par des combinaisons linéaires. Une mesure combinaison linéaire de plusieurs autres n'apporte aucune information supplémentaire et surtout cela pose des problèmes pour inverser plus tard la matrice de corrélation des mesures entre elles.
- d. la dernière contrainte est de faire cela dans un temps de calcul raisonnable même pour de gros réseaux de plusieurs centaines de stations.

En pratique, le nombre de jeux différents de doubles différences que l'on peut former à partir d'un ensemble de mesures non différenciées est tel qu'on ne peut pas explorer toutes les possibilités et choisir celle qui maximise la longueur des passages et le nombre de données non différenciées utilisées (points a. et b. ci dessus).

Les contraintes a. et b. ne sont toutefois pas indépendantes et l'algorithme suivant permet de former de longs passages en utilisant beaucoup de mesures non différenciées.

9.2.2 Choix des lignes de base et des couples de satellites retenus :

Le programme travaille essentiellement sur des tableaux logiques à trois dimensions (stations x satellites x époques) qui codent la présence ou non d'une mesure non différenciée. La formation des doubles différences se fait grâce à la manipulation de ces tableaux sans réellement former les observables. Les différences sont effectuées au moment de l'écriture des données. Une première étape consiste à compter l'ensemble des mesures doubles différences que l'on peut former à partir des données non différenciées de n stations pour chacune des $(n \times (n - 1)/2)$ lignes de base possibles. On parle ici de mesures "potentielles" car le choix définitif des lignes de base n'est pas encore arrêté. Les lignes de base sont triées dans l'ordre du plus de mesures potentielles au moins de mesures potentielles. Ensuite on applique l'algorithme suivant pour choisir les bases qui seront formées :

- on conserve la première base et la deuxième base de la liste
- si ces deux bases ont une station en commun, on leur affecte un numéro de famille identique, sinon deux numéros différents.
- pour chaque base, on teste si les deux stations appartiennent à des familles déjà reliées et 3 cas sont possibles :
 - 1 : les deux stations appartiennent à une même famille : on ne forme pas la base

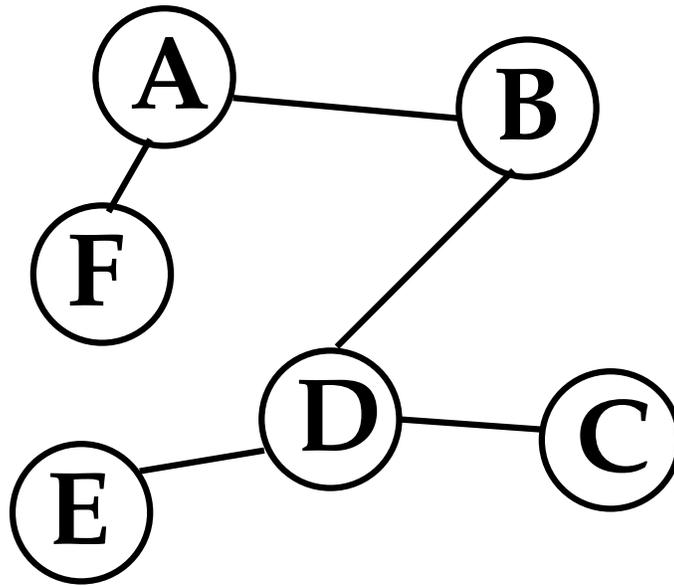


FIG. 9.2: Exemple de réseau formé par le programme *DOUBLE90*. L'algorithme de formation empêche à ce niveau la formation de E-F qui risquerait de créer des doubles différences non indépendantes.

- 2 : une des deux stations appartient à une famille, l'autre pas ou les deux n'appartiennent à aucune famille : on conserve la base et les deux stations reçoivent le numéro de la famille en question.
- 3 : les stations appartiennent à deux familles différentes : on conserve la base et l'ensemble des stations des deux familles reçoivent un numéro de famille commun (les familles sont reliées par la nouvelle ligne de base).

– on passe à la base suivante jusqu'à la fin de la liste

Au total on crée ainsi $(n - 1)$ lignes de bases parmi les $(n \times (n - 1)/2)$ possibles. Cet algorithme est partiellement inspiré du manuel du Bernese software (version 4.2, chapter 10). Le processus décrit ci-dessus garantit que toutes les stations font partie d'au moins une ligne de base conservée. De plus, toutes les stations sont reliées au même réseau (voir l'exemple de la figure 9.2).

Une fois que les bases de stations sont choisies, on cherche au sein de chaque ligne de base les couples de satellites à former. L'algorithme de choix des couples est similaire à celui des stations décrit ci-dessus : tri des couples de satellites qui forment le plus de doubles différences puis ajout de $(n_{sat} - 1)$ couples de satellites indépendants au jeu des doubles différences à former.

Après ces deux étapes, on identifie (via les tableaux logiques) les mesures non différenciées qui n'ont pas été encore utilisées. Comme il est coûteux de vérifier la non redondance des mesures, on réinjecte simplement les mesures d'une station dans l'ensemble des mesures non différenciées inutilisées (on rajoute celle qui forme le plus de doubles avec les mesures restantes). Puis on relance les deux premières étapes sur ce jeu restant.

A ce niveau, les bases de stations et les couples de satellites ont été choisis et on peut former les doubles différences effectivement et écrire le fichier de sortie.

Un exemple de sortie de *DOUBLE90* est donné dans le tableau 9.1 (pour le premier jeu) et le tableau 9.2 (pour le deuxième jeu). Au total (pour cet exemple) seulement 3700 mesures non différenciées sur 37445 n'ont pas été utilisées et les taux typiques sont habituellement autour de 90 – 95% des mesures non différenciées utilisées. Pour augmenter le taux de mesures utilisées il serait dès lors plus opportun de rajouter une station dans le lot initial que de complexifier d'avantage l'algorithme de formation des doubles différences.

bases formées pour 57 stations ; 37445 Non diiférentiées								
Bases	Numéros		nobs	Noms des stations		longueur ligne de base		
Base :	12	52	4040814	4013610	721	FAIR	WHIT	780.2 km
Base :	52	54	4013610	4012717	718	WHIT	YELL	1110.9 km
Base :	8	13	4012815	4013511	713	CHUR	FLIN	658.3 km
Base :	8	54	4012815	4012717	702	CHUR	YELL	1183.2 km
Base :	38	53	1410607	1420108	699	POTS	WTZR	360.1 km
Base :	28	36	1235403	1235504	691	MAG0	PETP	870.1 km
Base :	1	11	4012926	4010520	688	ALBH	DRAO	301.8 km
Base :	17	46	5011608	5010312	685	HOB2	TIDB	832.3 km
Base :	2	34	4010419	4011410	682	ALGO	NRC1	198.6 km
Base :	22	38	1350410	1410607	682	KOSG	POTS	495.4 km
Base :	25	38	1220906	1410607	682	LAMA	POTS	535.6 km
Base :	28	47	1235403	1236004	677	MAG0	TIXI	1656.4 km
Base :	11	13	4010520	4013511	667	DRAO	FLIN	1344.8 km
Base :	25	56	1220906	1233005	649	LAMA	ZWEN	1050.5 km
Base :	4	56	1236203	1233005	646	ARTU	ZWEN	1352.2 km
Base :	21	56	1040307	1233005	645	KIRU	ZWEN	1576.3 km
Base :	46	48	5010312	5014005	643	TIDB	TOW2	1791.5 km
Base :	34	49	4011410	4045110	639	NRC1	USNO	735.2 km
Base :	22	51	1350410	1340607	623	KOSG	VILL	1499.2 km
Base :	11	15	4010520	4040510	622	DRAO	GOLD	1556.1 km
Base :	21	47	1040307	1236004	618	KIRU	TIXI	3589.5 km
Base :	8	34	4012815	4011410	615	CHUR	NRC1	1926.7 km
Base :	12	47	4040814	1236004	609	FAIR	TIXI	3201.2 km
Base :	15	31	4040510	4049726	607	GOLD	MONP	284.3 km
Base :	34	44	4011410	4010125	604	NRC1	STJO	1764.4 km
Base :	6	22	1310113	1350410	601	BRUS	KOSG	183.7 km
Base :	55	56	1235103	1233005	598	ZECK	ZWEN	1366.0 km
Base :	32	55	1430207	1235103	579	NICO	ZECK	1187.0 km
Base :	38	43	1410607	1110106	576	POTS	SOFI	1336.1 km
Base :	9	35	5012706	5013306	575	COCO	PERT	2894.4 km
Base :	5	55	2490103	1235103	574	BAHR	ZECK	2105.0 km
Base :	36	50	1235504	2172913	573	PETP	USUD	2442.2 km
Base :	15	19	4040510	4040034	570	GOLD	JPLM	179.3 km
Base :	18	45	3030209	3031403	558	HRAO	SUTH	981.2 km
Base :	21	39	1040307	1020208	557	KIRU	REYK	1942.6 km
Base :	16	50	5050107	2172913	549	GUAM	USUD	2563.3 km
Base :	17	35	5011608	5013306	539	HOB2	PERT	3001.0 km
Base :	15	37	4040510	4045603	528	GOLD	PIE1	811.0 km
Base :	15	29	4040510	4044203	521	GOLD	MDO1	1309.1 km
Base :	33	34	4046503	4011410	518	NLIB	NRC1	1345.9 km
Base :	4	42	1236203	1235203	512	ARTU	SELE	1964.1 km
Base :	16	48	5050107	5014005	507	GUAM	TOW2	3592.4 km
Base :	10	23	4320109	9730110	505	CRO1	KOUR	1879.1 km
Base :	10	49	4320109	4045110	505	CRO1	USNO	2620.3 km
Base :	7	17	5020703	5011608	496	CHAT	HOB2	2871.8 km
Base :	5	26	2490103	2161308	492	BAHR	LHAS	3920.8 km
Base :	15	30	4040510	4047707	487	GOLD	MKEA	4076.6 km
Base :	24	26	2160903	2161308	464	KUNM	LHAS	1263.2 km
Base :	9	20	5012706	9120104	456	COCO	KERG	4677.6 km
Base :	40	41	4150703	4170518	433	RIOG	SANT	2291.8 km
Base :	23	41	9730110	4170518	426	KOUR	SANT	4546.8 km
Base :	20	45	9120104	3031403	422	KERG	SUTH	4385.8 km
Base :	27	41	4151005	4170518	376	LPGS	SANT	1189.8 km
Base :	14	23	4160203	9730110	365	FORT	KOUR	1884.1 km
Base :	3	48	5013706	5014005	322	ALIC	TOW2	1445.5 km

il reste 4132 non différenciées non utilisées

TAB. 9.1: Exemple de sortie de *DOUBLE90* ; les 56 lignes de bases formées au premier passage.

Bases	Numéros		nobs	Noms des stations		longueur ligne de base	
on remet KIRU, il reste 4132 non différenciées non utilisées							
Base :	9	21	5012706	1040307	145	COCO KIRU	9461.7 km
Base :	21	44	1040307	4010125	138	KIRU STJO	4468.6 km
Base :	4	21	1236203	1040307	75	ARTU KIRU	2270.7 km
Base :	21	22	1040307	1350410	66	KIRU KOSG	1921.0 km
Base :	21	51	1040307	1340607	66	KIRU VILL	3364.2 km
Base :	6	51	1310113	1340607	63	BRUS VILL	1316.6 km
Base :	21	39	1040307	1020208	63	KIRU REYK	1942.6 km
Base :	21	53	1040307	1420108	63	KIRU WTZR	2123.0 km
Base :	21	32	1040307	1430207	53	KIRU NICO	3671.9 km
Base :	21	43	1040307	1110106	53	KIRU SOFI	2797.7 km
Base :	21	50	1040307	2172913	51	KIRU USUD	6961.9 km
Base :	21	42	1040307	1235203	47	KIRU SELE	4165.8 km
Base :	2	21	4010419	1040307	44	ALGO KIRU	5537.3 km
Base :	44	49	4010125	4045110	30	STJO USNO	2179.2 km
Base :	40	41	4150703	4170518	21	RIOG SANT	2291.8 km
Base :	21	26	1040307	2161308	19	KIRU LHAS	5921.7 km
il reste 3700 non différenciées non utilisées							

TAB. 9.2: Exemple de sortie de *DOUBLE90* ; les 16 lignes de bases (non redondantes) formées au deuxième passage.

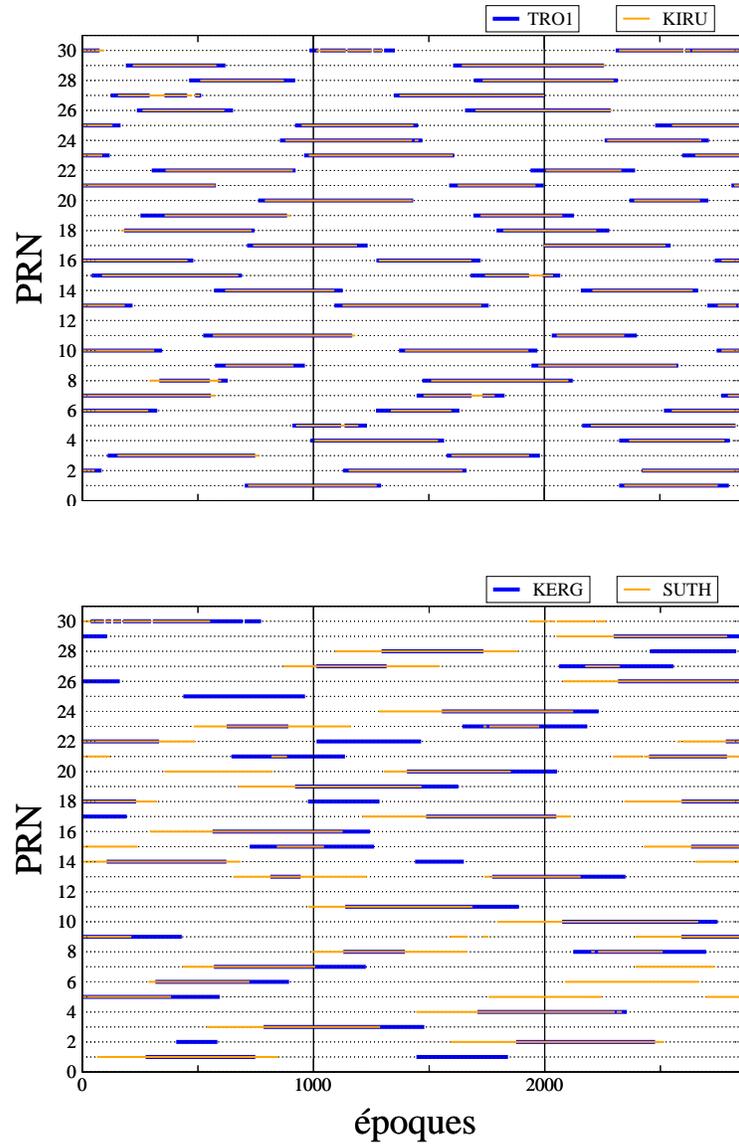


FIG. 9.3: Deux exemples de bases formées. Les segments colorés bleus et oranges indiquent la présence de données pour l'époque et la station concernée. En haut, passages d'une des premières lignes de bases choisies ($l = 217 \text{ km}$), en bas passages d'une des dernières ligne de base choisie par le programme de formation ($l = 4386 \text{ km}$)

9.3 Annexe : Résolution des ambiguïtés wide-lane

Cet algorithme est implémenté au niveau du programme *DOUBLE90*.

On utilise l'équation (5.4) rappelée ci dessous :

$$L_5 - P_5 = 1/(f_1 - f_2)(f_1 L_1 - f_2 L_2) - 1/(f_1 + f_2)(f_1 P_1 + f_2 P_2) = \lambda_5 N_5 \quad (9.3)$$

Cette équation est formée par passages de doubles différences et on résout l'ambiguïté "wide-lane" pour les n doubles différences du passage selon :

$$WL_5 = \left\langle \frac{L_5 - P_5}{\lambda_5} \right\rangle_{i=1,n}$$

$$\tilde{N}_5 = \text{nint}(WL_5) \quad (9.4)$$

$$\sigma_5 = \sqrt{\frac{1}{n} \langle (L_5 - P_5 - \lambda_5 \tilde{N}_5)^2 \rangle_{i=1,n}}$$

Si σ_5 est < 0.1 et si un entier est présent dans l'intervalle $[WL_5 - 0.3\sigma_5, WL_5 + 0.3\sigma_5]$, on corrige les observations de l'ambiguïté \tilde{N}_5 .

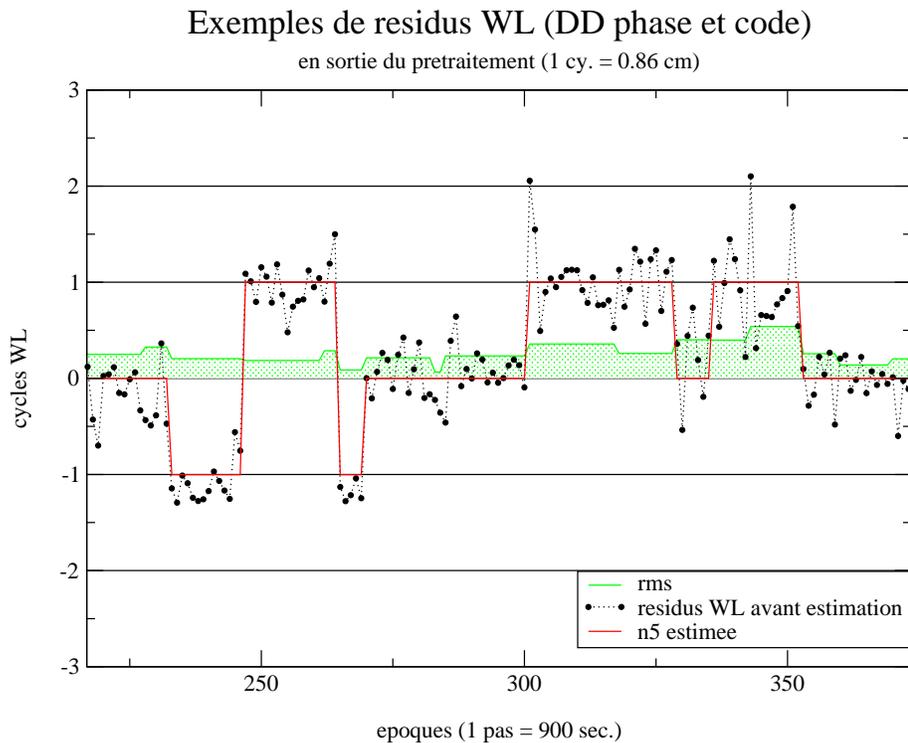


FIG. 9.4: Exemples de résidus Wide-lane (combinaison Melbourne-Wubben) et ambiguïtés estimées.

Un exemple de résolution est donné sur la figure (9.4) et un exemple de résidus avant et après estimation est donné sous forme d'histogrammes sur la figure (9.5).

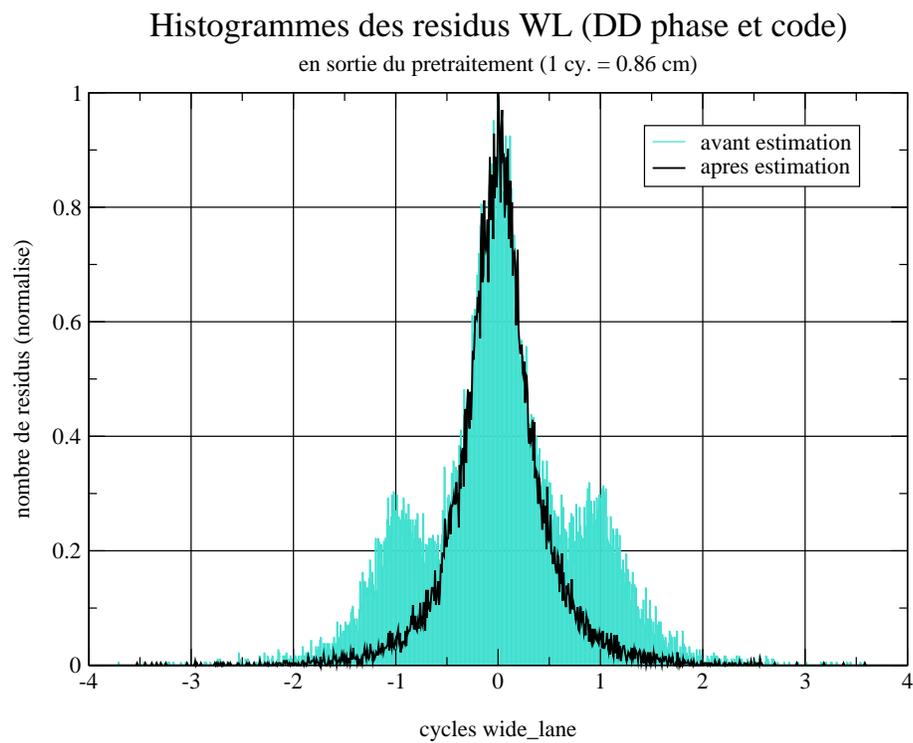


FIG. 9.5: Distribution des résidus Wide-lane avant et après estimation des ambiguïtés.

9.4 Annexe : Inversion par blocs

On cherche ici l'inverse de la matrice :

$$N(n \times n) = \left(\begin{array}{c|c} A & X^t \\ \hline X & B \end{array} \right)$$

Si A est inversible, on peut réécrire N selon :

$$N = \left(\begin{array}{c|c} I & 0 \\ \hline XA^{-1} & I \end{array} \right) \cdot \left(\begin{array}{c|c} A & 0 \\ \hline 0 & B - XA^{-1}X^t \end{array} \right) \cdot \left(\begin{array}{c|c} I & A^{-1}X^t \\ \hline 0 & I \end{array} \right)$$

qui s'inverse maintenant immédiatement, en notant $K = B - XA^{-1}X^t$, selon :

$$N^{-1} = \left(\begin{array}{c|c} I & -A^{-1}X^t \\ \hline 0 & I \end{array} \right) \cdot \left(\begin{array}{c|c} A^{-1} & 0 \\ \hline 0 & K^{-1} \end{array} \right) \cdot \left(\begin{array}{c|c} I & 0 \\ \hline -XA^{-1} & I \end{array} \right)$$

On obtient finalement :

$$N^{-1} = \left(\begin{array}{c|c} A^{-1} + A^{-1}X^tK^{-1}XA^{-1} & -A^{-1}X^tK^{-1} \\ \hline -K^{-1}XA^{-1} & K^{-1} \end{array} \right)$$

9.5 Annexe : Inverse d'un sous bloc d'une matrice à partir de l'inverse de la matrice complète

Soit :

$$N = \left(\begin{array}{c|c} N_{11} & N_{21}^t \\ \hline N_{21} & N_{22} \end{array} \right)$$

En posant $K = N_{22} - N_{21}N_{11}^{-1}N_{21}^t$ et si N_{11} et K , inversibles, on a (Annexe 9.4) :

$$N^{-1} = M = \left(\begin{array}{c|c} N_{11}^{-1} + N_{11}^{-1}N_{21}^t K^{-1}N_{21}N_{11}^{-1} & -N_{11}^{-1}N_{21}^t K^{-1} \\ \hline -K^{-1}N_{21}N_{11}^{-1} & K^{-1} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c|c} M_{11} & M_{21}^t \\ \hline M_{21} & M_{22} \end{array} \right)$$

on peut donc écrire :

$$\begin{aligned} M_{11} &= N_{11}^{-1} + N_{11}^{-1}N_{21}^t K^{-1}N_{21}N_{11}^{-1} \\ &= N_{11}^{-1} + (N_{11}^{-1}N_{21}^t K^{-1})(K K^{-1})N_{21}N_{11}^{-1} \\ &= N_{11}^{-1} + (N_{11}^{-1}N_{21}^t K^{-1})K(K^{-1}N_{21}N_{11}^{-1}) \\ &= N_{11}^{-1} + M_{21}^t K M_{21} \end{aligned}$$

d'où finalement :

$$N_{11}^{-1} = M_{11} - M_{21}^t M_{22}^{-1} M_{21}$$

Cette formule relie l'inverse du bloc N_{11} aux blocs de $N^{-1} = M$. Elle peut être utilisée pour obtenir la matrice inverse d'un système auquel on a enlevé des inconnues.

Remarque : Si $M_{22} = K^{-1} = 1/k$ est de taille 1 (k non nul), on a simplement :

$$\begin{array}{ccc} N_{11}^{-1} & = & M_{11} \quad -\frac{1}{k} M_{21}^t \quad M_{21} \\ (n-1) \times (n-1) & & (n-1) \times (n-1) \quad (n-1) \times 1 \quad 1 \times (n-1) \end{array}$$

9.6 Annexe : Solutions d'un système inverse avec des inconnues fixées à partir des solutions du système complet

Si on part du système d'équations normales :

$$N \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \end{pmatrix}$$

de matrice inverse (voir annexe 9.4) :

$$M = N^{-1} = \left(\begin{array}{c|c} M_{11} & M_{21}^t \\ \hline M_{21} & M_{22} \end{array} \right)$$

de solution :

$$\begin{aligned} b_1 &= M_{11}d_1 + M_{21}^t d_2 \\ \text{et } b_2 &= M_{21}d_1 + M_{22}d_2 \end{aligned}$$

et que l'on impose b_{20} comme solution pour les paramètres a à la place de b_2 , la nouvelle solution \tilde{b}_1 pour les paramètres restants sera donnée par :

$$\tilde{b}_1 = N_{11}^{-1} \tilde{d}_1 = N_{11}^{-1} (d_1 - N_{21}^t b_{20}) = (M_{11} - M_{21}^t M_{22}^{-1} M_{21}) (d_1 - N_{21}^t b_{20})$$

On a aussi plusieurs expressions possibles pour la nouvelle solution, dont :

$$\tilde{b}_1 = N_{11}^{-1} d_1 - N_{11}^{-1} N_{21}^t b_{20} = N_{11}^{-1} d_1 + M_{21}^t K b_{20}$$

soit :

$$\tilde{b}_1 = N_{11}^{-1} d_1 + M_{21}^t M_{22}^{-1} b_{20}$$

et encore :

$$\tilde{b}_1 = b_1 + M_{21}^t M_{22}^{-1} (b_{20} - b_2)$$

Cette dernière expression, qui est codée dans GINS pour la méthode de fixation des ambiguïtés entières, permet d'obtenir la nouvelle solution sans recalculer explicitement le second membre \tilde{d}_1 et en se servant uniquement des éléments de la matrice inverse $M = N^{-1}$, de l'inverse du sous bloc M_{22} de cette matrice et des écarts $(b_{20} - b_2)$ à appliquer à la solution libre pour les p paramètres que l'on veut fixer.

9.7 Annexe : IGSMAIL-5189 : Planned changes to IGS antenna calibrations

IGS Electronic Mail 17 Aug 04 :28 :19 PDT 2005 Message Number 5189

Author : Gerd Gendt and Ralf Schmid

This message is to alert users of pending changes that will profoundly affect IGS products. The changes concern the conventions for handling phase corrections due to antenna effects. The related activities go back to the 2002 IGS Workshop in Ottawa [Rothacher and Mader, 2003] and were put into concrete recommendations during the Workshop in Berne last year [Schmid et al., 2005a]. Even data analysts who do not use IGS products directly should be aware of these developments and should consider what changes, if any, are appropriate in their own procedures.

Background

Early in the era of GPS geodesy it was appreciated that the phase response of GPS tracking antennas does not correspond to an ideal point source. That is, with respect to a fixed reference point within the antenna, the signal wavefronts of constant phase do not form perfectly hemispherical shells. Instead, the phase can vary depending on viewing direction (elevation and azimuth angles toward the satellite being observed). Since most high-quality antennas are manufactured to tight physical specifications, the variations between different models are generally much larger than among different replicas of the same model. For the highest quality of geodetic results, it is therefore necessary to account for these antenna effects in the data analysis based on antenna type. Otherwise errors of up to several cm can occur in estimates of the antenna position.

Relative antenna corrections

Despite this realization, the application of antenna phase center corrections measured in anechoic chambers [e.g., Schupler et al., 1994] was found to give a global GPS frame differing from VLBI and SLR in scale by about 15 ppb, equivalent to a global height shift of 10 cm. (Note that a +1 ppb change of the terrestrial scale corresponds to a uniform height shift of +6.4 mm.) This was considered an unreasonably large discrepancy, considering the good agreement between VLBI and SLR, so the chamber measurements were not adopted for general use.

Nevertheless as new antenna types joined the IGS network, which was initially dominated by the AOA Dorne-Margolin choke ring models, it became necessary to somehow account for differences in the phase responses. After extensive discussions, it was agreed at the IGS Analysis Center Workshop held at Silver Spring (19-21 March 1996) that relative phase center corrections would be applied by 30 June 1996. The corrections were to be determined using short-baseline field measurements wherein the "AOAD/M_T" antenna was taken to be the defining standard [Mader, 1999]. For each antenna model, a NEU offset value was adopted for the mean location of the antenna electrical reference center compared to the external, physical, antenna reference point (ARP). Relative to this mean phase center, the antenna phase center variations (PCVs) were then measured as a function of elevation angle. Using this method the elevation range for PCVs has been limited to 10 degrees due to ground noise. The results have been maintained since that time for IGS and general use in the file :

ftp://igs.cb.jpl.nasa.gov/igs/scb/station/general/igs_01.pcv

As new antenna models have become available, new calibration measurements have been added to the file before the antenna could be included in the IGS network.

It was generally recognized that the approach of using relative antenna calibrations was an expedient made necessary to avoid cm-level errors, but it was not a complete or permanent solution. For one thing, the relative calibration measurements are really valid only for short baselines. Even for the same antenna model, on long baselines a satellite is viewed from markedly different elevation angles so the relative PCVs are not adequate [Mader, 1999]. Furthermore, the discrepancy in the GPS frame scale must ultimately be understood and addressed. Note that even with the relative PCVs the current IGS terrestrial frame is smaller than ITRF2000 (before rescaling) by nearly 3 ppb (see the weekly IGS SINEX combination reports by R. Ferland) and that the scale of the GPS frame has varied with time by more than 1 ppb in 2000 [Ge et. al., 2005].

Absolute antenna corrections

It was suggested by several people that neglect of any non-ideal effects in the satellite antennas might explain the apparent failure of chamber PCVs. Since it has not been feasible to measure independently the satellite antenna characteristics very accurately [Mader and Czopek, 2002], those properties must be determined from the GPS data together with other usual geodetic parameters. Springer [2000] was the first to demonstrate quantitatively the difficulties of the problem due to very high correlations among tracking antenna offsets and PCVs, satellite antenna offsets and PCVs, estimated station heights, and estimated tropospheric parameters. Due to these correlations, the general problem is singular. A solution is possible if the terrestrial frame scale is fixed by adopting a set of fiducial coordinates for the tracking network and if the "absolute" phase center corrections (offsets and PCVs) for the tracking antennas are known from external calibration measurements. Meanwhile there exist absolute offsets and PCVs determined by a robotic system developed by the University of Hannover and the company Geo++ [Menge et al., 1998], which include azimuthal values and elevations down to 0 degrees. PCVs for those tracking antennas not measured by the robotic system have been inferred using the prior relative PCVs together with the absolute patterns for the AOAD/M_T antenna. These inferred patterns are still only valid to elevation angles of 10 degrees.

Schmid and Rothacher [2003] demonstrated that it is possible to determine satellite antenna offsets and PCVs if the absolute tracking antenna models and the station coordinates in ITRF2000 are fixed. The results have been independently validated by GFZ Potsdam [Ge and Gendt, 2005].

Recently, for the derivation of the 'official' IGS satellite antenna models (PCVs and offsets) 11 years of data were reprocessed by TUM and GFZ while aligning the solutions to IGB00. The solutions for the satellite offsets have a trend, which is caused by an error in the vertical rate of the IGB00 (1 mm/y). Referencing the offsets to a given epoch (2000.0 in the antenna model) will stabilize the scale in the GPS network solutions. Tests with the new model have shown that the IGB00 has a scale rate of 0.15 ppb/y compared to the new solutions, which is consistent with the reported vertical rate error of IGB00.

So, a complete and consistent set of absolute PCVs for both tracking and satellite antennas has been assembled. A test version of this set is available in the file (see IGS Mails #5149, #5187) :

ftp://igscb.jpl.nasa.gov/igscb/station/general/pcv_proposed/igs_05.atx

The file contains in total :

- 106 antenna calibrations, where
 - 14 are from Geo++ (elevation and azimuth, robot calibrated)
 - 16 with identical construction are copied from the above 14
 - 76 are from NGS (elevation only, converted form relative model)
- 45 antenna and radome calibrations
 - 10 are from Geo++ (elevation and azimuth, robot calibrated)
 - 35 are from NGS (elevation only, converted form relative model)

Among the 40 antennas possessing full calibration models (azimuthal PCVs and elevations down to 0 degrees) from robot calibrations are most of the antennas dominating the IGS tracking network. Converted relative calibrations have mainly been added for reasons of completeness and in order to facilitate the use of the file outside the IGS.

Note that there are several important differences involved in implementing the new absolute patterns :

* The organization of the calibration information now uses the "ANTEX" format, which is documented at :

ftp://igscb.jpl.nasa.gov/igscb/station/general/antex13.txt

The old format did not allow for satellite antenna corrections nor azimuthal variations.

* Absolute PCVs can be reported as functions of azimuth as well as elevation.

* Robotic PCVs are measured down to 0 degrees elevation, whereas the relative PCVs (and absolute PCVs derived from them) usually extend only to 10 degrees.

* Absolute PCVs and phase offsets are reported for individual satellites. The PCV values are the same for all satellites within each block type, which are tabulated in the file :

ftp://igscb.jpl.nasa.gov/igscb/station/general/rcvr_ant.tab

However, the z-offsets (in the direction from the satellite center of mass toward the Earth's center) are satellite-specific.

* The IGS satellite block designations generally match those of the GPS operators, except note that the Block IIR group is divided into IIR-A (first eight satellites) and IIR-B (the next four launches : SVN 47, 59-61). There was apparently a redesign of the antenna array. It is expected that the next launch, of the first "modernized" IIR-M satellite, will start a new IIR group.

Under no circumstances should users mix absolute and relative PCVs ! Moreover, absolute PCVs require corrections for both satellites and tracking antennas simultaneously !

Implementation issues for absolute PCVs and handling radomes

Based on the work summarized above, sessions at the IGS 2002 "Towards Real-Time" Workshop, held in Ottawa (8-11 April 2002), and the IGS 2004 Workshop and Symposium, held in Berne (1-5 March 2004), were devoted to issues surrounding implementation of absolute PCVs. Important background information is summarized in the position papers from these two meetings : see Rothacher and Mader [2003] available in : http://igscb.jpl.nasa.gov/igscb/resource/pubs/02_ott/session_8.pdf and Schmid et al. [2005a] available in : http://igscb.jpl.nasa.gov/igscb/resource/pubs/04_rtberne/Session10_1.pdf

The IGS Analysis Centers (ACs) are currently in a test phase of using the absolute antenna PCV corrections in parallel, unofficial solutions.

Associated with adoption of the absolute PCVs, the handling of antenna radomes has also been modified :

- * PCVs for antenna + radome pairs will be used, where measured. The effect of radomes was more or less ignored in IGS relative PCVs (some ACs are using the NGS relative antenna+radome calibrations presented in igs_01.pcv). This change can cause apparent station height differences up to several cm. In many cases, suitable radome measurements do not exist ; for those, the radome effects will continue to be ignored for the remaining life of that pair.

- * Any new antenna + radome pair must have calibration measurements before it can be used in the IGS network.

- * Position information for a station not having a calibrated antenna + radome pair should be used with care. Vectors to nearby physical points, including co-located techniques, can have errors up to several cm. Replacement of antenna equipment can lead to discontinuities at a similar level.

- * All station operators are urged to avoid using radomes unless absolutely essential. If used in the future, radomes must be of a type suitable for calibration and calibration measurements must be performed before IGS use ; see :

<http://igsb.jpl.nasa.gov/network/guidelines/guidelines.html#allstrict>

Schedule for IGS changes

If current tests are successful, the IGS plans to implement operationally the absolute antenna PCVs for tracking and satellite antennas on 1 January 2006 [the final date will be decided after the evaluation of the AC parallel tests]. The appropriate ANTEX file will be announced beforehand, but it will be quite similar to igs_05.atx.

Summary of expected effects of IGS PCV changes

- * TRF scale – Because the IGS terrestrial frame products have always been rescaled to match ITRF, there should be minimal impact in this respect except that the unscaled GPS frame solutions should be much closer to ITRF and should be more stable over time [Ge et al., 2005].

- * TRF distortions – The relative positions of the stations within the IGS frame will change, in general. The changes will probably be largest for those stations with calibrated antenna + radome combinations. Because of this, such stations will probably have to be removed from the IGS set of reference frame stations. Smaller shifts will be seen due to using azimuthal PCV corrections in some cases.

- * New IGS00 realization – For the reasons above, the IGB00 realization of ITRF2000 will no longer be suitable. A new version and revised set of reference stations will be needed.

- * Troposphere estimates – Due to the correlations between antenna PCVs and the zenith troposphere delay estimates, the latter values will likely change by noticeable amounts. Biases between GPS estimates and those of VLBI or water vapor radiometers should be considerably reduced [Schmid et al., 2005b].

- * Orbits – Because the scale of the satellite orbits is not very sensitive to the TRF scale (being largely determined through Kepler's 3rd law), there should be no major effects on the satellite orbits. Some positional changes, at the quoted noise level, will likely occur however. (Comment : Some satellites such as PRN28 and PRN03 will be more affected, because they have large Z-offsets from the nominal values. For instance, the MIT absolute model orbits for these satellites are much closer to the current IGS orbits than are the

(official) relative model solutions, MIT uses a loose radiation model which allows these offsets to have a large effect due to high correlations.).

* Clocks – Any effects on satellite or station clocks should probably appear minor compared to the quoted noise levels. However, the systematic effect of the TRF scale change will be inherent in the new clocks.

* Long-term continuity – A discontinuity should be expected for all IGS product time series on 1 January 2006 (TBC), when the new absolute PCVs are implemented. For this reason (and others), the IGS plans a complete reanalysis of all historic GPS data ; see IGS Mail #5174. Only when the reanalysis results are available and incorporated into a future version of ITRF will the fullest level of consistency between frames be achieved.

* Mixing products – As a general rule, users should avoid mixing results from solutions using different PCV conventions. When mixed results are used, a thorough consideration should be given to possible systematic differences.

Considerations for regional networks

In general, analyses of data from regional networks can probably continue using the relative PCVs with little or no impact, even with IGS orbits fixed. However, this will depend on the size of the network and the effects should be tested empirically.

However, SINEX solutions submitted for combination (e.g. solutions from EUREF, SIRGAS and NAREF which enter into the Regional Network Associate Analysis Center combinations) should all be based on an agreed upon antenna model, ideally the one used for all other IGS official products.

On the other hand, precise point positioning (PPP) results using IGS products will not be self-consistent, before and after the PCV change, due to the inherent shift in TRF scale.

References

Ge, M., and G. Gendt. Estimation and validation of IGS absolute antenna phase center variations. in Proc. IGS 2004 Workshop and Symposium, ed. M. Meindl, pp 209-219, Berne, Switzerland, 2005.

Ge, M., G. Gendt, G. Dick, F. P. Zhang, Ch. Reigber. Impact of GPS satellite antenna offsets on scale changes in global network solutions, Geophysical Research Letters, 32(6), 2005, L06310.

Mader, G.L., GPS antenna calibration at the National Geodetic Survey, GPS Solutions, 3(1), 50-58, 1999. <http://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/images/summary.pdf>

Mader, G.L., and F.M. Czopek, The Block IIA satellite - Calibrating antenna phase centers, GPS World, 13(5), 40-46, 2002.

<http://www.gpsworld.com/gpsworld/article/articleDetail.jsp?id=18249>

Menge, F., G. Seeber, C. Voelksen, G. Wuebbena, and M. Schmitz, Results of absolute field calibration of GPS antenna PCV, in Proc. ION GPS-98, Nashville, TN, pp 31-38, 1998.

<http://www.geopp.de/download/ion98.pdf>

Rothacher, M., and G. Mader, Receiver and satellite antenna phase center offsets and variations, in Proc. IGS 2002 Network, Data and Analysis Centre Workshop, eds. P. Teatreault, R. Neilan, and K. Gowey, pp 141-152, Ottawa, Canada, 2003.

http://igscb.jpl.nasa.gov/igscb/resource/pubs/02_ott/session_8.pdf

Schmid, R., and M. Rothacher, Estimation of elevation-dependent satellite antenna phase center variations of GPS satellites, J. Geodesy, 77(7-8), 440-446, 2003.

<http://www.springerlink.com/link.asp?id=9q6138abxv2gt9pr>

Schmid, R., G. Mader, and T. Herring, From relative to absolute antenna phase center corrections, in Proc. IGS 2004 Workshop and Symposium, ed. M. Meindl, pp 209-219, Berne, Switzerland, 2005a.

http://igsb.jpl.nasa.gov/igsb/resource/pubs/04_rtberne/Session10_1.pdf

Schmid, R., M. Rothacher, D. Thaller, and P. Steigenberger, Absolute phase center corrections of satellite and receiver antennas : Impact on global GPS solutions and estimation of azimuthal phase center variations of the satellite antenna, GPS Solutions, DOI : 10.1007/s10291-005-0134-x, 2005b.

<http://www.springerlink.com/link.asp?id=v5813771780k47h1>

Schupler, B.R., R.L. Allshouse, and T.A. Clark, Signal characteristics of GPS user antennas, J. Inst. Navigation, 41, 277-295, 1994.

Springer, T.A., Common interests of the IGS and the IVS, in Proc. IVS 2000 General Meeting, eds. N.R. Vandenberg and K.D. Baver, Koetzting, Germany, pp 296-305, 2000.

<http://ivs.nict.go.jp/mirror/publications/gm2000/springer>