

Dans les équations précédentes, TEC est le contenu total d'électrons, c'est-à-dire la densité d'électrons le long du trajet parcouru par l'onde. Cette quantité est mesurée en unités TEC (TECU) correspondant à 10^{16} électrons contenus dans un cylindre joignant le satellite au récepteur et ayant une section transversale de 1 m^2 .

On remarque donc que le délai ionosphérique dépend de la fréquence du signal pour les ondes radio, car l'ionosphère est un milieu dispersif. Il est aussi important de noter que l'ionosphère accélère la phase de l'onde porteuse, mais ralentit les modulations (mesures de code) [MIS01], donc le signe de la correction à appliquer est différent pour chaque type d'observation.

Corrections

Bien que l'équation 4.14 permette de quantifier l'amplitude du délai ionosphérique, la valeur du terme TEC ne peut être déterminée avec précision. Ainsi, on utilise fréquemment le fait que l'ionosphère est un milieu dispersif pour les fréquences utilisées dans le GPS en combinant les signaux sur L1 et L2 afin d'éliminer le terme $dion_1$ de l'équation 4.14. Par exemple, il peut facilement être vérifié que, pour les mesures de phase sur L1 et L2 exprimées en mètres (Φ_1 et Φ_2), la combinaison décrite par les équations 4.16 à 4.18 répond à ce critère.

$$\Phi_{if} = \alpha\Phi_1 + \beta\Phi_2 \quad (4.16)$$

Avec

$$\alpha = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \quad (4.17)$$

$$\beta = \frac{-f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \quad (4.18)$$

Etant donné que l'équation 4.14 résulte d'une approximation de l'équation 4.10, ceci n'élimine en fait que le délai ionosphérique dit de premier ordre (se rapportant au terme $1/f^2$). Dans le positionnement de précision, il est important de quantifier l'erreur engendrée par la négligence des termes d'ordres supérieurs. Suivant le développement et les approximations décrites dans [HAR84], le délai ionosphérique zénithal de 2e et 3e ordre peut être approximé par :

$$dion(2) = \frac{c_X f_g}{2f^3} TEC \quad (4.19)$$

$$dion(3) = \frac{c_X^2}{8f^{4\tau}} TEC^2 \quad (4.20)$$

Où $f_g = 1.74 \text{ MHz}$ est une approximation de la gyrofréquence des électrons libres ($f_g = C_Y \cdot B$) et $\tau = 2 \cdot 10^5 \text{ m}$ représente l'épaisseur d'une couche ayant une densité constante d'électrons. Se basant sur ces équations, la figure 4.12. représente le délai ionosphérique zénithal de 2^{ème} et 3^{ème} ordre en fonction du contenu total d'électrons pour un signal sur L1.

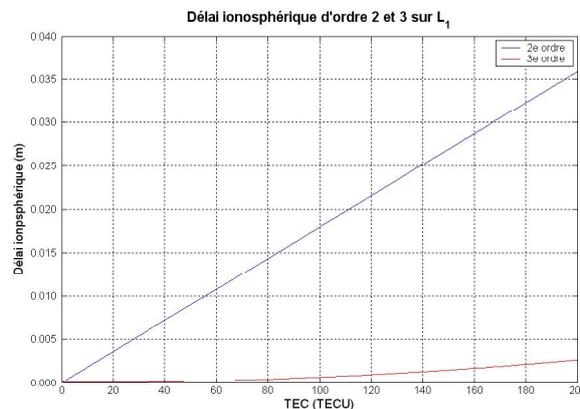


Figure 4.12. Amplitude du délai ionosphérique d'ordre 2 et 3 sur L1

Des études ont été réalisées en vue de corriger les effets ionosphériques d'ordres supérieurs [BRU91], [HER05], [HOQ07], ce qui nécessite habituellement l'utilisation de données externes comme la densité maximale d'électrons et le champ magnétique. étant donné qu'une valeur de TEC supérieure à 100 TECU n'est pas très commune, on omet habituellement les corrections ionosphériques du 2e et du 3e ordre. Toutefois, lorsque le niveau d'activité ionosphérique est élevé, ces termes deviennent non négligeables dans le positionnement de précision et devraient être pris en considération [XU03].

L'inconvénient majeur de la combinaison sans effet ionosphérique décrite par l'équation 4.16 est que la nature entière des ambiguïtés de phase est perdue. Pour préserver cette caractéristique, ou pour les utilisateurs monofréquence du GNSS, des corrections ionosphériques sont fournies par divers organismes. Le tableau 4.7 fait état de la précision des grilles ionosphériques calculées par l'IGS (en TECU) et l'équation 4.14 peut être utilisée pour convertir ces valeurs en mètres.

Type de produit	Précision du VTEC (TECU)	Précision du VTEC sur L_1 (m)
IGS - Final	2 – 8	0.32 – 1.30
IGS - Rapide	2 - 9	0.32 – 1.46

Tableau 4.7. Précision des produits ionosphériques [IGS07]

La grande variation de précision de ces produits est causée par la variabilité de l'ionosphère en fonction de la localisation, de la saison, de l'heure locale, d'un manque d'uniformité dans la répartition des stations utilisées pour estimer le contenu total d'électrons vertical (VTEC), etc.

Les grilles ionosphériques transmises par l'IGS contiennent une précision associée à chaque valeur de VTEC. En examinant ces valeurs, on constate que l'erreur résiduelle liée à l'ionosphère est largement supérieure au seuil requis pour le positionnement de précision avec les mesures de phase de l'onde porteuse. à cet effet, il s'avère possible d'estimer des paramètres ionosphériques stochastiques (un délai ionosphérique par satellite par époque) permettant d'obtenir la partie non modélisée par le modèle utilisé. La modernisation du GPS (3^{ème} fréquence) sera toutefois bénéfique à cet égard, car cela apportera plus de redondance lors de l'estimation de ces paramètres.

2.7.8 Marées terrestres (det)

La Terre n'étant pas un corps rigide, l'attraction causée par la Lune et le Soleil engendre une déformation de la croûte terrestre. Ainsi, en fonction de la position relative de ces astres et de la latitude du site à la surface terrestre, un déplacement vertical pouvant dépasser 30 cm et un déplacement horizontal de plus de 5 cm sont possibles. La figure 4.13 donne les composantes Nord, Est et Verticale du déplacement causé par les marées terrestres à la station NRC1 (N 45°27015, W 75°37026), du 1^{er} au 10 janvier 2006.

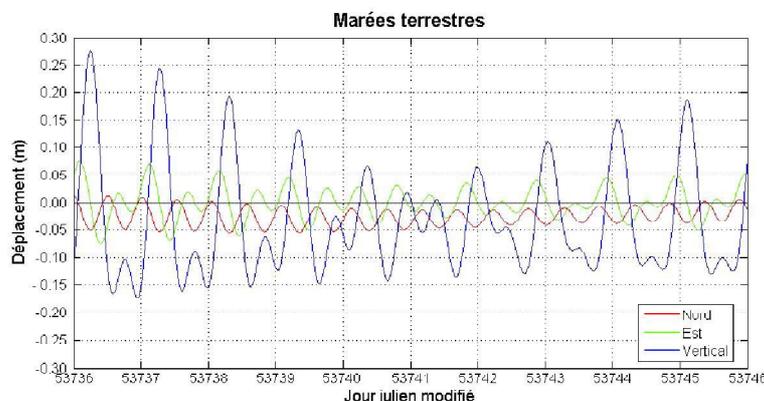


Figure 4.13. Marées terrestres, du 1er janvier au 30 juin 2006, à la station NRC1

Corrections

Les déplacements causés par les marées terrestres peuvent être modélisés à l'aide d'un développement en harmoniques sphériques et ainsi corrigés à un niveau millimétrique. L'ensemble des termes correctifs étant plutôt lourd, certains d'entre eux sont généralement omis. Pour une précision d'au moins 5mm, seul le déplacement causé par la composante du 2e degré des marées est nécessaire :

$$\Delta \vec{r} = \sum_{j=2}^3 \frac{GM_j r_e^4}{GM_T r_j^3} \left\{ h_2 \vec{r}_{rec} \left(\frac{3}{2} (\vec{r}_j \cdot \vec{r}_{rec})^2 - \frac{1}{2} \right) + 3l_2 (\vec{r}_j \cdot \vec{r}_{rec}) [\vec{r}_j - (\vec{r}_j \cdot \vec{r}_{rec}) \vec{r}_{rec}] \right\} \quad (4.21)$$

où

- GM_j est la constante gravitationnelle pour la Lune ($j = 2$) et le Soleil ($j = 3$) ($m^3 kg^{-1} s^{-2}$)
- GM_T est la constante gravitationnelle de la Terre ($m^3 kg^{-1} s^{-2}$)
- r_e est la valeur du rayon terrestre (m)
- \vec{r}_j est le vecteur unitaire du centre de masse de la Terre à la Lune ($j = 2$) et au Soleil ($j = 3$)
- r_j est la distance entre le centre de masse de la Terre et la Lune ($j = 2$) ou le Soleil ($j = 3$) (m)
- \vec{r}_{rec} est le vecteur unitaire du centre de masse de la Terre à la station
- r_{rec} est la distance entre le centre de masse de la Terre et la station (m)
- h_2 est le nombre de Love de degré 2
- l_2 est le nombre de Shida de degré 2

Dans l'équation précédente, nous avons :

$$h_2 = 0.6078 - 0.0006[(3\sin^2\varphi - 1)/2] \quad (4.22)$$

$$l_2 = 0.0847 - 0.0002[(3\sin^2\varphi - 1)/2] \quad (4.23)$$

Où φ est la latitude du site.

2.7.9 Surcharge océanique (dol)

La surcharge océanique consiste en une déformation du fond marin et des régions côtières due à la redistribution des eaux résultant des marées océaniques. Ainsi, l'attraction causée par la Lune et le Soleil engendre une variation de la distribution de la masse d'eau suivant différentes périodicités. On considère généralement 11 principales ondes contribuant à ces périodicités pouvant être regroupées en trois classes : semi-diurne (M_2, S_2, N_2, K_2), diurne (K_1, O_1, P_1) et à longue période (M_f, M_m, S_{sa}).

Chacune de ces ondes possède une fréquence et une amplitude dépendant de la position à la surface terrestre et le déplacement de la croûte à cet endroit est obtenu en effectuant la sommation de la contribution relative à chacune d'elles.

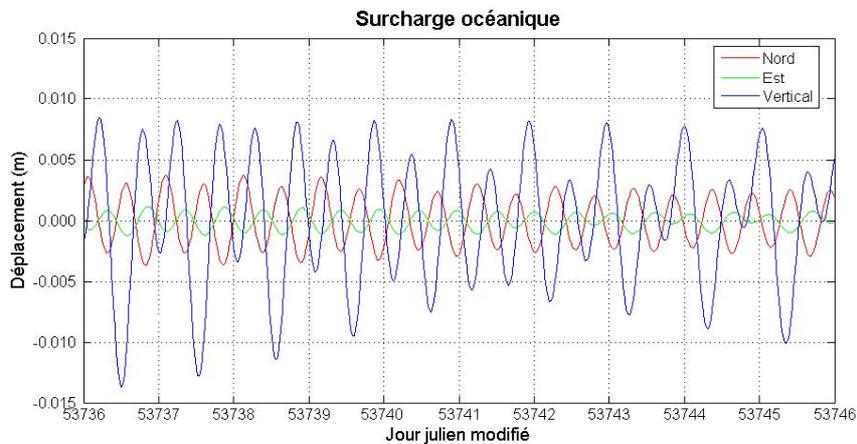


Figure 4.14. Surcharge océanique à la station NRC1 à Ottawa, du 1er au 10 janvier 2006

Le mouvement vertical d'un repère sur la croûte terrestre peut atteindre une dizaine de centimètres en régions côtières, alors qu'il est généralement inférieur à 1 cm en régions continentales

[XU03]. Similairement aux marées terrestres, la surcharge océanique ne doit pas être considérée pour les applications aériennes. La figure 4.14. montre le déplacement dû à la surcharge océanique, du 1er au 10 janvier 2006, pour la station NRC1 située à environ 500 km de l'Océan Atlantique.

Corrections

Les déplacements montrés par la figure 4.14. ont été calculés selon les composantes Nord (Δn), Est (Δe) et Radiale (Δr) avec les équations suivantes [SCH99] :

$$\Delta n = -\sum_{k=1}^{11} A_{sk} f_k \cos(\Theta_k + u_k - \Phi_{sk}) \quad (4.24)$$

$$\Delta e = -\sum_{k=1}^{11} A_{wk} f_k \cos(\Theta_k + u_k - \Phi_{wk}) \quad (4.25)$$

$$\Delta r = +\sum_{k=1}^{11} A_{rk} f_k \cos(\Theta_k + u_k - \Phi_{rk}) \quad (4.26)$$

Dans ces équations, les termes A_{ik} et Φ_{ik} font référence à l'amplitude et la phase des $k = 11$ ondes impliquées, dans les directions sud (s), ouest (w) et radiale (r). Ces quantités peuvent être obtenues pour une position donnée sur le site web de l'observatoire spatial d'Onsala². Les termes f_k et u_k dépendent de la longitude du noeud lunaire, mais leur valeur peut être fixée à $f_k = 1$ et $u_k = 0$ pour une précision de 1-3 mm [KOU01]. Le calcul de l'argument θ_k est détaillé dans [SCH99].

La précision du déplacement calculé dépend de la qualité du modèle décrivant le mouvement de la masse océanique. à cause des propriétés variables de la lithosphère et des irrégularités dans la dynamique des masses d'eau en régions côtières, la précision des modèles à cet endroit est généralement moindre et des modèles locaux sont souvent utilisés [XU99]. La comparaison du niveau d'eau provenant des différents modèles disponibles a montré une compatibilité de 2-3 cm en eaux profondes (> 1000 m) [SHU97], mais celle-ci se détériore lorsque la profondeur de l'eau est inférieure à 1000 m. Dans ce cas, des différences de l'ordre de 30 cm entre les modèles ne sont pas rares. Il a toutefois été montré qu'une erreur de 5 cm dans les modèles de marées océaniques se traduit par une erreur inférieure au millimètre pour la composante verticale de la déformation de la croûte terrestre.

Les équations 4.24 à 4.26 considèrent seulement les 11 composantes principales des marées, mais il en existe une multitude d'autres pouvant être dérivées de celles-ci. La négligence de ces composantes additionnelles peut entraîner une erreur de quelques millimètres sur le déplacement vertical calculé.

2.7.10 Enroulement de phase (dpwu_i)

L'enroulement de phase (phase wind-up) est un phénomène physique relatif à la propagation, ou plus précisément à l'émission et la réception, des ondes électromagnétiques polarisées. Les signaux émis par le GPS peuvent être visualisés comme un champ électrique rotatif se propageant de l'antenne du satellite à celle du récepteur [WU93]. Le fait de changer l'orientation de l'antenne émettrice modifie la direction du champ électrique, ce qui a un impact sur la phase mesurée. Le même phénomène survient lorsque l'antenne réceptrice subit une rotation. En d'autres mots, les observations de la phase de l'onde porteuse dépendent de l'orientation relative des deux antennes.

En ce qui concerne le GPS, l'orientation du satellite change constamment alors que celui-ci gravite autour de la Terre, tandis que l'antenne du récepteur peut subir des changements d'attitude en mode cinématique.

La figure 4.15. représente l'amplitude en cycles de l'effet d'enroulement de phase pour le satellite PRN 14, le 8 janvier 2007, tel qu'observé à la station NRC1. Les centres d'analyse de l'IGS prenant en considération ce phénomène, le fait d'utiliser les produits de l'IGS en omettant d'apporter la correction appropriée peut résulter en une erreur de positionnement de l'ordre du décimètre en mode absolu [KOU01].

² <http://www.oso.chalmers.se/~loading>

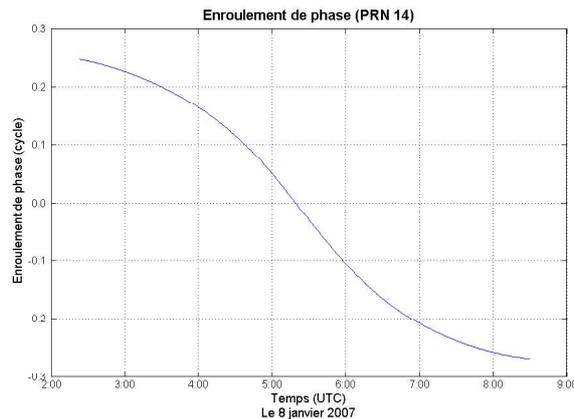


Figure 4.15. Enroulement de phase pour le satellite PRN 14, le 8 janvier 2007.

Corrections

Une correction peut être appliquée aux mesures de phase de chaque satellite selon l'algorithme proposé dans [WU93], en supposant l'utilisation d'une antenne dipôle. Pour définir l'orientation de l'antenne, on doit définir un système de coordonnées orienté selon les dipôles des antennes. Dans la pratique, cela s'avère complexe, donc une simplification a été effectuée en utilisant plutôt le système de coordonnées du satellite pour l'antenne de celui-ci et le repère topocentrique pour le récepteur (l'axe x pointant vers le nord, l'axe y vers l'est et l'axe z vers de zénith).

Cette redéfinition des systèmes de coordonnées entraîne une erreur initiale d'enroulement de phase se propageant dans l'ambiguïté de phase. Cette simplification fait en sorte que le changement d'orientation de l'antenne du récepteur en mode cinématique ne soit pas perceptible. En effet, la définition du repère topocentrique dépend uniquement de la longitude et de la latitude de la station, donc une rotation sur place de l'antenne n'affecte aucunement la définition du système de coordonnées. Néanmoins, l'effet de l'enroulement de phase engendré affecterait tous les satellites identiquement pour une antenne pointant vers le zénith, ce qui implique que l'erreur engendrée serait absorbée par l'erreur d'horloge du récepteur [KOU01].

Ce phénomène affecte seulement les mesures de phase, donc aucune correction n'est à appliquer pour les pseudo-distances.

2.7.11 Ambiguïté de phase (N_i)

L'ambiguïté de phase est le nombre entier de longueurs d'ondes contenu dans la distance initiale entre le récepteur et le satellite. Cette valeur demeure constante tant et aussi longtemps qu'il n'y pas d'interruption dans l'acquisition du signal, appelée saut de cycle. Dans le cas contraire, une nouvelle ambiguïté de phase doit être déterminée ou les sauts de cycles doivent être corrigés.

Corrections

Les ambiguïtés de phase sont des paramètres inconnus que l'on estime habituellement par moindres carrés. En raison du comportement constant de ce paramètre, celui-ci pourrait aussi être éliminé des équations d'observations en différenciant ces dernières temporellement, mais cela affaiblit la géométrie de la solution et ne permet pas de bénéficier des avantages de la résolution des ambiguïtés de phase.

2.7.12 Biais de code et de phase (b_c, b_p)

La génération des signaux des satellites est réalisée à partir d'un oscillateur ayant une fréquence fondamentale (f_0) de 10.23 MHz. à partir de celle-ci, diverses composantes et modulations sont ajoutées afin de créer le signal transmis. Un principe semblable est présent dans les récepteurs afin de générer le répliquât permettant l'acquisition et la démodulation des signaux émis par les satellites.

Bien que les différentes composantes du signal soient nominaleme nt en phase par rapport à la fréquence fondamentale, celles-ci peuvent en réalité subir un léger décalage l'une par rapport à l'autre, comme le montre la figure 4.16.

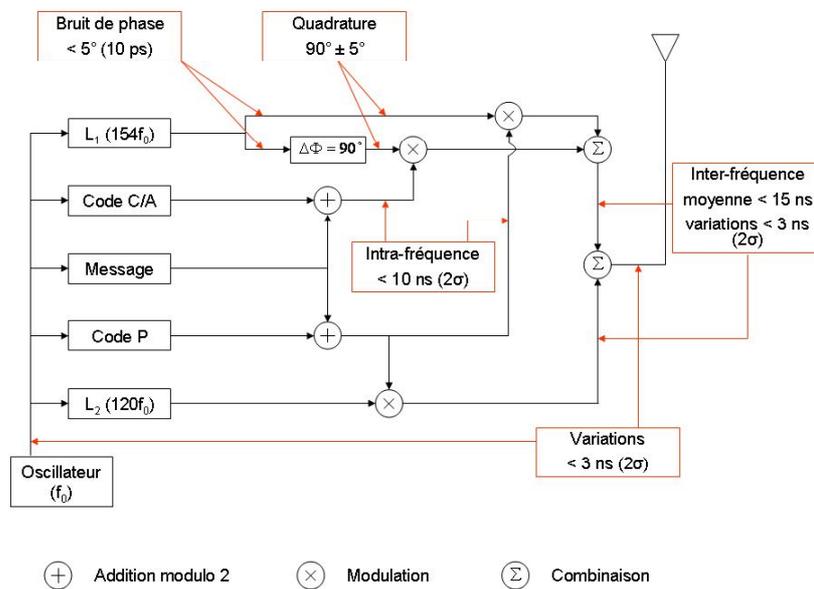


Figure 4.16. Génération des signaux GPS [WEL87]

Ainsi, plusieurs délais peuvent survenir lors de la génération des signaux :

- Le bruit associé à la génération de la phase devrait être inférieur à 0.1 radian ($\approx 3 \text{ mm}$)
- Les codes C/A et P1 doivent être en quadrature, ce qui implique une différence de phase de 90° ayant aussi une incertitude de 0.1 radian ($\approx 3 \text{ mm}$)
- Lors de la modulation des codes C/A et P1, un biais intra-fréquence inférieur à 10 ns ($\approx 3 \text{ m}$) peut survenir.
- Les modulations sur L1 et L2 subissent aussi un décalage composé d'une partie constante ($\approx 15 \text{ ns}$ ($\approx 4.5 \text{ m}$)) et de variations ($\approx 3 \text{ ns}$ ($\approx 0.9 \text{ m}$))
- La différence entre le signal émis au centre de phase du satellite et celui généré à la source par l'oscillateur est soumis à des variations de l'ordre de 3 ns ($\approx 0.9 \text{ m}$)

Corrections

Les biais de phase et de code se confondent souvent avec d'autres paramètres estimés et ne peuvent être quantifiés adéquatement de manière absolue. En pratique, on modélise surtout les biais entre les codes P1 et P2 et ceux entre les codes C/A et P1, souvent décrits dans la littérature par le terme DCB (Differential Code Biases). Ceux-ci s'avèrent nécessaires pour assurer la cohérence du modèle fonctionnel lors de l'utilisation des corrections d'horloges des satellites transmises dans le message de navigation des satellites ou fournies par l'IGS.

2.7.13 Variations du centre de phase au récepteur (dpcvi)

Les signaux émis par les satellites sont captés au centre de phase de l'antenne liée au récepteur, ce qui ne correspond pas nécessairement à son centre géométrique. De plus, le centre de phase n'est pas un endroit fixe dans l'antenne : il varie en fonction de l'angle d'élévation et de l'azimut du satellite. La distance géométrique entre le satellite et le récepteur est en fait la distance entre les centres de phase instantanés des antennes émettrice et réceptrice. La figure 4.17 explique schématiquement les différents termes impliqués dans cette section.

La position du centre de phase instantané d'une antenne peut être décrite par :

- Une composante constante entre un point de référence sur l'antenne (ARP – Antenna Reference Point) et le centre de phase moyen, pouvant atteindre quelques centimètres [LEI04].
- Une composante variant en fonction de l'élévation et de l'azimut du satellite, qui est généralement inférieure au centimètre, permettant d'obtenir le centre de phase instantané [SEE03].

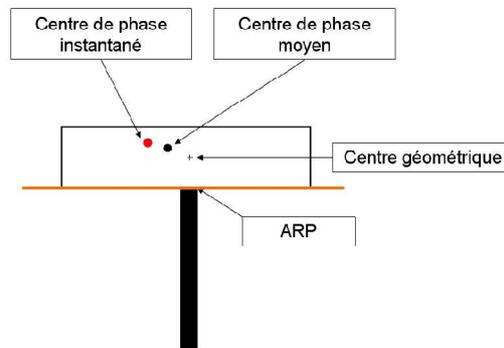


Figure 4.17. Variation du centre de phase d'une antenne

Corrections

Trois techniques sont présentement disponibles afin de calibrer le décalage entre l'ARP et le centre de phase moyen, ainsi que la variation du centre de phase d'une antenne [SEE03] :

- le calibrage absolu en chambre anéchoïque³
- le calibrage relatif sur le terrain (court vecteur ou poutrelle de calibrage)
- le calibrage absolu sur le terrain à l'aide d'un robot spécialisé

Les valeurs issues de ce calibrage sont disponibles, pour la plupart des antennes, dans un fichier de type ANTEX⁴ fourni par l'IGS. La comparaison des résultats obtenus du calibrage en chambre anéchoïque avec ceux de la poutrelle de calibrage donne des écarts inférieurs à 2 mm, ce qui est un indicateur de la précision de la correction appliquée.

La distance observée (ρ^*) entre l'antenne du satellite et le centre de phase moyen de l'antenne du récepteur peut être donnée par [ROT06] :

$$\rho^* = \rho + dpcv_i(\alpha, E) \quad (4.27)$$

où $dpcv_i(\alpha, E)$ est une correction en fonction de l'azimut (α) et de l'angle d'élévation (E) du satellite, à appliquer à la distance géométrique (ρ) à cause de la variation du centre de phase. Notons que la valeur du terme $dpcv_i(\alpha, E)$ est disponible dans le fichier ANTEX, mais pour certaines antennes, seule la variation en fonction de l'angle d'élévation est fournie.

Souvent, on désire plutôt obtenir la position d'un repère au sol plutôt que celle du centre de phase moyen de l'antenne. Pour ce faire, on doit d'abord appliquer la correction entre la position du centre de phase moyen de l'antenne (\hat{x}_{CPM}) et celle du point de référence (\hat{x}_{ARP}) :

$$\hat{x}_{ARP} = \hat{x}_{CPM} - \begin{bmatrix} \Delta n \\ \Delta e \\ \Delta h \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

où (Δn , Δe , Δh) sont fournies, pour chaque type d'antenne, dans le fichier ANTEX.

Par la suite, on n'a qu'à retrancher la différence d'altitude entre le ARP et le repère (communément appelée « hauteur d'antenne ») pour obtenir les coordonnées de ce dernier.

³ Salle d'expérimentation dont les parois absorbent les ondes sonores ou électromagnétiques, ne provoquant donc pas d'écho pouvant perturber les mesures.

⁴ <http://igscb.jpl.nasa.gov/components/formats.html>

2.7.14 Multitrajets au récepteur (dmp_{ρ_i} , dmp_{ϕ_i})

Les signaux émis par les satellites peuvent être réfléchis par divers objets (bâtiments, voitures, sol, etc.) avant d'atteindre l'antenne liée au récepteur. Ainsi, ce dernier reçoit une combinaison de signaux directs et de signaux réfléchis (appelés multitrajets), ce qui peut engendrer des erreurs sur les mesures effectuées. L'erreur maximale pouvant affecter les mesures de phase est de l'ordre du quart de la longueur d'onde ($\lambda_i/4$). En ce qui concerne les mesures de code, l'amplitude de l'erreur introduite est fonction du type de corrélateur utilisé [LEI04], mais elle pourrait atteindre 10 à 20 mètres [HOF01].

Corrections

Il n'existe toujours pas de modèle mathématique permettant de corriger l'effet des multitrajets, car une multitude de facteurs influencent l'amplitude des erreurs introduites, comme [ARB96]:

- Le coefficient de réflexion de la surface réfléchissante
- Le distance antenne-réflécteur
- L'orientation et l'inclinaison de la surface réfléchissante
- La fréquence de l'onde porteuse (ou la modulation du code)

A défaut de pouvoir les corriger, plusieurs moyens peuvent être utilisés afin de réduire leur impact [ARB96] :

- Choisir un site éloigné d'objets réfléchissants
- Utiliser une antenne :
 - avec anneaux d'étranglement (choke ring) et/ou d'un plan de sol
 - tenant compte de la polarisation des signaux (les signaux réfléchis ont une polarisation inversée)
 - ayant un gain réduit à bas angle d'élévation
- Favoriser une durée d'observation plus longue que la périodicité des multitrajets.
- Pondérer les observations en fonction de leur ratio signal/bruit (les multitrajets réduisent la valeur de ce rapport) [SEE03]

Les antennes avec anneaux d'étranglement sont souvent munies de radôme afin d'empêcher la neige ou tout autre élément de s'accumuler entre les anneaux. Il a cependant été démontré que le front d'ondes peut être perturbé lors du passage à travers celui-ci, ce qui peut entraîner des biais d'altitude pouvant atteindre plusieurs centimètres.

2.7.15 Autres effets non modélisés

a- Effets thermiques

La forme la plus commune de bruit est celle causée par le mouvement d'électrons dans les résistances et les semi-conducteurs du récepteur. Le mouvement aléatoire des électrons génère un courant électrique connu sous le nom de bruit thermique, proportionnel à la température physique du système. Même lorsqu'il n'y a aucun signal GPS mesuré, le récepteur perçoit tout de même un signal qui n'est en fait que ce bruit. Le ratio signal/bruit est un indicateur de la qualité avec laquelle le récepteur peut mesurer la pseudo-distance ou la phase et affecte évidemment la solution obtenue.

Les récepteurs GPS sont aussi sensibles aux variations de température. Ceci se manifeste généralement par une dérive temporelle de la longueur des trajets des signaux dans le récepteur.

b- Biais inter-canaux

Les récepteurs à canaux dédiés sont soumis à une différence de marche, c'est-à-dire que la longueur des trajets radioélectriques parcourus par les signaux diffère d'un canal à un autre, entraînant des erreurs de mesures distinctes entre les observations. On appelle ce phénomène les biais inter-canaux, mais ceux-ci peuvent être pratiquement éliminés par calibrage [HOF01].

c- Instabilité de l'oscillateur

L'instabilité de l'oscillateur a un effet plus marqué chez les récepteurs à canaux séquentiels. Ce type de récepteur traite le signal d'un satellite à la fois, comparativement aux récepteurs à canaux dédiés pouvant effectuer des mesures simultanément sur tous les satellites. Ainsi, le fait d'alterner entre les satellites fait en sorte que les variations de l'oscillateur peuvent affecter de façon distincte les mesures des différents satellites ou fréquences, causant un bruit pouvant atteindre l'ordre du centimètre pour un oscillateur au quartz [COH92]. Pour les récepteurs à canaux dédiés, l'instabilité de l'oscillateur est absorbée par le paramètre d'horloge du récepteur. Notons que, de nos jours, les récepteurs géodésiques sont exclusivement des récepteurs à canaux dédiés.

d- Couplage diaphonique (crosstalk)

Le couplage diaphonique survient lorsque l'énergie d'un signal transmis sur un canal affecte le signal d'un autre canal. L'impact de cette erreur peut être évité lors du design du récepteur en isolant adéquatement les circuits. Dans ce cas, l'erreur peut être inférieure à 0.5 millimètres [COH92].

e- Erreur de quantification

Les signaux émis par les satellites GPS sont analogiques, c'est-à-dire qu'ils peuvent être exprimés par une fonction mathématique continue variant temporellement. Pour sa part, le récepteur GPS doit effectuer des mesures à un intervalle de temps donné, ce que l'on nomme mesures discrètes. De plus, il doit coder le signal avec un nombre fini de bits, ce qui fait en sorte que la mesure effectuée devient une approximation du signal réel. L'erreur engendrée par ce processus est appelée erreur de quantification. Elle peut habituellement être négligée pour un récepteur numérique [LAN98].

f- Acquisition des signaux

Les observations effectuées par un récepteur GPS ne peuvent être mesurées parfaitement. En effet, en fonction du ratio de la puissance du signal de la porteuse sur la densité de bruit, le processus de corrélation contient une certaine marge d'erreur (σ_{DLL}) pouvant être décrite, pour les mesures de pseudo-distances, par [LAN98] :

$$\sigma_{DLL} = \sqrt{\frac{\alpha B_L}{c/n_0} \left[1 + \frac{2}{Tc/n_0} \right]} \lambda_c \quad (4.29)$$

$$c/n_0 = 10^{(C/N_0)/10} \quad (4.30)$$

où

- α est le facteur discriminateur de corrélation (ayant la valeur de 1 ou 0.5 selon le type de corrélateur)
- B_L est la largeur de bande du circuit de verrouillage du code (Hz)
- c/n_0 est le ratio de la densité de la porteuse sur le bruit (Hz)
- T est le temps d'intégration de la prédétection (s)
- λ_c est la longueur d'onde de la modulation (29.305 m pour le code P et 293.05 m pour le code C/A)
- C/N_0 est la puissance du signal de la porteuse sur la densité de bruit (dB-Hz)

Pour des signaux ayant une puissance assez élevée ($C/N_0 > 35$ dB-Hz), l'équation 4.29 peut être simplifiée à :

$$\sigma_{DLL} \approx \sqrt{\frac{\alpha B_L}{c/n_0}} \lambda_c \quad (4.31)$$

Similairement, l'erreur de mesure de phase dans le circuit de verrouillage de la phase (σ_{PLL}) peut être exprimée par :

$$\sigma_{PLL} = \sqrt{\frac{B_P}{c/n_0} \left[1 + \frac{1}{2Tc/n_0} \right] \frac{\lambda}{2\pi}} \approx \sqrt{\frac{B_P}{c/n_0} \frac{\lambda}{2\pi}} \quad (4.32)$$

où B_P est la largeur de bande du circuit de verrouillage de la phase (Hz) et λ est la longueur d'onde de la porteuse.

Le tableau 4.8. donne un aperçu du bruit engendré par le processus d'acquisition des signaux en utilisant les valeurs suivantes : $\alpha = 0.5$, $C/N_0 = 45$ dB-Hz, $B_L = 0.8$ Hz et $B_P = 2$ Hz.

Signal	Bruit (mm)
Code C/A	1042
Code P _i	104
Phase L ₁	0.2
Phase L ₂	0.3

Tableau 4.8. Bruit engendré par le processus d'acquisition des signaux

g- Câbles coaxiaux

Les signaux émis par les satellites sont reçus par l'antenne, puis ils sont acheminés à l'aide d'un câble vers le récepteur. Un court délai de propagation peut alors être observé, mais étant donné qu'il est identique pour tous les signaux reçus simultanément à l'antenne, celui-ci est absorbé par l'erreur d'horloge du récepteur.

De plus, en fonction du matériel et de la longueur du câble, la puissance des signaux est atténuée et du bruit supplémentaire est introduit.

2.8. Observables différenciées

La différenciation des données originales, code ou phase, permet d'éliminer ou de réduire certains biais et aussi de réduire la taille des calculs.

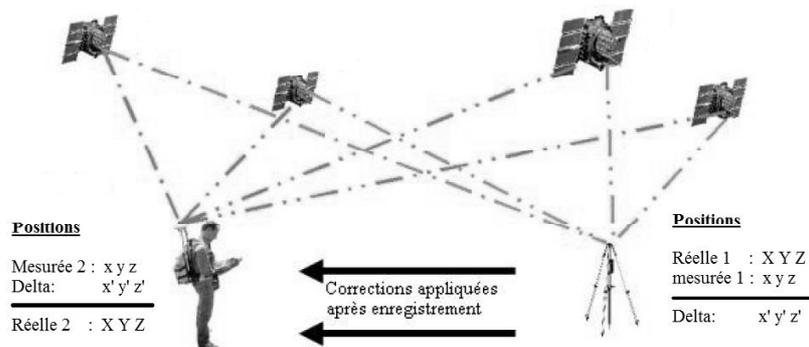


Figure 4.18. Principe du positionnement différentiel

2.8.1 L'équation d'observation non-différenciée

En considérant toutes ces sources d'erreur, l'équation d'observation non différenciée ou "zéro-différenciée" (ZD^5) de la phase s'écrit sous la forme :

$$\phi_{r,i}^k = \rho_r^k - \lambda_i N_{r,i}^k + d\rho_{orb} - \delta i o n_{r,i}^k - \delta t r o p_r^k + (\delta t_r - \delta t^k) c - \delta m_{r,\phi}^k + \epsilon_\phi \quad (4.33)$$

⁵ zero-differenced observation equation

Les notations sont les mêmes que pour l'équation (4.2) avec :

$d\rho_{orb}$	erreur orbitale
$\delta ion_{r,i}^k$	décalage ionosphérique
$\delta trop_r^k$	décalage troposphérique
δt_r	erreur d'horloge du récepteur
δt^k	erreur d'horloge du satellite
$\delta m_{r,\phi}^k$	multi-trajet
ϵ_ϕ	bruit de mesure de la phase

Le problème principal des observations de phase est l'estimation des ambiguïtés de phase en tant que nombres entiers. Il existe pour cela plusieurs méthodes numériques. Mais en général la qualité de la fixation des ambiguïtés dépend de la qualité des observations ainsi que de la longueur de la ligne de base [KLI96].

L'une des difficultés rencontrées lors des observations, et qui dégrade fortement la qualité de positionnement est due à l'interruption du signal. Avec chaque interruption (sauts de cycles), l'observation de phase recommence à zéro et une nouvelle ambiguïté de phase apparaît. L'étape numéro un des calculs GPS est de les détecter et les réparer.

Il existe plusieurs méthodes pour détecter les sauts de cycles, notamment la méthode des triples différences ou l'utilisation des ondelettes.

2.8.2 La simple différence

La simple différence (SD) consiste à former à un instant donné la différence de mesures entre un satellite et deux récepteurs. On constate que cette différence permet d'éliminer les décalages d'horloges satellites et de réduire l'influence des autres erreurs, comme les effets atmosphériques et les erreurs d'orbites, en fonction de la longueur de la ligne de base.

La relation d'observation (4.3) devient :

$$\Delta\phi_{r,i}^k = \Delta\rho_r^k - \lambda_i \Delta N_{r,i}^k + \Delta d\rho_{orb} - \Delta\delta ion_{r,i}^k - \Delta\delta trop_r^k + c\Delta\delta t_r - \Delta\delta m_{r,\phi}^k + \Delta\epsilon_\phi \quad (4.34)$$

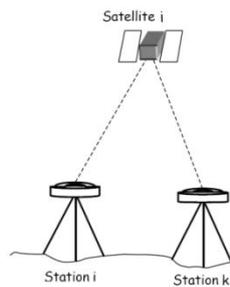


Figure 4.19. La simple différence

2.8.3 La double différence

Le double différence (DD) est la différence de deux simples différences à un instant donné entre deux satellites et deux récepteurs. Cette combinaison permet d'éliminer les erreurs d'horloges récepteur et de réduire les effets des perturbations atmosphériques et des erreurs d'orbites. La relation d'observation des doubles différences est :

$$\nabla\Delta\phi_{r,i}^k = \nabla\Delta\rho_r^k - \lambda_i \nabla\Delta N_{r,i}^k + \nabla\Delta d\rho_{orb} - \nabla\Delta\delta ion_{r,i}^k - \nabla\Delta\delta trop_r^k - \nabla\Delta\delta m_{r,\phi}^k + \nabla\Delta\epsilon_\phi \quad (4.35)$$

Cette équation d'observation peut être écrite pour chaque paire de satellites, ce qui résulte en $n-1$ équations linéairement indépendantes où n est le nombre de satellites à chaque époque.

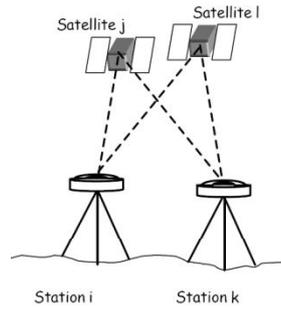


Figure 4.20. La double différence

2.8.4 La triple différence

La triple différence (TD) est la différence de deux doubles différences pour deux époques directement consécutives. Cette différence élimine les ambiguïtés entières et elle est d'ailleurs utilisée principalement pour rechercher et éliminer les sauts de cycles. La relation d'observation devient :

$$T\nabla\Delta\phi_{r,i}^k = T\nabla\Delta\rho_r^k + T\nabla\Delta\rho_{orb} - T\nabla\Delta\delta_{ion,r,i}^k - T\nabla\Delta\delta_{trop,r}^k - T\nabla\Delta\delta_{m,r,\phi}^k + T\nabla\Delta\epsilon_\phi \quad (4.36)$$

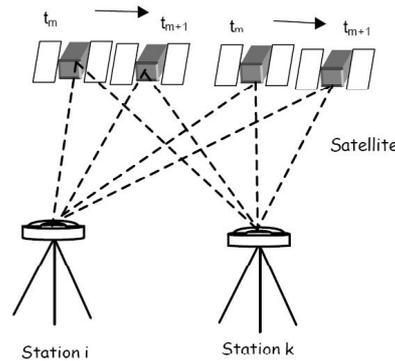


Figure 4.21. La triple différence

2.9. Les combinaison linéaire de mesures

Certaines des combinaisons entre les différents types de mesures GPS possèdent des caractéristiques utiles pour le traitement des données.

2.9.1. Combinaison "ionosphere free"

L'une des plus importantes de ces combinaisons s'appelle "ionosphere free" et est de la forme :

$$\Phi_3 = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \Phi_1 - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \Phi_2 = 2.55\Phi_1 - 1.55\Phi_2 \quad (4.37)$$

Où $f_1 = 1575, 42$ MHz et $f_2 = 1227, 60$ MHz sont respectivement des fréquences des ondes porteuses L1 et L2. La combinaison Φ_3 élimine mathématiquement le terme relatif à l'ionosphère [HUG01]. Pour les mesures de code cette combinaison est possible si le récepteur est capable de détecter le code P/Y (parce que l'onde L2 est seulement modulée par le code P/Y) ou s'il est "codeless". Cette combinaison est utilisée par la majorité des logiciels traitant des données bifréquences afin de construire des doubles différences.

2.9.2 Combinaison "geometry free"

Une combinaison de type $\Phi_4 = \Phi_1 - \Phi_2$ (4.38)

est indépendante des horloges des récepteurs et de la géométrie (orbites et coordonnées des stations). Pour cette raison elle s'appelle "geometry free" et peut être utilisée pour l'estimation des modèles ionosphériques.

2.9.3 Combinaison "wide-lane"

Une autre combinaison, nommée la combinaison "wide-lane" est donnée par :

$$\Phi_5 = \frac{1}{f_1 - f_2} (f_1 \Phi_1 - f_2 \Phi_2) \quad (4.39)$$

La raison de cette dénomination est que la longueur d'onde correspondante est d'environ 86 cm soit à peu près quatre fois celle de L_1 ou L_2 . Il est donc plus facile de fixer l'ambiguïté de cette longueur d'onde que celle de L_1 ou L_2 . On remarque que

$$N_5 = N_1 - N_2 \quad (4.40)$$

N_5 est appelée ambiguïté "wide-lane". Cette combinaison est aussi utilisée pour détecter les sauts de cycle.

2.9.4 Combinaison Melbourne-Wübbena

Cette combinaison est faite entre les mesures de phase (Φ_1 et Φ_2) et les mesures de code (P1 et P2), et est donnée par :

$$\Phi_6 = \frac{1}{f_1 - f_2} (f_1 \Phi_1 - f_2 \Phi_2) - \frac{1}{f_1 + f_2} (f_1 P_1 - f_2 P_2) \quad (4.41)$$

Elle élimine les effets ionosphériques et troposphériques, l'erreur d'horloge et l'erreur due à la mauvaise géométrie des satellites [HUG01].

2.10. Traitement des données GPS

Il n'existe pas une méthode unique pour traiter les données GPS. Mais, d'une manière générale, le traitement des données se fait toujours en trois étapes :

- prétraitement,
- construction du modèle mathématique (équations d'observation),
- inversion pour la détermination des coordonnées.

2.10.1. Le prétraitement des données

Il consiste à identifier les erreurs grossières (sauts de cycle, etc) et à appliquer éventuellement des corrections dues aux effets systématiques (ionosphère, troposphère, orbites, etc). Le choix de la stratégie de traitement fait également partie du prétraitement des données.

- Quels types de mesures seront utilisées pour construire le modèle mathématique ? Phase, pseudo-distance ou les deux à la fois ?
- Quelles combinaisons linéaires entre les mesures ("ionosphere free", "wide-lane", ...) seront employées ? Ceci dépend du types des mesures effectuées.
- Quel type d'observable différenciée sera utilisé ? ZD, SD, DD ou TD?
- Est-ce que les modèles de correction (ionosphère, troposphère, orbites, etc) seront introduits dans les systèmes d'équations ? Dans ce cas, les paramètres des modèles seront obtenus en même temps que les autres paramètres, et par conséquent le nombre des inconnues sera augmenté.

2.10.2. Le modèle mathématique

Le modèle mathématique choisi pour construire le système d'équations d'observation est souvent du type (ZD) ou (DD). Fondamentalement, il n'existe pas de différence entre les résultats obtenus par les équations d'observation différenciées et non-différenciées.

Les équations d'observation ZD sont généralement appliquées pour un positionnement absolu précis (PPP⁶) ou bien pour obtenir des informations sur les horloges satellites et récepteurs. L'inconvénient de l'approche ZD est que le nombre de paramètres à estimer est plus élevé.

Pour le positionnement relatif, les doubles différences des observations de phase sont utilisées pour construire les systèmes d'équations. On rappelle que pour l'équation (4.5) les observables Φ_1 , Φ_2 ou Φ_3 "ionospheric free" introduites par (4.7) peuvent être utilisées.

Pour une seule ligne de base, et pour chaque époque, l'équation (4.5) est écrite $(n - 1)$ fois, où n est le nombre des satellites visibles. Après linéarisation par rapport à la position du point inconnu, nous sommes conduit à un système linéaire d'équations de la forme :

$$L = Ax + Bw + r \quad (4.42)$$

Avec :

- L vecteur $(n - 1) \times 1$ des doubles différences de phase,
- w vecteur $(n - 1) \times 1$ des ambiguïtés inconnues,
- x vecteur 3×1 des coordonnées inconnues,
- r vecteur $(n - 1) \times 1$ des bruits des observations,
- A et B matrices de liaisons.

Les ambiguïtés entières, sont inconnues et doivent être estimées en valeurs entières. Bruton (2000) explique qu'en positionnement cinématique pour les lignes de bases de longueur moyenne, l'effet de la non-fixation des ambiguïtés peut atteindre 10 cm sur les positions estimées. Il explique de plus qu'avec seulement des mesures de phase sur L1, il est quasiment impossible de figer les ambiguïtés. En revanche, une combinaison linéaire de L1 et L2 de type "wide-lane" permet d'obtenir les ambiguïtés entières.

Cette combinaison permet de résoudre l'ambiguïté "wide-lane", c'est à dire la différence des deux ambiguïtés $N1 - N2$, avec précision. Cette quantité entre ensuite comme une contrainte dans le système d'équation dans lequel il faut résoudre $N1$ et $N2$.

2.10.3. L'inversion du système

L'inversion du système (4.42) obtenu se fait par la méthode des moindres carrés. Des méthodes récursives comme les moindres carrés récursifs ou le filtrage de Kalman sont aussi utilisées pour le positionnement cinématique [SHI94]. Ce dernier est souvent appliqué pour obtenir un trajectoire en temps réel. Pour un post-traitement, plus de contraintes peuvent être considérées, par exemple en faisant les calculs une fois pour la trajectoire aller et une fois pour la trajectoire retour.

3. LES RESEAUX PERMANENTS

Un réseau permanent est constitué d'un ensemble de récepteurs GPS précis (double fréquence) qui sont en fonction de manière permanente sur des stations de référence (IGS⁷, RGP⁸).

⁶ Precise Point Positioning

⁷ International GNSS Service, précédemment International GPS Service

⁸ Réseau GPS Permanent

L'intérêt de ce type de réseau est multiple. Parmi les applications des réseaux mondiaux sont la détermination des orbites précises, l'étude des mouvements de la croûte terrestre, la définition de systèmes de références, etc. Leur utilisation pour le sondage atmosphérique de la troposphère et de l'ionosphère en est un autre aspect.

Les réseaux les plus denses sont certainement ceux mis en place pour les études sismiques. Le réseau du Japon avec 1200 stations permanentes et un traitement en temps réel est le plus prometteur pour l'avenir. Le réseau de la Californie est un autre exemple pour les applications de ce type.

Les réseaux régionaux sont essentiellement développés pour les applications différentielles DGPS (Wide Area Differential GPS (WADGPS) ou Local Area Differential GPS (LADGPS) etc). Avec ces réseaux on peut estimer les biais des mesures GPS en temps réel, les interpoler pour la région, et les envoyer vers les utilisateurs. Les moyens d'envoi de ces informations sont les signaux radios (station locale) et les satellites spécialisés. Depuis peu, on utilise de plus en plus internet pour envoyer les corrections.

3.1. Le réseau IGS

Le Service International du GPS (IGS) a été formellement reconnu en 1993 par l'Association Internationale de la Géodésie (IAG). Il fournit les éphémérides précises des satellites GPS et d'autres produits destinés aux applications géodésiques et géophysiques : paramètres d'orientation de la terre (EOP), corrections d'horloge des satellites, ... Ainsi, depuis janvier 1994, les orbites officielles basées sur les contributions des sept centres d'analyse de l'IGS, sont disponibles pour la communauté des utilisateurs.

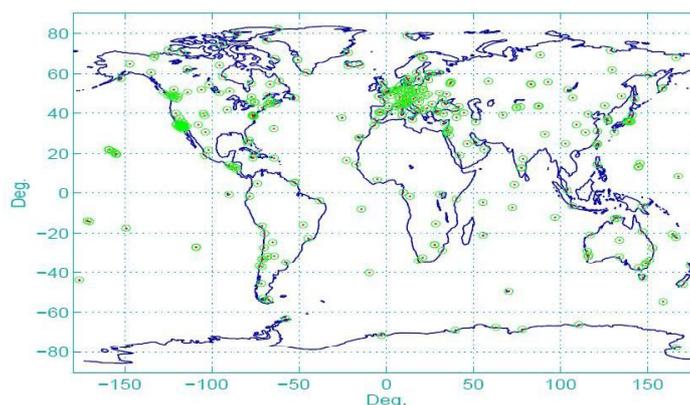


Figure 4.22. Le réseau IGS (International GNSS Service)

Depuis son établissement, l'IGS est structuré ainsi :

- Réseaux de stations,
- Centres globaux et régionaux de données,
- Centres d'analyses associés,
- Coordonnateur d'analyse,
- Bureau central,
- Conseil de direction international.

Les produits de l'IGS sont les suivants :

- les orbites et horloges des satellites GPS et GLONASS,
- Les coordonnées géocentriques et les vitesses des stations du réseau IGS,
- Les paramètres de rotation de la Terre et les mouvements du pôle,
- Les paramètres atmosphériques (Retard zénithal dû à la troposphère, modèles ionosphériques globaux...etc.).

Les produits de l'IGS sont présentés dans le tableau 3.1 où l'on peut voir leurs caractéristiques et leurs précisions.

1- Éphémérides GPS et horloges des satellites et des stations					
		Précision	Délai	Mise à jour	Intervalle
Radiodiffusées	orbites	~ 200 cm			
	horloge Sat. orbites	~ 7 ns ~ 10 cm	temps réel		quotidien
Ultra-Rapides (prédites)			temps réel	quatre fois par jour	15 min
Ultra-Rapides (observées)	horloge Sat. orbites	~ 5 ns < 5 cm			
			3 heures	quatre fois par jour	15 min
Rapides	horloge Sat. orbites	~ 0.2 ns < 5 cm			15 min
			17 heure	quotidien	
Finales	horloge Sat. & Stn. orbites	0.1 ns < 5 cm			5 min 15 min
			~13 jours	hebdomadaire	5 min
2- Éphémérides GLONASS (Satellites)					
		Précision	Délai	Mise à jour	Intervalle
Final		30 cm	4 semaines	hebdomadaire	15 min
3- Coordonnées géocentriques des stations de l'IGS (>130 sites)					
		Précision	Délai	Mise à jour	Intervalle
Positions Finales	horizontal	3 mm			
			12 jours	hebdomadaire	hebdomadaire
Vitesses Finales	vertical horizontal	6 mm 2 mm/an			
			12 jours	hebdomadaire	hebdomadaire
	vertical	3 mm/an			
4- Les Paramètres de Rotation de la Terre : Mouvement Polaire (PM)					
Taux de Mouvement Polaire (PM rate)		Précision	Délai	Mise à jour	Intervalle
Ultra-Rapides (prédits)	PM PM rate	0.3 mas 0.5 mas/jour			
			temps réel	quatre fois par jour	quatre fois par jour (00,06,12,18 UTC)
Ultra-Rapides (observés)	LOD PM PM rate	0.06 ms 0.1 mas 0.3 mas/jour			
			3 heures	quatre fois par jour	quatre fois par jour (00,06,12,18 UTC)
Rapides	LOD PM PM rate	0.03 ms < 0.1 mas < 0.2 mas/jour			
			17 heures	quotidien	quotidien(12 UTC)
Rapides	LOD PM PM rate	0.03 ms 0.05 mas < 0.2 mas/jour			
			13 jours	hebdomadaire	quotidien(12 UTC)
	LOD	0.02 ms			
5- Paramètres atmosphériques					
		Précision	Délai	Mise à jour	Intervalle
Délai Zénithal Troposphérique Final		4 mm	< 4 semaines	hebdomadaire	2 heures
Délai Zénithal Troposphérique Ultra-Rapide		6 mm	2-3 jours	3 heures	1 heures
Grille Ionosphérique (TEC)		2-8 TECU	~ 11 jours	hebdomadaire	2 heures ($5^\circ\lambda$, $2.5^\circ\varphi$)

Tableau 4.9. Les produits de l'IGS

CHAPITRE 5**APPLICATION DES DONNEES GPS POUR LA
LOCALISATION DE STATIONS GEODESIQUES****1. LE LOGICIEL GINS-PC (Géodésie par Intégrations Numériques Simultanées)****1.1. Présentation générale du logiciel GINS-PC**

Le logiciel GINS-PC (Géodésie par Intégrations Numériques Simultanées) est développé et maintenu par l'équipe de Géodésie Spatiale du CNES pour ses activités de recherche dans le cadre du Groupe de Recherches de Géodésie Spatiale (GRGS).

C'est un logiciel d'orbitographie précise appliquée à la géodésie spatiale qui permet la restitution de nombreux paramètres géodésiques ou physiques accessibles par les observations spatiales. Ces paramètres sont de trois types :

1. Géométrie (tels les positions de stations et du géocentre, les paramètres de rotation de la Terre ou des planètes),
2. Dynamique (tels les coefficients harmoniques sphériques du champ de gravité ou des marées, les coefficients des forces de surface, les paramètres de la thermosphère, des caractéristiques thermo-optiques du satellite).
3. De mesure (telles les corrections de délai troposphérique, de datation, de fréquence).

Ce logiciel comprend d'une part un processus d'intégration numérique des équations différentielles du mouvement d'un satellite ou d'une constellation de satellites dans un repère inertiel, en prenant en compte notamment l'ensemble des forces gravitationnelles et de surface agissant sur le satellite ainsi que le mouvement d'attitude spécifié du satellite selon son macro-modèle.

Il permet d'autre part l'ajustement, par la méthode des moindres carrés, des éphémérides produites ainsi que des autres paramètres grâce aux données de suivi géodésiques. En outre, il permet de traiter des données de types VLBI et Laser Lune.

GINS-PC est aussi un outil de géodésie planétaire qui permet de calculer la trajectoire d'un satellite artificiel autour de n'importe quel corps du système solaire : une planète, un satellite naturel, un petit corps ou le Soleil.

Sous le nom GINS-PC est compris une série de logiciels dépendants dont PREPARS qui rassemble et prépare l'information utile au traitement, les modules DYNAMO qui sont des modules de gestion et résolution des équations normales.

1.2. Architecture de GINS-PC

Le logiciel GINS-PC fonctionne sur une plate-forme Linux intégrant Perl, v5.8 et le module Tk utilisé pour développer l'interface graphique.

Il est divisé en deux parties distinctes. Une première étape, réalisée par le logiciel PREPARS extrait de la base de données tous les fichiers nécessaires au calcul, effectue les pré traitements et génère un fichier (FIC). Ce fichier sert d'entrée à la seconde étape : GINS-PC proprement dit.

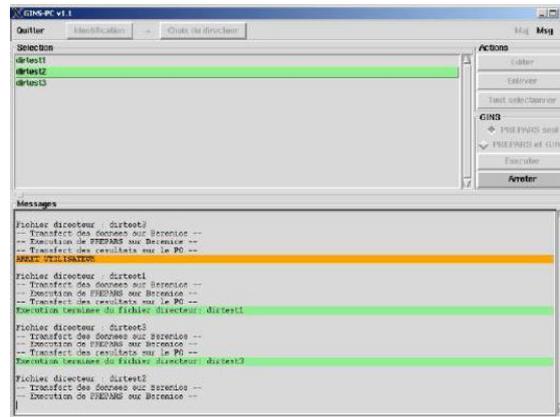


Figure 5.1. IHM du GINS-PC

Le logiciel GINS-PC possède une base de données qui est dupliquée sur la machine « Bérénice¹ », propriété du CNES, située sur le réseau sécurisé DTP de l’Observatoire Midi Pyrénées, le logiciel PREPARS est également installé sur Bérénice. Le logiciel GINS-PC en lui-même est installé sur le poste utilisateur.

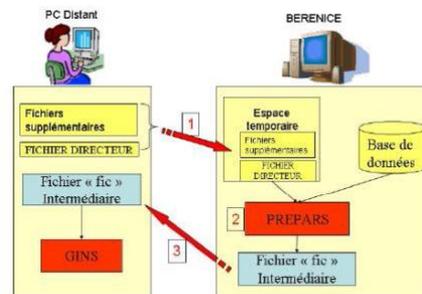


Figure 5.2. Connexion au logiciel GINS-PC

Les paramètres d’entrées sont stockés dans des bases de données dont les mises à jour sont réalisées fréquemment pour la pression atmosphérique, l’albédo et la charge atmosphérique (tous les 1.5 jour) ainsi que pour le modèle troposphérique ECMWF (tous les 3 jours). Cependant la base de données illustrée sur la figure 5.3. n’évolue que très peu dans le temps, sa mise à jour est effectuée chaque 10 jours.

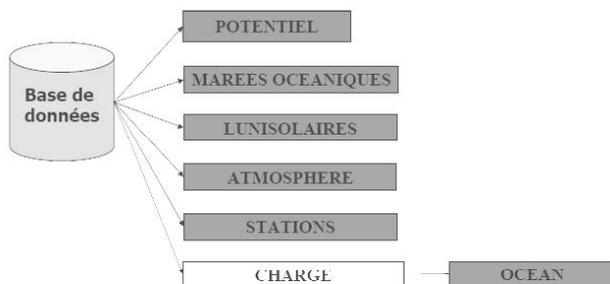


Figure 5.3. Base de données évoluant lentement dans le temps

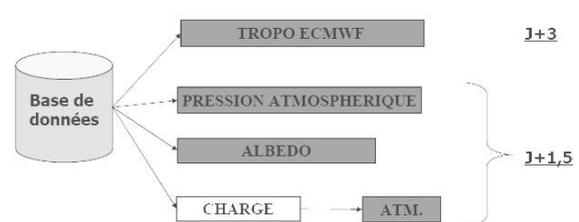


Figure 5.4. Base de données mise à jour fréquemment

¹ Station de travail SUN V40Z sous RedHat (24 Go de RAM, 1 To de disque)+ Baie de stockage Network Appliance de 7 To.

1.2.1. Les techniques de positionnement géodésique de haute précision prises en compte dans GINS-PC

Il existe cinq principales techniques de géodésie spatiale prises en charge par le logiciel GINS-PC:

La télémétrie laser sur satellite (SLR), sur la Lune (LLR), l'interférométrie à très longue base (VLBI), ainsi que les techniques de positionnement et d'orbitographie, GPS et DORIS.

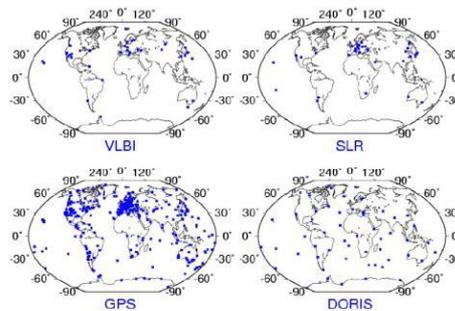


Figure 5.5. Répartition mondiale des techniques de géodésie spatiale.

Nous nous sommes intéressé à la technique GPS, car comme on peut le constater sur la figure 5.5., c'est la technique la plus utilisé dans le monde, et les données sont largement diffusées et mises à disposition des utilisateurs. D'autres part, une implémentation locale (au niveau de notre laboratoire par exemple) est facilement envisageable, car il suffit juste de s'équiper d'une antenne et d'un récepteur.

1.2.2. Description de la structure générale du logiciel GINS-PC

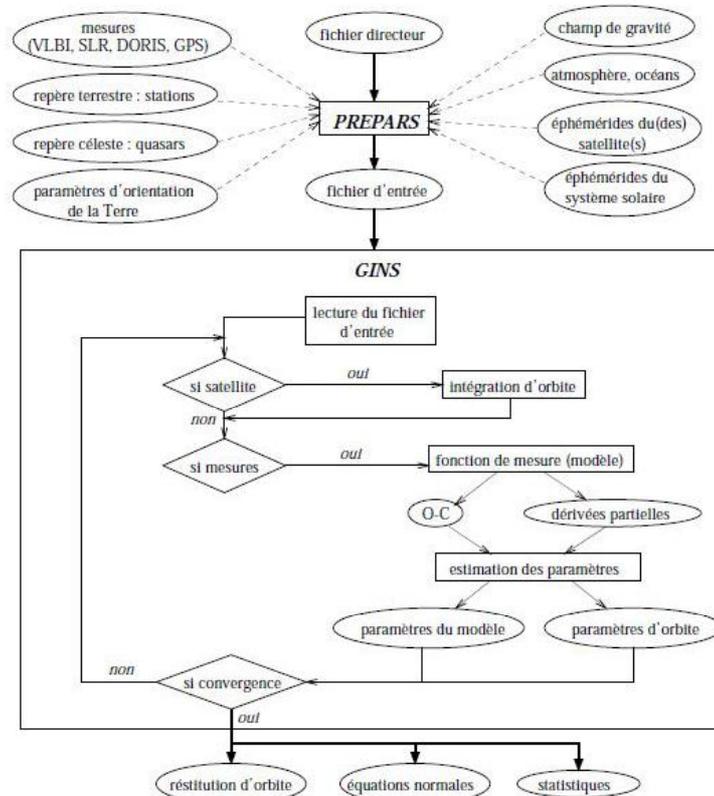


Figure 5.6. Structure générale du logiciel GINS-PC [MEY00]

Les quantités théoriques sont calculées, pour chaque type de mesure, à partir de la fonction de mesure. Ceci permet d'obtenir les résidus intervenant dans le membre de droite des équations normales. Les dérivées partielles du modèle sont à leur tour établies, ce qui permet de calculer la matrice normale. L'inversion de celle-ci est réalisée par la méthode de Cholesky [HAP2005]. Enfin, les paramètres dont on cherche une estimation sont calculés.

1.3. Le traitement des données GPS par le logiciel GINS-PC

Le traitement des données GPS par le logiciel GINS-PC est constitué par :

- Le rapatriement des fichiers de données (fichier RINEX).
- Le prétraitement des mesures de pseudo-distance et de phase.
- Le calcul des coordonnées et/ou de l'équation normale.
- L'extraction des solutions.
- La manipulation des équations normales.

Toutes ses étapes seront détaillées dans les prochains paragraphes.

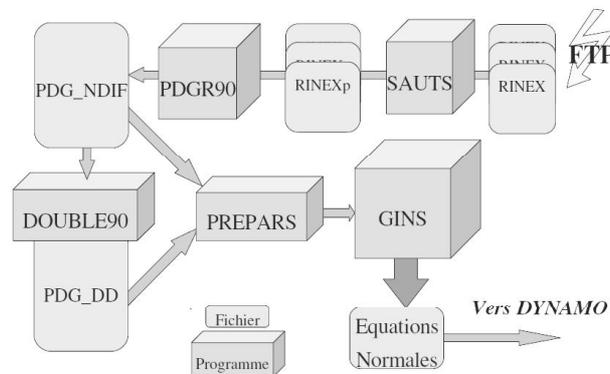


Figure 5.7. Structure de traitement des données GPS par le logiciel GINS-PC

1.3.1. Le rapatriement des données:

A la base de toute la pyramide du traitement PPP se trouve le rapatriement des données, sous forme de fichiers RINEX (ces derniers sont stockés au niveau de deux centres d'archivage de l'IGS : l'IGN et le CDDIS). Ces données sont rapatriées sous forme de fichiers compressés du type « *d.Z » contenant les fichiers d'observation et les fichiers de navigation (fichiers Broadcast). Ils doivent d'abord être décompressés à l'aide du programme CRZ2RNX afin de pouvoir être utilisés.

1.3.2. L'utilitaire de conversion cc2noncc

Suivant le type d'antenne réceptrice utilisée, il est parfois nécessaire d'effectuer une correction aux fichiers RINEX décompressés. Ceci est réalisé à l'aide du programme « cc2noncc ».

Les données fournies par les récepteurs de type cross-corrélation (C1, P2') (par exemple, AOA TURBOROGUE et Trimble 4000) ont des biais qui dépendent des satellites, contrairement aux observables (P1, P2) fournies par les récepteurs de nouvelle génération (par exemple, Ashtech Z-XII , AOA Benchmark / ACT, etc.). Pour éviter que des données se mélangent avec différents biais, ce qui pourrait dégrader la qualité des produits d'horloge de l'IGS, les centres d'analyse IGS ont adopté une convention commune de polarisation en modifiant les données des anciens récepteurs pour être compatibles avec les observables de nouvelle génération.

Cela consiste à transformer les données des récepteurs de type cross-corrélation par:

$$C1 \rightarrow C1 + f(i) \text{ [devient compatible avec le P1 moderne]}$$

$$P2' \rightarrow P2' + f(i) \text{ [devient compatible avec le P2 moderne]}$$

où les $f(i)$ sont les valeurs des biais à long terme $\langle P1-C1 \rangle_i$ pour les satellites PRN_i . De cette façon, un réseau de récepteurs mixte peut être utilisé avec cohérence.

De plus, quelques récepteurs non-cross-corrélation (par exemple, Leica CRS1000) fournissent C1 au lieu de P1. Pour ceux-ci, seul C1 est remplacé par $C1 \rightarrow C1 + f(i)$ [devient compatible avec le P1] et l'observable P2 est laissé inchangé.

Les fichiers de biais P1–C1 sont disponibles dans le dossier ‘archives’ de GINS et doivent être mis à jour avant chaque utilisation.

1.3.3. La détection et l'élimination des sauts de cycle

C'est le programme « prairie.v27 » qui se charge de la détection des sauts de cycle dans les mesures et autres aberrations de ce type.

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 .

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

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 (figure 5.8.).

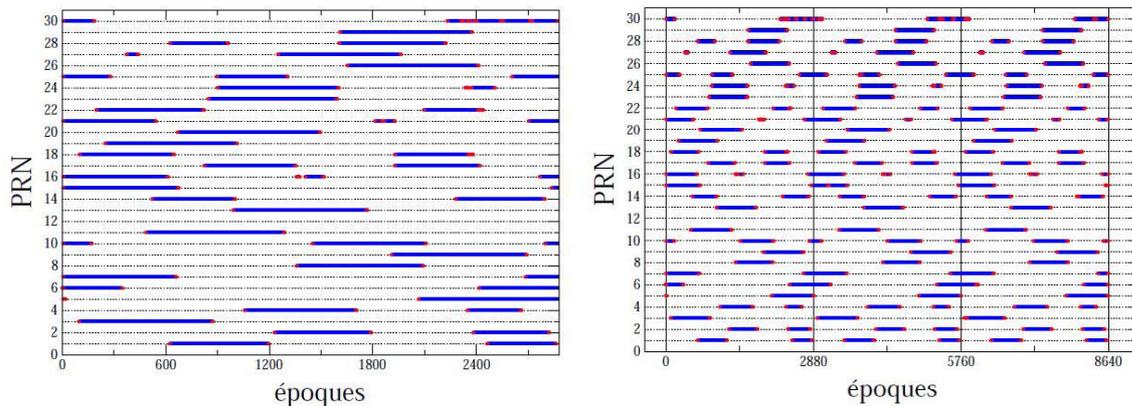


Figure 5.8. Illustration de l'intérêt de la détection des sauts sur 3 jours de données. Les passages sont représentés par des traits bleus interrompus par des sauts (points rouges). A gauche, le traitement sur 1 jour introduit des sauts artificiels aux dates 0 et 2880 secondes à cause de la troncature du fichier. A droite, le traitement sur 3 jours fait disparaître ces sauts.

1.3.4. 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) ;
- Lien des données avec le fichier station ;
- Lien des données avec le fichier satellite (ou fichier constellation) ;
- Lien des données avec un fichier d'horloges hautes ;
- Sélection éventuelle du pas des données ;
- Sélection éventuelle en fonction de l'élévation (nécessite un fichier d'orbites GPS).

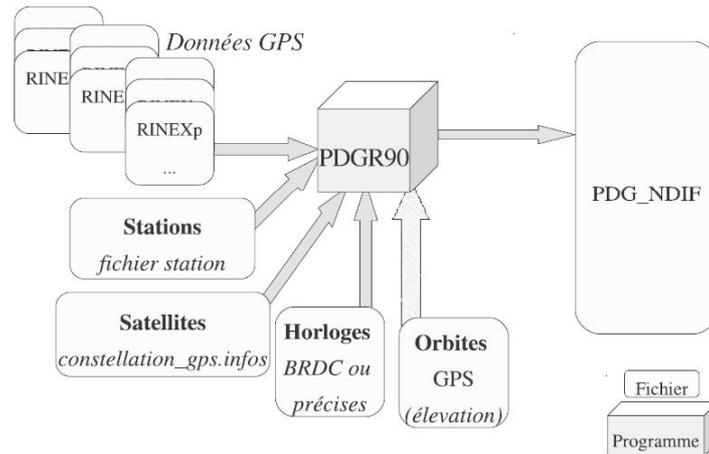


Figure 5.9. Fonctionnement du programme PDG90

Le programme lit l'ensemble des données proposées en entrée (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.

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

Les données en sortie de PDG90 peuvent être attachées 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*. Nous avons choisi de les attacher directement dans la ligne MESH2 du fichier directeur (voir § 2.1). Ces données sont présentes dans un fichier dont le nom doit avoir la syntaxe suivante : Nom de la station_date début arc_date fin arc.pra (Exemple : OH12_22280_22282.pra).

1.3.5. Formation des doubles différences

C'est le programme *DOUBLE90* qui permet de former les doubles différences. Il opère de la manière suivante :

- Lit le fichier de mesures non différenciées en sortie de *PDG90* ;
- Cherche les coordonnées des stations dans le fichier station pour calculer 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 ;
- Pour chaque ligne de base, forme les combinaisons indépendantes des satellites donnant le plus grand nombre de mesures ;
- Pour chaque ligne de base, calcule les doubles différences par passages, résout et corrige la wide-lane sur les doubles formées ;
- Écrit les données bi-fréquences au format GINS Doubles Différences.

1.3.6. Le programme PREPARS90

Après avoir effectué les prétraitements cités précédemment, un fichier de mesures compatible avec le logiciel GINS est maintenant disponible.

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).

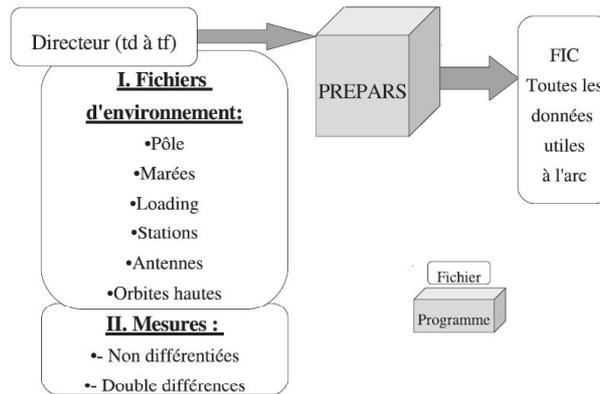


Figure 5.10.: Fonctionnement du programme PREPARS90

Les données en dehors de la période définie pour l'arc, les données basse-élévation et les données appartenant à des passages courts peuvent éventuellement être éliminées sur seuil à la demande, en modifiant les paramètres adéquats dans le fichier directeur. L'ensemble des mesures conservées est recopié dans le fichier avec l'extension «*.prepars» pour être par la suite transmis au programme GINS90.

1.3.7. Le programme GINS90

Le programme GINS90 calcule les quantités théoriques sur les observables non différenciés ou doubles différences iono-free, les résidus de mesure et les dérivées partielles des paramètres libérés.

GINS effectue plusieurs itérations entre lesquelles les paramètres de troposphère, les paramètres d'horloge, 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.

Paramètres	Symboles	Type NDIF / DDIF	Commentaires
Biais zénithal troposphérique	MZB	NDIF / DDIF	n paramètres par station
Horloge haute ou émetteur	MNG	NDIF	1 paramètre par satellite
Horloge récepteur	MNS	NDIF	1 paramètre par époque et par récepteur
Ambiguïté	MNA	NDIF	1 paramètre par passage
Ambiguïté double différence	MND	DDIF	1 paramètre par passage double différence
Coordonnées station	S(XYZ) S(PLH)	NDIF / DDIF	Libérable sur l'arc ou par période, en x,y,z ou ϕ, λ, h
Paramètres de rotation (pole)	PX, PY	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

Tableau 5.1. Paramètres géométriques libérables par GINS

GINS effectue 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.

La liste des paramètres de mesure et leurs caractéristiques est résumée dans le tableau 5.1.

2. CALCUL DES COORDONNEES DES STATIONS DU RESEAU IGS

Nous avons choisi d'utiliser les données GPS afin de localiser les cinq stations géodésiques suivantes : OPMT (située à l'Observatoire de Paris), OHI2 et OHI3 (situées à O' Higgin's en Antarctique) et USN3 et USNO (situées à Washington). Ces stations font partie du réseau permanent de l'IGS.

Le tableau 5.2. nous informe sur la localisation des stations géodésiques choisies en coordonnées géographiques (Longitude, Latitude et Altitude) dans le repère ITRF (International Terrestrial Reference Frame), ainsi que le type d'antenne réceptrice placée sur le site .

Station	Localisation	Longitude λ (Est)	Latitude Φ (Nord)	Hauteur (m)	Antenne réceptrice
OPMT	Paris	2.25°	48.51°	122.600	ASHTECH Z-XII3T
OHI2	Antarctique	-57.90°	-63.32°	32.500	JPS E_GGD
OHI3	Antarctique	-57.90°	-63.32°	32.600	LEICA GRX1200
USN3	Washington	-77.07°	38.92°	57.400	ASHTECH Z-XII3T
USNO	Washington	-77.07°	38.92°	48.900	ROGUE SNR-12 RM

Tableau 5.2. Informations sur les stations géodésiques à localiser.

2.1 Création du fichier directeur de traitement

2.1.1. Présentation

Le fichier directeur est un fichier de configuration du traitement dans lequel l'utilisateur va spécifier certains des paramètres du calcul qu'il souhaite faire, et choisir ce qu'il veut exécuter. Ce fichier a un rôle de paramétrage des tâches à réaliser lors de l'exécution de GINS-PC.

Le concept du fichier directeur de traitement n'est pas quelque chose de rigide ou figé, il est extensible et modifiable à souhaits. Il est fait pour évoluer en fonction des besoins, cependant, il doit être constitué des éléments suivants :

- Les fichiers d'environnement tels que le fichier stations, les fichiers modèles (celui de variation du centre de phase du récepteur, de surcharge océanique, de marées solides,...etc.), le fichier d'orbites (on peut y mettre les orbites précises de l'IGS par exemple, ou d'autres produits tels que les orbites CRC produites par le GRGS,...etc.), le fichier des mesures compatibles GINS-PC généré en sortie de PDGR90.
- Les dates de début et de fin d'arc.
- Les seuils, par itération, d'élimination des mesures de phase et de pseudo-distance en fonction des valeurs des résidus.

- La clé de libération des coordonnées stations : c'est à ce niveau que l'utilisateur choisit d'ajuster ou pas les coordonnées des stations en sortie de GINS-PC. Selon que l'on écrive la valeur -1 ou 2 on obtient respectivement des valeurs finales corrigées pour nos paramètres ou bien des équations normales à convergence.
- La clé déterminant le type de coordonnées en sortie : la valeur 0 pour cartésiennes ou 1 pour géographiques (radians).
- La clé de libération des vitesses de stations (1 : on libère, 0 : on ne libère pas). Nous n'avons jamais libérés les vitesses dans nos traitements.
- La clé permettant de spécifier l'intervalle de libération des coordonnées des stations.

Un exemple de fichier directeur GINS-PC est donné au §2.2.2, de manière à bien illustrer les propos ci-dessus et à apporter des éclairages supplémentaires sur la manière de lire un fichier de ce type.

2.1.2. Exemple d'un fichier directeur pour le traitement de la station IGS OPMT en mode statique

Le fichier donné ci-dessous est un fichier directeur type pour le traitement des données GPS pour la localisation et le suivi de la station OPMT située à Paris, pour les jours DOY (Day Of Year) 1, 2, 3 2011, correspondant au 1, 2 et 3 janvier 2011, en mode statique, avec libération des données tous les 24 heures.

Le fichier doit être constitué de quatre colonnes. La première colonne représente la « clé de prise en compte » du paramètre. La deuxième colonne contient soit le chemin des fichiers à utiliser (antex, stations, valeurs à priori...etc.) ou bien la valeurs des paramètres à renseigner. La troisième colonne décrit le paramètre en cours par un mot clé, et la dernière colonne donne le nom de l'élément signalétique du paramètre en question.

0	.....	gravi te	POTEN
0	.....	marees	MAROC
0	.....	baro.	BAROI
0	.....	press.	PRESA
0	.....	mss	SMOCE
0	.....	fl ux	CFLUX
0	.....	atmosphere	MATMO
0	.....	al bedo	ALBI R
1	pol e/eop97c04_i trf2005g	pol e	CPOLE
0	.....	cte	NUTTE
0	.....	ctr	NUTTR
1	l uni sol ai res/de405bdl f. ad	pl anetes	PLANE
0	.....	sat.	SATNA
0	.....	quasars	QUASA
1	stations/i trf2005s	stati ons	CSTAT
1	antex/igs_default. atx	antex	ANTEX
1	horl oges/IGS/default	hor	HORLH
0	.....	probl emes	PBSTA
0	.....	accel ero	ACCEL
1	charge/ocean/l oad_fes2004_i trf2005	l oading	OLOAD
1	charge/atmosphere/default	cont. l oad.	ALOAD
1	. temp. GINS/RAHAL/val eurs_a_pri ori _stati que	val eurs a pri	APRI O
0	.....	bul leti ns h1	BULH1
0	.....	bul leti ns h2	BULH2
0	.....	bul leti ns b1	BULB1
0	.....	bul leti ns b2	BULB2
2	orbi tes/GRG/default	mesures haut	MESH1
1	. temp. GINS/RAHAL/opmt_22280_22282. pra	mesures haut	MESH2
0	.....	mesures bas1	MESB1
0	.....	mesures bas1	MESB1
0	.....	mesures bas1	MESB1
0	.....	mesures bas2	MESB2
0	.....	mesures bas2	MESB2
0	.....	mesures bas2	MESB2
0	0 0 0 0 0 0 0 300	impressi on, el i mi nati on	IMPRE
0	0 0 0 0 -1 0	archi vage	ARCHI
22280	19.000000	date bulleti ns	BULCC
22280	19.000000 22282 19.000000	date debut/fin arc	DATDF
0	0.000000 0 0.000000 0 0.000000 0 0.000000		DATES
0	0.65400E-01 0.33060E+00 0.19600E-02 0.36700E-02 2000.00	pol e moyen(as)	POLEM
haut	-----		TYPES
0	0 2 0 0 3 0 0 000 0	ogv, l s, fc, ft, ps, mt, mo, rl , pa	FORCE
0	0 0 0 0		XXCDG

1 . temp. GINS/RAHAL/ohi 2_22280_22282.pra mesures haut MESH2
MESH2: Fichier 'Mesures 2, pris en compte (1) ou pas (0), suivi du nom du fichier.

22280 19.000000 22283 19.000000 date debut/fin arc DATDF
DATDF:

Date début d'arc en jours Juliens (CNES), suivi des secondes décimales dans le jour.
Date de fin d'arc en jours Juliens (CNES), suivi des secondes décimales dans le jour.
Les dates sont données en jour Julien et en TAI (TAI = TGPS + 19 secondes)

0 0 2 0 0 3 0 0 000 0 Ogv, l s, f c, f t, p s, m t, m o, r l, p a FORCE
FORCE:

gv : Accélération d'attraction gravitationnelle de la terre (0 : pas de calcul)
ls : Accélération d'attraction gravitationnelle de la lune et du soleil (0 : pas de calcul)
fc : Repère d'intégration (2 =Repère inertiel J2000)
ft : Accélération frottement atmosphérique (0 : pas de calcul)
ps : Accélération pression solaire (0 : pas de calcul)
mt : Accélération gravitationnelle de marées terrestres et polaires (3 : Modèle des conventions IERS2003)
mo : Accélération gravitationnelle de marées océaniques (0 : pas de calcul)
rl : Accélération relativiste (0 : pas de calcul)
pa : Accélération gravitationnelle de variation de pression atmosphérique (0 : pas de calcul)
Accélération due à l'émission thermique du satellite (0 : pas de calcul)
Prise en compte du fichier accélérométrie (Format CHAMP) (0 : pas de calcul)

-2 99 10 0 00240000 stations (lib, xyz, vit) LISTA
LISTA :

stations: libération des coordonnées de stations (-2 :ajustement à l'itération supplémentaire des coordonnées)
lib : Nombre de stations à ajuster (99 :ajustement de toutes les stations)
xyz : Ajustement des coordonnées des stations (0 : coordonnées cartésiennes, 1 : coordonnées géographiques)
vit : Ajustement de vitesse des stations (0 :pas d'ajustement, 1 : ajustement)
Ecriture dans le label de l'inconnue (0 : date du milieu de l'arc de la période traitée)
Fréquence d'ajustement des coordonnées à l'itération supplémentaire en jour/heure/minute/seconde (jjhhmmss=00240000 ⇔ ajustement toutes les 24 heures : En mode statique)

2.2. Utilisation de la méthode PPP (Precise Point Positioning) pour la localisation des stations IGS

2.2.1. Principe de la méthode PPP

Le Positionnement Ponctuel Précis PPP consiste à calculer une solution GPS pour une station donnée en mode statique ou cinématique, en utilisant des orbites et des corrections d'horloge satellite précises ainsi que les paramètres de rotation des pôles, déterminés par des centres d'analyse GPS à partir du réseau global de l'IGS [IGSxx]. Les seuls paramètres nécessitant d'être estimés sont alors les paramètres propres à la station (par exemple : position, troposphère, erreur d'horloge).

L'avantage du PPP est de diminuer de manière significative le temps de calcul puisqu'une seule station est traitée. Le temps de calcul augmente linéairement avec le nombre de stations du PPP et non de manière géométrique comme pour un traitement différentiel en réseau. Cependant, la précision des résultats dépend grandement de la précision des orbites et est généralement inférieure à celle obtenue pour un traitement différentiel. [BOS2008]