

2.2.2. Applicabilité de la méthode PPP

Comme le traitement PPP est basé sur des produits d'orbites et d'horloges précis qui sont de nature globale, on peut les utiliser pour traiter les observations GPS faites n'importe où sur la Terre et à toute heure du jour. La durée des séances d'observation est toutefois sujette aux restrictions suivantes :

Durée minimale de l'ensemble des données GPS :

Il n'y a pas de durée minimale pour une séance d'observation GPS. Toutefois, la qualité des positions calculées par la méthode PPP ne sera pas optimale tant que les ambiguïtés de la phase de la porteuse n'auront pas convergé. Pour des ensembles de données couvrant de brèves périodes, uniquement les observations de pseudodistances seront utilisées afin de calculer les positions.

Des ensembles de données couvrant une période plus longue permettront d'estimer les ambiguïtés, une condition essentielle pour calculées les positions qui utilisent les observations plus précises de la phase de la porteuse. Nous avons choisi de travailler avec une période de 300s pour le mode cinématique, ce qui permet de fixer largement les ambiguïtés de phase.

Durée maximale de l'ensemble des données GPS :

L'ensemble de données couvrant jusqu'à six jours peuvent être traités par la méthode PPP si le fichier d'observation RINEX non comprimé est d'une taille inférieure à 100 Mo. Si le fichier soumis dépasse les 100 Mo, la procédure sera interrompu.

Nous avons choisi de travailler avec des arc de 3 jours, car le traitement sur 3 jours fait disparaître les sauts artificiels, dus à la troncature du fichier de mesure, sur la durée voulue [Loy07].

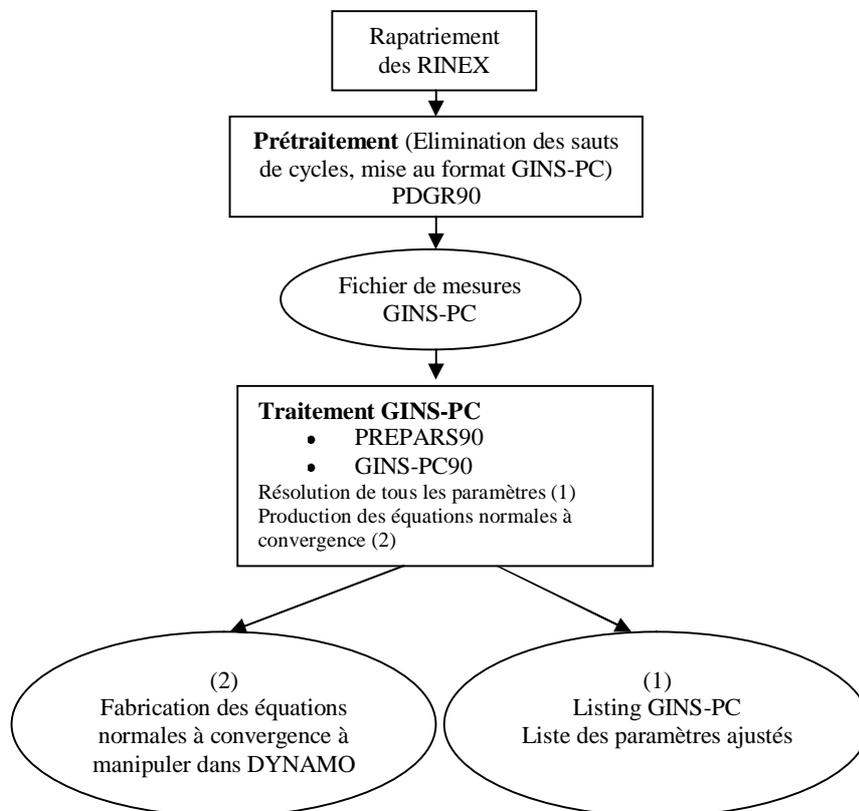


Figure 5.11. Organigramme de la chaîne de traitement PPP dans GINS-PC.

2.3. Localisation de la station OPMT en mode statique

Dans un premier temps nous avons localisé la station géodésique OPMT, située sur le toit du bâtiment B du laboratoire SYRTE de l’Observatoire de Paris, en mode statique. Ce mode consiste à observer l’information de phase pendant une longue durée (de une à plusieurs heures selon le type d’application).

L’avantage du positionnement statique est que le nombre de mesures recueillies sur une même station devient bien plus grand que le nombre d’inconnues à résoudre, d’où une plus grande précision du positionnement. On obtient ainsi, une solution cumulée puisque les observations sont cumulées pour calculer une position unique.

L’intérêt des temps d’observation longs est de pouvoir tirer parti des évolutions de la géométrie de la constellation, contribuant ainsi à une meilleure résolution des ambiguïtés entières et à une amélioration de la solution.

2.3.1. Localisation de la station OPMT en mode statique sur 3 jours (14/15/16 décembre 2011)

Le tableau 5.3. donne les valeurs à priori (contraintes) des coordonnées des stations (cartésiennes et géodésiques), des ambiguïtés, des horloges (émetteur et récepteur) et du délai zénithal troposphérique, choisies et éditées par l’utilisateur dans un fichier de type ‘txt’.

Nous avons édité ce fichier et l’avons nommé ‘valeurs_a_priori_statique’. Il est nécessaire ensuite d’indiquer son chemin dans le fichier directeur correspondant (ligne avec APRIO en dernière colonne)

1 . temp. GINS/RAHAL/valeurs_a_priori_statique valeurs_a_pri APRIO

Prise en compte de la valeur		Nom de l'élément signalétique	Valeurs à priori de l'élément	sigma	Commentaires
0	1	[SX????????????????????]	0.00E+00	1.00E+00	Coordonnées cartésiennes de la station x, y, z
0	1	[SY????????????????????]	0.00E+00	1.00E+00	
0	1	[SZ????????????????????]	0.00E+00	1.00E+00	
0	1	[SH????????????????????]	0.00E+00	1.00E+00	Coordonnées géodésiques de la station h, φ, λ
0	1	[SP????????????????????]	0.00E+00	1.00E-05	
0	1	[SL????????????????????]	0.00E+00	1.00E-05	
0	1	[MNA????????????????????]	0.00E+00	2.00E+00	Ambiguïtés
0	1	[MNG????????????????????]	0.00E+00	3.00E+04	Horloge haute ou émetteur
0	1	[MNS????????????????????]	0.00E+00	3.00E+04	Horloge récepteur
0	1	[MZB????????????????GPS]	0.00E+00	3.00E-01	Biais zénithal troposphérique

Tableau 5.3. Fixation des valeurs à priori des paramètres coordonnées et biais.

Il est possible d’affecter les valeurs à priori de l’élément dans ce fichier, mais nous avons préféré n’affecter aucune valeur, afin que le programme aille les chercher à partir des fichiers d’entrée : RINEX et ANTEX. Cependant il est nécessaire d’affecter des contraintes (sigma), ceci au cas où il n’y a pas de mesures disponibles à certains moments (avoir des contraintes permet de réaliser quand même l’inversion).

Les points d’interrogation à la suite des éléments signalétiques, indiquent qu’il faut affecter ces valeurs à tous les satellites GPS.

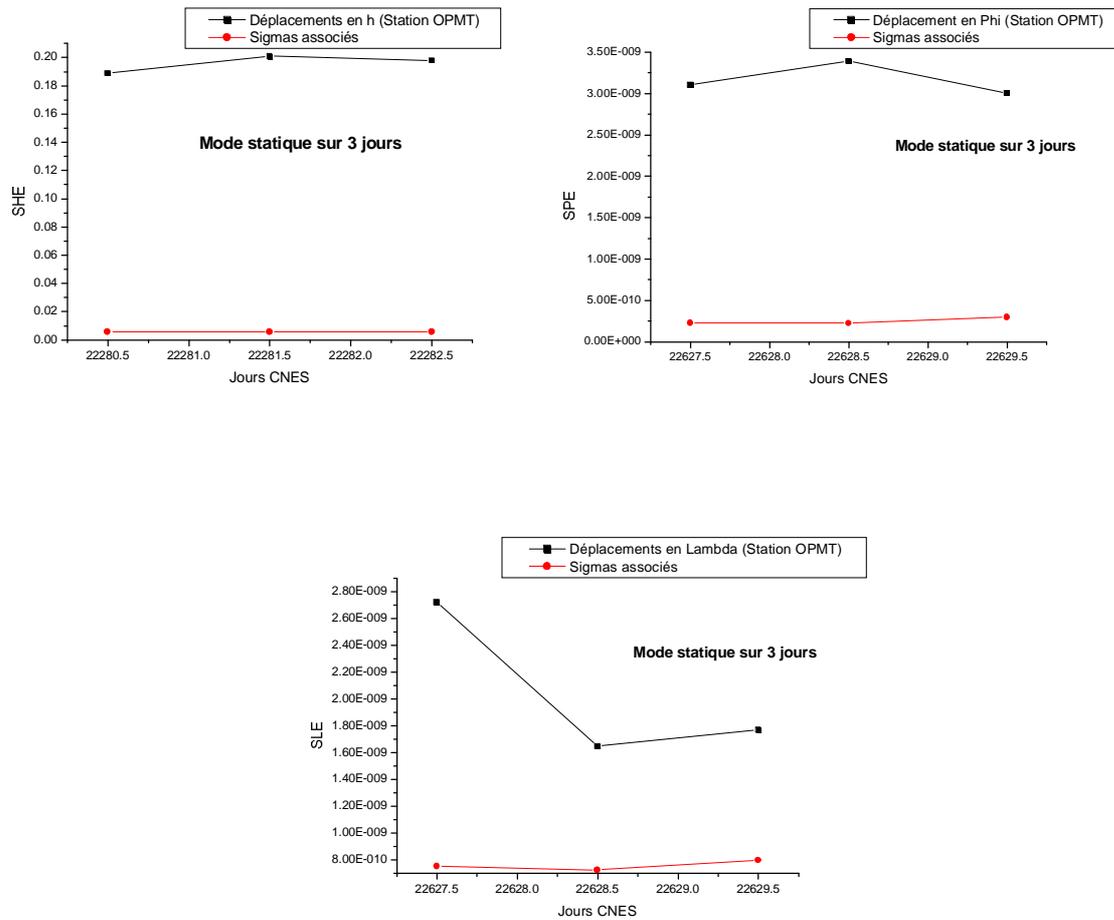


Figure 5.12. Déplacements de la station OPMT en hauteur h (SHE), longitude λ (SLE), et latitude ϕ (SPE) sur les 3 jours 14/15/16 décembre 2011

La figure 5.12. représente les déplacements de la station OPMT, en latitude (ϕ), longitude (λ) et hauteur (h), pour les 3 jours Julien CNES 22627, 22628 et 22629 correspondant au 14, 15 et 16 décembre 2011. Les mesures sont libérées toutes les 24h (3 mesures au final), avec une lecture et cumulation de données toutes les 300 s. Ce qui engendre 288 mesures cumulées pour le calcul d'une position.

Les courbes en rouge représentent les sigmas associé aux mesures. Il s'agit de l'erreur formelle calculée à posteriori, qui caractérise la dispersion des valeurs par rapport à la moyenne. Un écart type élevé peut éventuellement signaler l'existence d'une valeur aberrante.

Les coordonnées Est (longitude) et Nord (latitude) sont données en radians. Les valeurs sont données par rapport à l'a priori utilisé en entrée (fichier station). En h l'appoint est donnée par rapport à l'a priori aussi mais cette fois il est en mètre.

Pour convertir les appoints radians en m, il faut multiplier :

- La latitude (ϕ), par le rayon terrestre³ $R_{\text{terre}} = 6360 \cdot 10^3 \text{m}$
- La longitude (λ) par $\cos(\text{lat}) \cdot R_{\text{terre}}$.

³ En utilisant le système géodésique WGS84 (World Geodetic System)

	SLE (rad)	Sigmas (rad)	Déplacement Est (m)	Sigmas (m)
14/12/2011	2.72E-09	7.55E-10	1.15E-02	3.18E-03
15/12/2011	1.65E-09	7.27E-10	6.95E-03	3.06E-03
16/12/2011	1.77E-09	8.00E-10	7.47E-03	3.37E-03
Moyenne			8.63E-03	3.20E-03

Tableau 5.4. Bilan de la variation moyenne de la composante horizontale λ (en m) le 14/15/16 décembre 2011

	SPE (rad)	Sigmas (rad)	Déplacement Nord (m)	Sigmas (m)
14/12/2011	3.11E-09	2.28E-10	1.98E-02	1.45E-03
15/12/2011	3.40E-09	2.26E-10	2.16E-02	1.43E-03
16/12/2011	3.01E-09	2.99E-10	1.91E-02	1.90E-03
Moyenne			2.02E-02	1.59E-03

Tableau 5.5. Bilan de la variation moyenne de la composante horizontale ϕ (en mètres) le 14/15/16 décembre 2011

	SHE (m)	Sigma (m)
14/12/2011	1.89E-01	5.79E-03
15/12/2011	2.01E-01	5.70E-03
16/12/2011	1.98E-01	5.75E-03
Moyenne	1.96E-01	5.75E-03

Tableau 5.6. Bilan de la variation moyenne de la composante verticale h le 14/15/16 décembre 2011

Nous remarquons que les déplacements horizontaux (latitude et longitude) sont faibles, avec une moyenne de 8.3 mm pour la longitude λ et de 2.01 cm pour la latitude ϕ . Cependant les déplacements verticaux sont relativement plus importants, avec une moyenne de 19.6 cm.

Ces résultats confirment les travaux sur les déplacements géodésiques horizontaux et verticaux effectués par [BER09] et [BOU00], qui indiquent que la composante verticale est au moins deux fois plus perturbée que la composante horizontale.

Les incertitudes (sigmas) associées aux mesures, permettent une meilleure évaluation des déplacements obtenus en leur associant un degré de fiabilité. En mode statique nous pouvons constater que les incertitudes sont faibles, ce qui confère une grande fiabilité aux mesures.

2.3.2. Localisation de la station OPMT en mode statique sur les 3 jours 1/2/3 janvier 2011 avec un intervalle de collecte de données I de 300s.

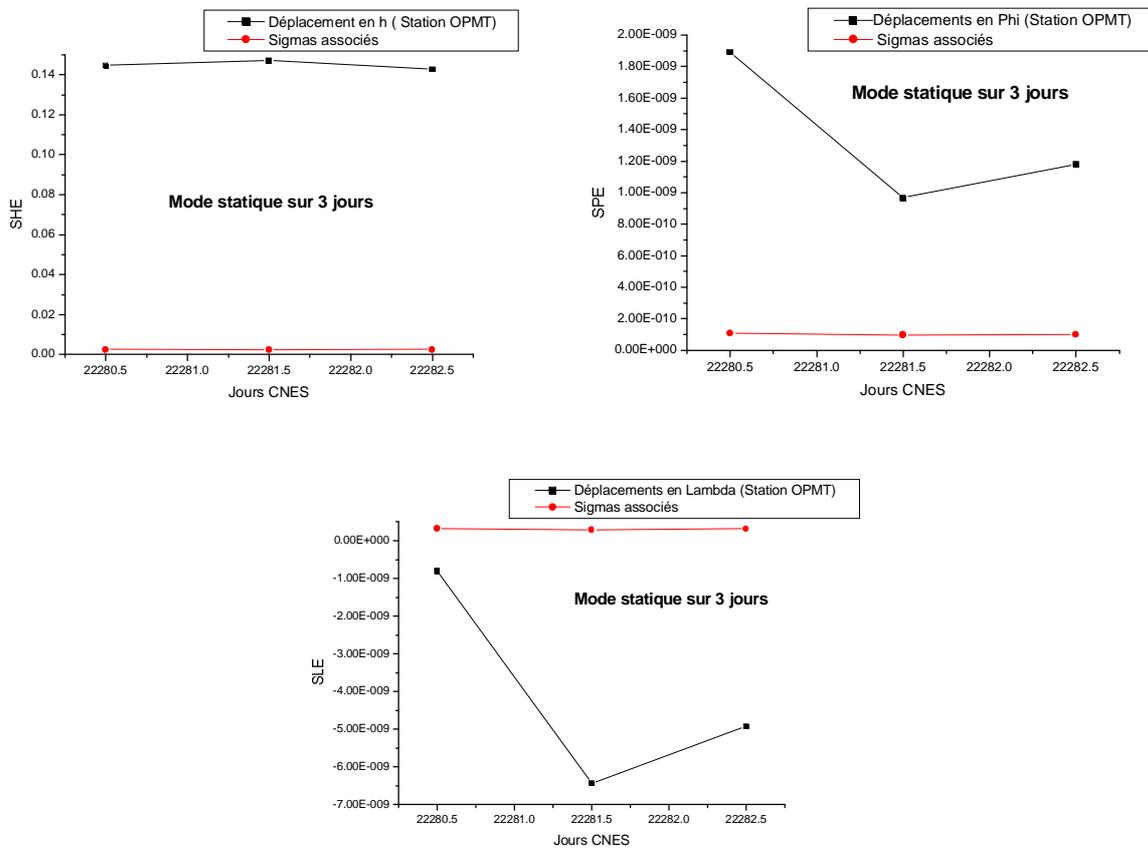


Figure 5.13. Déplacements de la station OPMT en hauteur h (SHE), longitude λ (SLE), et latitude ϕ (SPE) sur les 3 jours 1/2/3 janvier 2011 pour $I=300s$

	SLE (rad)	Sigmas (rad)	Déplacement Est (m)	Sigmas (m)
01/01/2011	-7.98E-10	3.28E-10	-3.36E-03	1.38E-03
02/01/2011	-6.43E-09	2.85E-10	-2.71E-02	1.20E-03
03/01/2011	-4.92E-09	3.15E-10	-2.07E-02	1.33E-03
Moyenne			-1.71E-02	1.30E-03

Tableau 5.7. Bilan de la variation moyenne de la composante horizontale λ (en mètres) le 1/2/3 janvier 2011 pour $I=300s$

	SPE (rad)	Sigmas (rad)	Déplacement Nord (m)	Sigmas (m)
01/01/2011	1.89E-09	1.08E-10	1.20E-02	6.88E-04
02/01/2011	9.68E-10	9.83E-11	6.16E-03	6.25E-04
03/01/2011	1.18E-09	9.98E-11	7.51E-03	6.34E-04
Moyenne			8.56E-03	6.49E-04

Tableau 5.8. Bilan de la variation moyenne de la composante horizontale ϕ (en mètres) le 1/2/3 janvier 2011 pour $I=300s$

	SHE (m)	Sigma (m)
01/01/2011	1.45E-01	2.54E-03
02/01/2011	1.47E-01	2.34E-03
03/01/2011	1.43E-01	2.50E-03
Moyenne	1.45E-01	2.46E-03

Tableau 5.9. Bilan de la variation moyenne de la composante verticale h le 1/2/3 janvier 2011 pour I = 300s

Nous pouvons constater que les déplacements horizontaux (latitude et longitude) son faibles, avec une moyenne de -1.7 cm pour la longitude λ (le signe « - » indique que le déplacement a eu lieu vers l'ouest). La moyenne de déplacement de la station en latitude ϕ est de 8.56 mm. Cependant, comme pour le cas précédent, les déplacements verticaux sont élevés, avec une moyenne de 14.5 cm sur 3 jours.

2.3.3. Localisation de la station OPMT en mode statique sur les 3 jours 1/2/3 janvier 2011 avec un intervalle de collecte de données de 30s.

Nous avons choisi de reprendre le même traitement que le paragraphe précédent (§2.2.2) mais en choisissant un intervalle de collecte de données plus petit, fixé à 30s, en modifiant la ligne IMPRE du fichier directeur utilisé comme suit :

0 0 0 0 0 0 0 0 300 i m p r e s s i o n , e l i m i n a t i o n I M P R E

Par :

0 0 0 0 0 0 0 0 30 i m p r e s s i o n , e l i m i n a t i o n I M P R E

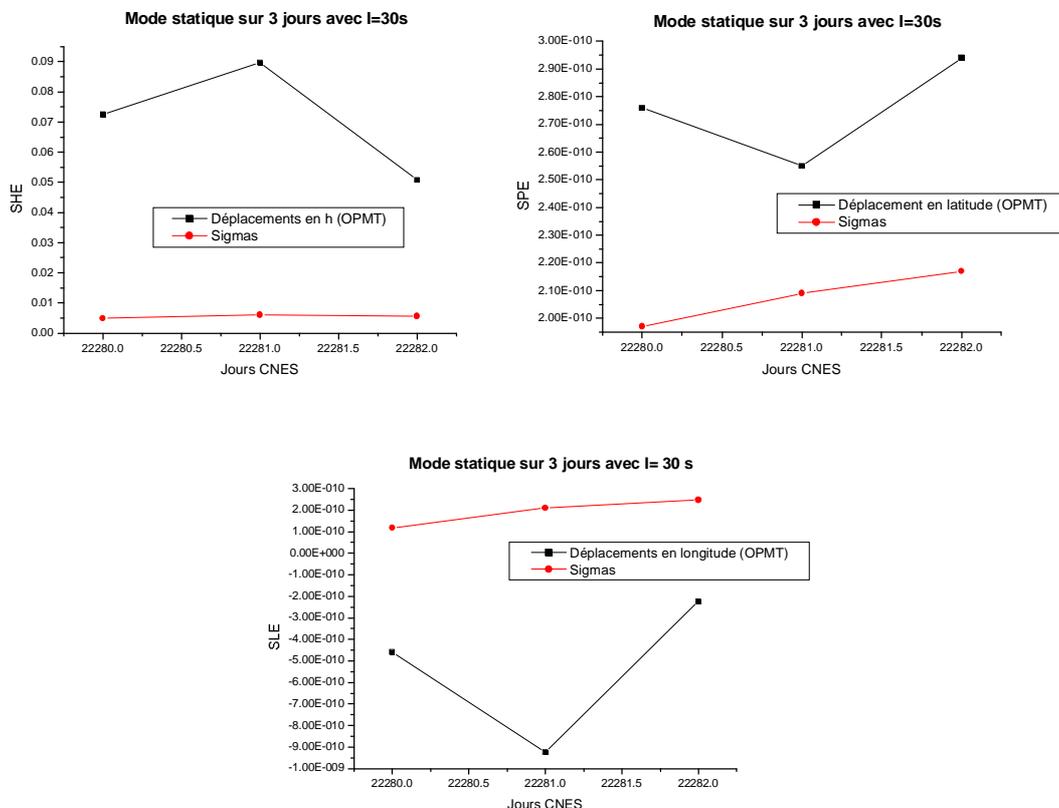


Figure 5.14. Déplacements de la station OPMT en hauteur h (SHE), longitude λ (SLE), et latitude ϕ (SPE) sur les 3 jours 1/2/3 janvier 2011 pour I = 30s

I=30s	SLE (rad)	Sigmas (rad)	Déplacement Est (m)	Sigmas (m)
	01/01/2011	-4.58E-10	1.17E-10	-1.93E-03
02/01/2011	-9.24E-10	2.09E-10	-3.89E-03	8.81E-04
03/01/2011	-2.23E-10	2.47E-10	-9.40E-04	1.04E-03
Moyenne			-2.25E-03	1.30E-03

Tableau 5.10. Bilan de la variation moyenne de la composante horizontale λ (en mètres) le 1/2/3 janvier 2011 pour I = 30s

I=30s	SPE (rad)	Sigmas (rad)	Déplacement Nord (m)	Sigmas (m)
	01/01/2011	2.76E-10	1.97E-10	1.76E-03
02/01/2011	2.55E-10	2.09E-10	1.62E-03	1.33E-03
03/01/2011	2.94E-10	2.17E-10	1.87E-03	1.38E-03
Moyenne			1.75E-03	1.30E-03

Tableau 5.11. Bilan de la variation moyenne de la composante horizontale ϕ (en mètres) le 1/2/3 janvier 2011 pour I = 30s

I=30s	SHE (m)	Sigma (m)
01/01/2011	7.25E-02	4.94E-03
02/01/2011	8.97E-02	6.02E-03
03/01/2011	5.08E-02	5.63E-03
Moyenne	7.10E-02	5.53E-03

Tableau 5.12. Bilan de la variation moyenne de la composante verticale h le 1/2/3 janvier 2011 pour I = 30s

Nous remarquons que les résultats obtenus avec plus de données collectées (10 fois plus de données que le traitement statique avec I=300s), sont bien plus précis et surtout plus cohérents, car les sigmas associés aux mesures ont approximativement le même ordre de grandeurs que les variations de la position.

Nous obtenons des déplacements de l'ordre du millimètre pour les composantes horizontales (Longitude et Latitude) avec des sigmas associés du même ordre. Pour la composante verticale h, les déplacements enregistrés sont inférieurs à 10 cm, ce qui est moins important qu'avec un I=300s.

Cependant l'augmentation de la quantité de données collectées augmente le temps de transfert de ces derniers. Nous avons d'ailleurs ressenti une lourdeur au niveau du temps de calcul du logiciel GINS qui met à peu près 15 mn pour l'aboutissement des calculs pour une collecte de données toutes les 30 secondes.


```
GPS_ELEVPHASE OFF
LGAIN 2
GPS_HAUTE_FREQ OHI 2
GPS_SORTI_E_MESURES
COMMNT_MNA_EQNA
```

```
LFREE
LFREE
LFREE
LFREE
LFREE
```

Pour toutes les autres localisations, nous avons utilisé le même fichier directeur, en modifiant à chaque fois les paramètres adéquats, comme par exemple les fichiers stations, l'arc de localisation (dates de localisation), la cadence de libération des données, les fichiers à priori...etc.

2.4.2. Localisation de la station USN3 avec la méthode PPP sur les 3 jours

Dans ce paragraphe, nous avons voulu évaluer la méthode PPP, en comparant les résultats qu'elle fournit avec la méthode statique.

Les figures 5.15. , 5.16 et 5.17 , représentent respectivement la variation de la composante verticale h , de la latitude ϕ et de la longitude λ , de la station USN3 en mode cinématique sur les 3 jours Juliens CNES 22450, 22451, 22452, correspondants au 20, 21 et 22 juin 2011, avec libération des données toutes les 5 minutes (288 mesures libérées par jours)

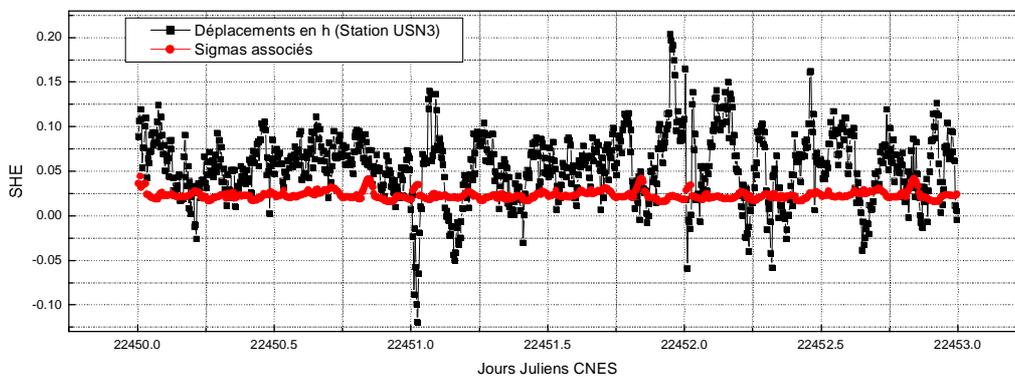


Figure 5.15. Variation de la composante verticale de la station USN3 en mode cinématique sur 3 jours (JJ CNES 22450, 22451, 22452) en libérant les données toutes les 5 minutes.

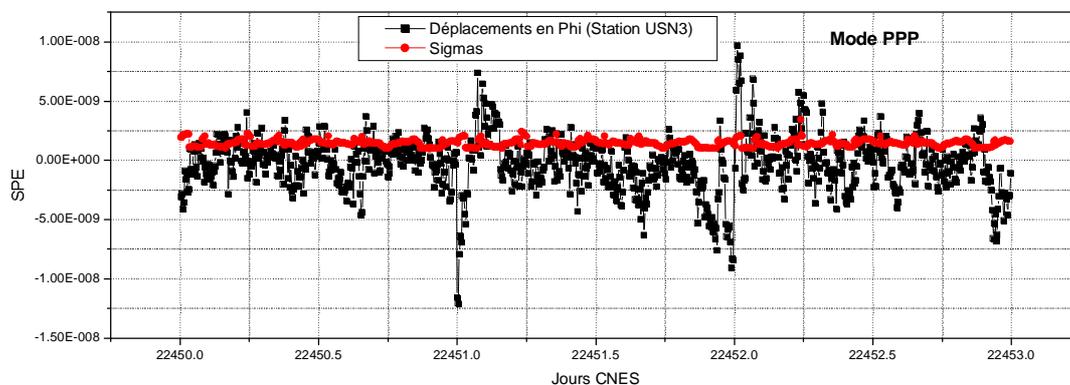


Figure 5.16. Variation de la latitude ϕ de la station USN3 en mode cinématique sur 3 jours (JJ CNES 22450, 22451, 22452) en libérant les données toutes les 5 minutes.

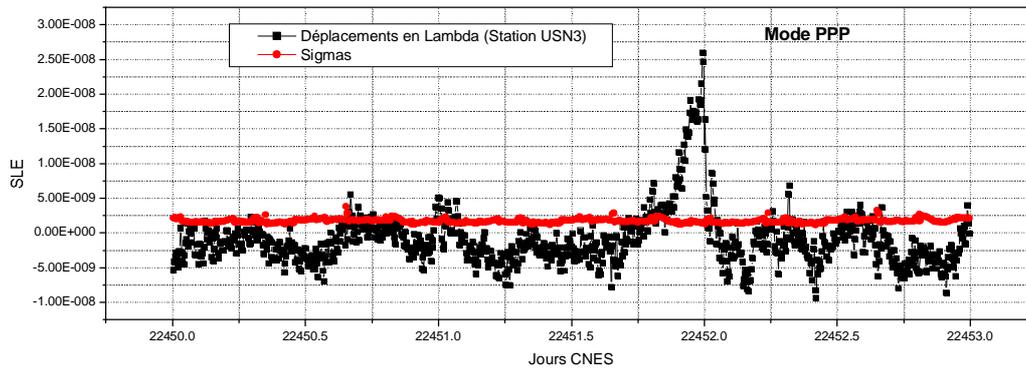


Figure 5.17. Variation de la longitude λ de la station USN3 en mode cinématique sur 3 jours (JJ CNES 22450, 22451, 22452) en libérant les données toutes les 5 minutes.

Nous pouvons observer sur les séries temporelles obtenues, des signaux parasites. Nous pouvons différencier deux types : des sauts à minuit qui sont facilement reconnaissables car visibles lors du changement de jour (situés à JJ CNES = 22451.0 et JJ CNES = 22452.0) et les sauts en milieu d'arc dus à la mauvaise résolution des ambiguïtés. Ce type de signal a déjà été noté par King M.C. [KIN03] et semblerait être induit par la mauvaise résolution de certains signaux de marée.

Ces sauts ne sont pas systématiques, mais apparaissent pour des solutions qui sont moins stables (par exemple lorsque moins de satellites sont en visibilité) [POR10].

2.4.3. Comparaison entre le traitement PPP et le traitement DD

Dans ce qui suit, nous avons choisi de localiser les stations OHI2, OHI3 en mode PPP ZD (non différencié) pour le JJ CNES 22281, puis de re-localiser la station OHI2 en utilisant la méthode des Doubles Différences (Différence de deux simples différences à un instant donné entre deux satellites et deux récepteurs.), en utilisant successivement la station OHI3 puis la station USN3 comme station de référence.

a- Comparaison de la composante verticale h du déplacement en mode PPP et en mode DD :

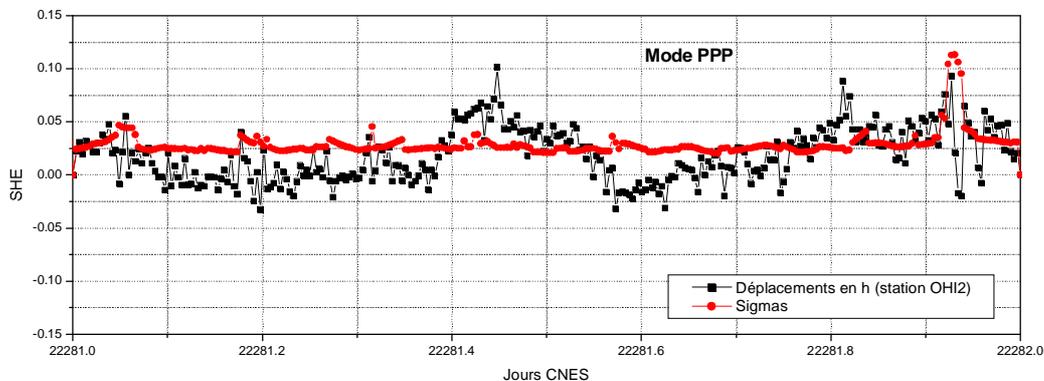


Figure 5.18. Variation de la hauteur h de la station OHI2 en Traitement PPP

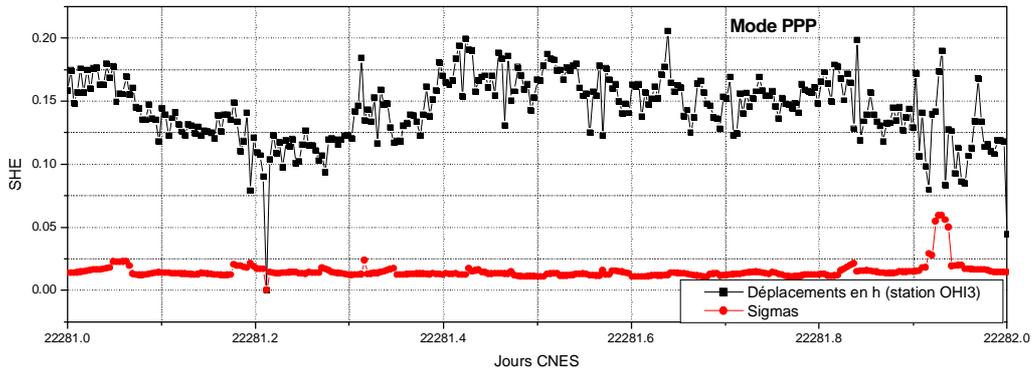


Figure 5.19. Variation de la hauteur h de la station OHI3 en Traitement PPP

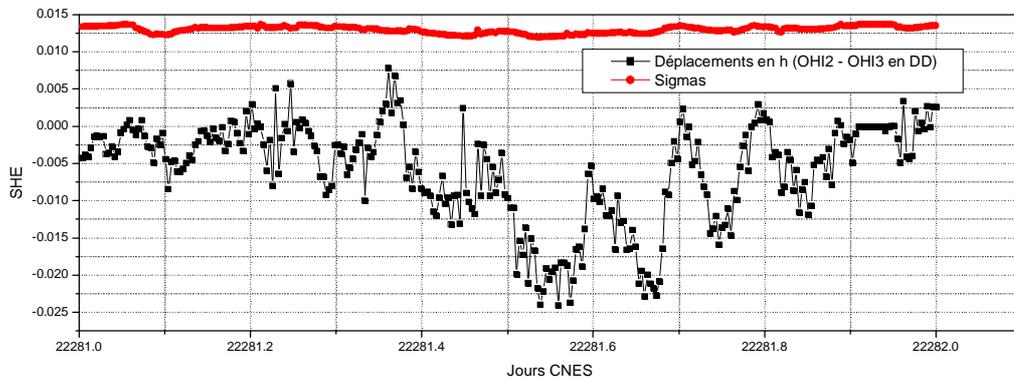


Figure 5.20. Variation de la hauteur h de la station OHI2 en mode DD (OHI2-OHI3)

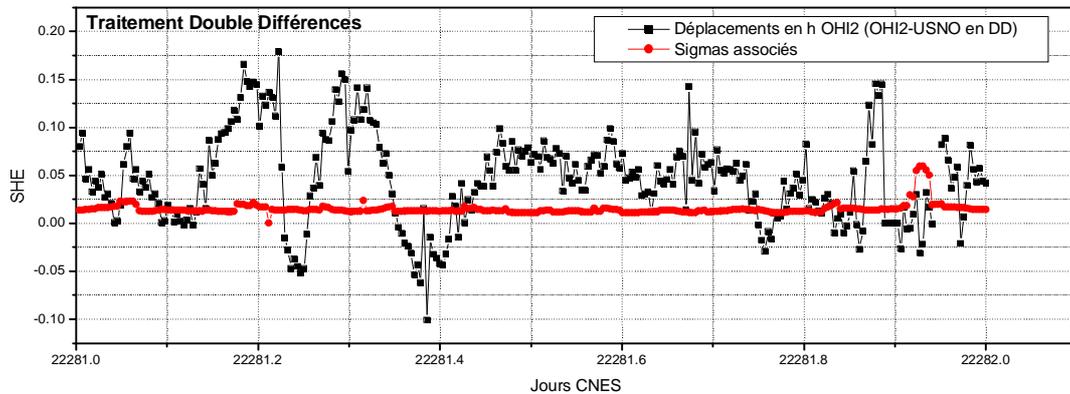


Figure 5.21. Variation moyenne de la hauteur h de la station OHI2 en mode DD (OHI2-USNO)

	SHE (m)	Sigma (m)
OHI2 PPP	0.01881359	0.0285883
OHI3 PPP	0.14393924	0.01472847
OHI2-OHI3 DD	-0.00594902	0.01097819
OHI2-USNO DD	0.05318751	0.01472847

Tableau 5.13. Bilan de la variation moyenne de la composante verticale h , le 2 janvier 2011, pour un traitement PPP et DD

b- Comparaison de la composante horizontale λ (longitude) du déplacement en mode PPP et en mode DD :

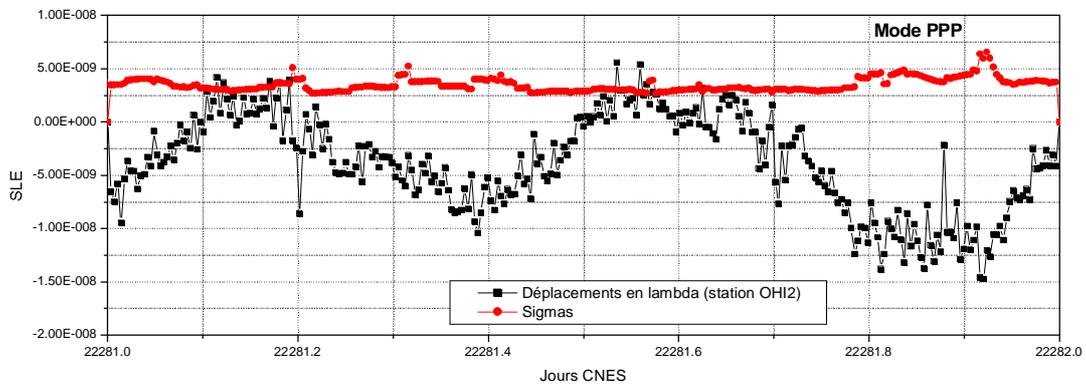


Figure 5.22. Variation de la longitude λ de la station OHI2 en Traitement PPP

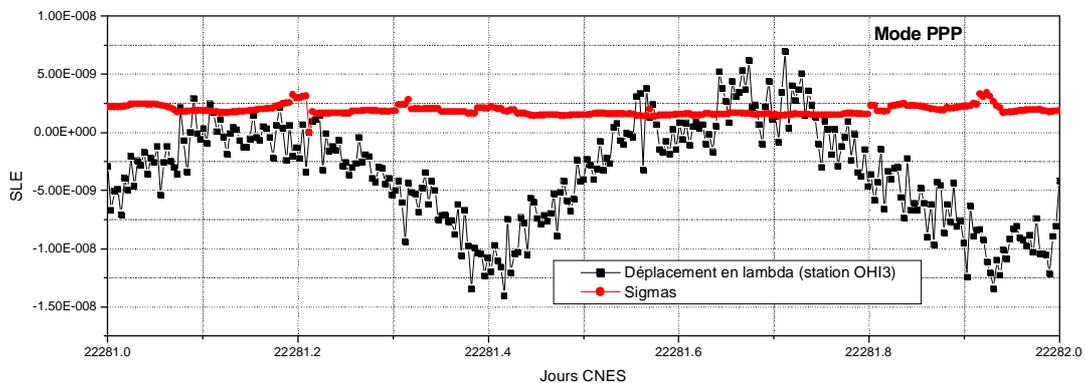


Figure 5.23. Variation de la longitude λ de la station OHI3 en Traitement PPP

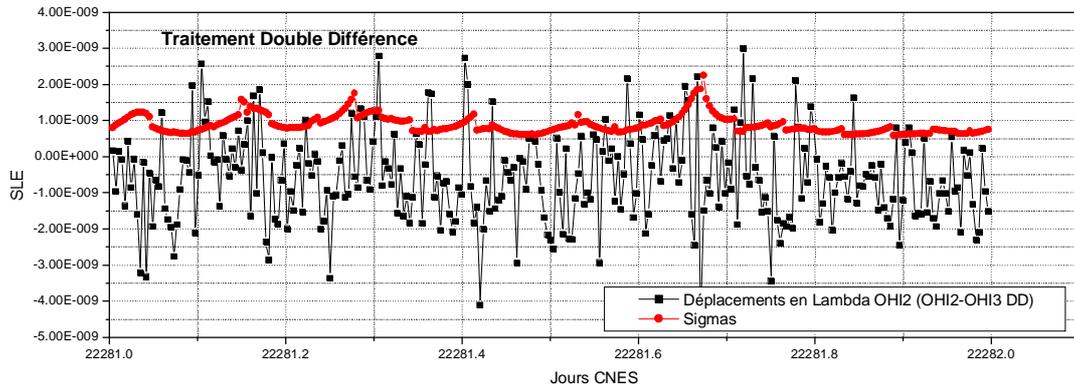


Figure 5.24. Variation de la longitude λ de la station OHI2 en mode DD (OHI2-OHI3)

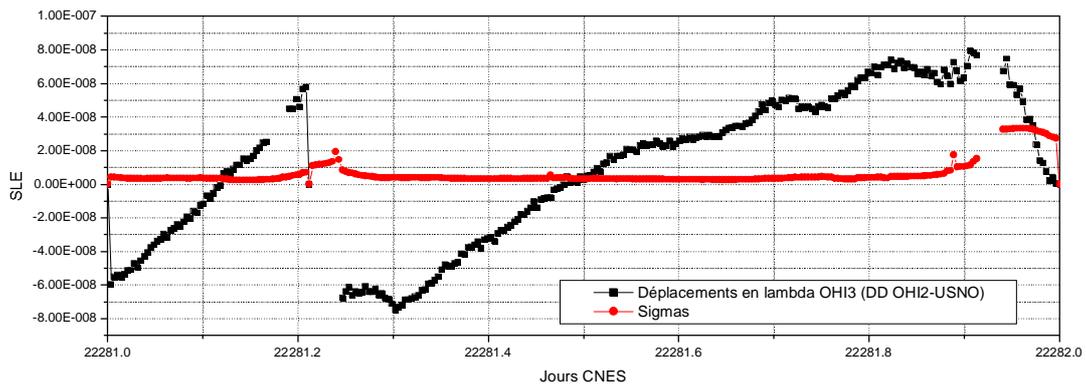


Figure 5.25. Variation de la longitude λ de la station OHI2 en mode DD (OHI2-USNO)

		SLE (rad)	Sigmas (rad)	Déplacement Est (m)	Sigmas (m)
OHI2	PPP	-3.82E-09	3.47E-09	-2.15E-02	1.95E-02
OHI3	PPP	-3.39E-09	1.87E-09	-1.90E-02	0.0104969
OHI2 - OHI3	DD	-5.79E-10	8.81E-10	-8.53E-03	4.20E-03
OHI2 - USNO	DD	8.91E-09	5.89E-09	4.62E-02	0.03231011

Tableau 5.14. Bilan de la variation moyenne de la longitude λ , le 2 janvier 2011, pour un traitement PPP et DD

c- Comparaison de la composante horizontale ϕ (Latitude) du déplacement en mode PPP et en mode DD :

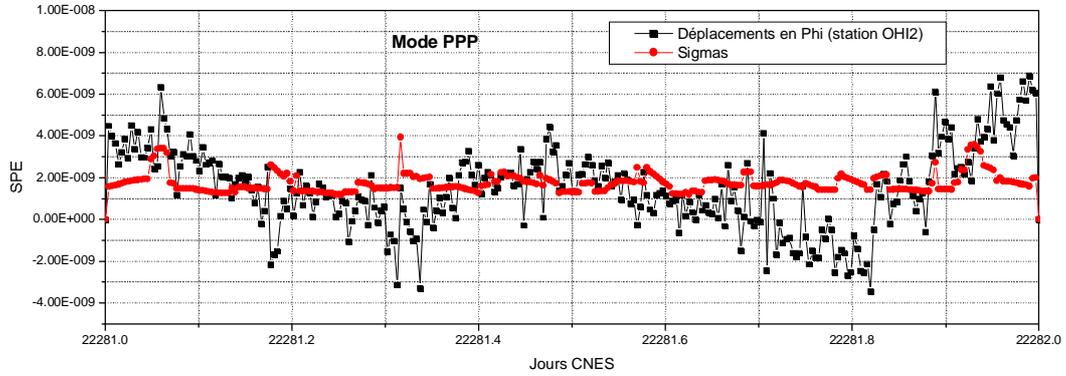


Figure 5.26. Variation de la latitude ϕ de la station OHI2 en Traitement PPP

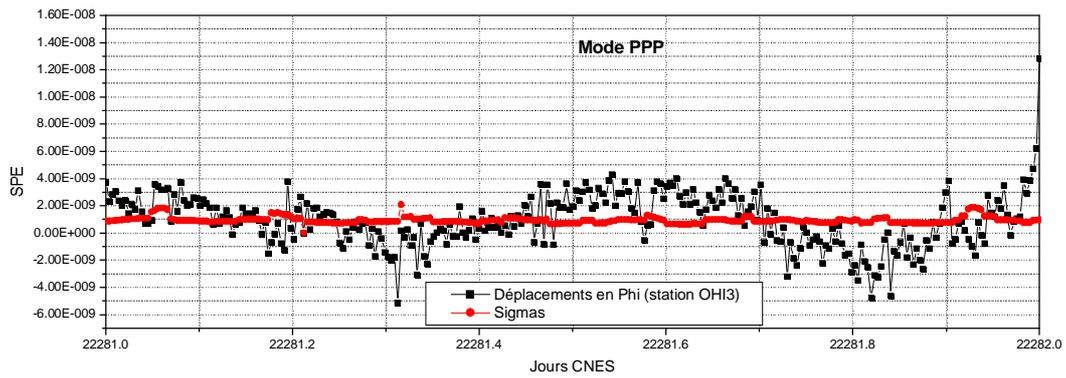


Figure 5.27. Variation de la latitude ϕ de la station OHI3 en Traitement PPP

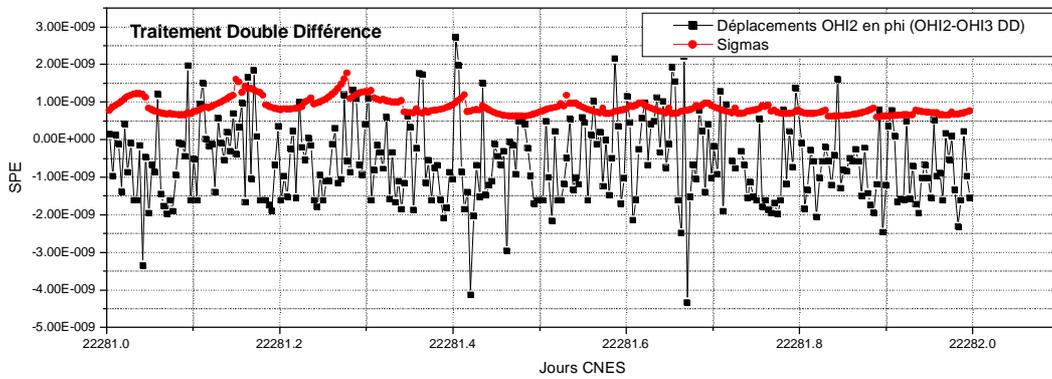


Figure 5.28. Variation de la latitude ϕ de la station OHI2 en mode DD (OHI2-OHI3)

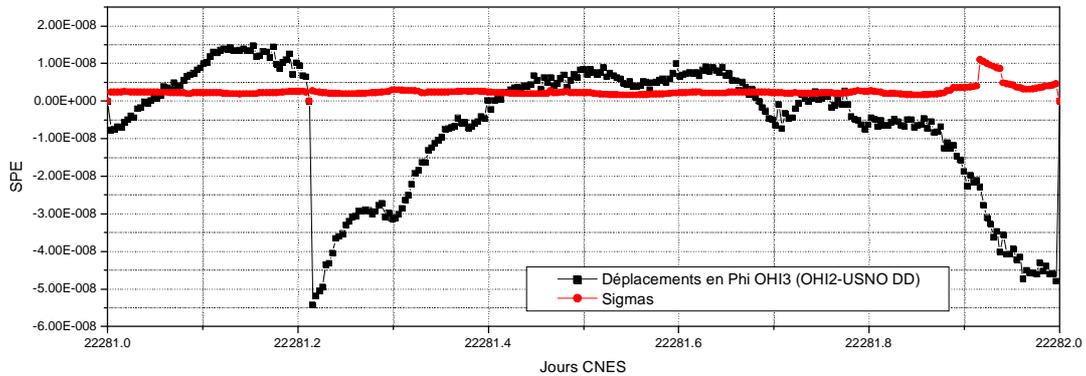


Figure 5.29. Variation de la latitude ϕ de la station OHI2 en mode DD (OHI2-USNO)

		SPE (rad)	Sigmas (rad)	Déplacement Nord (m)	Sigmas (m)
OHI2	PPP	1.48E-09	1.74E-09	9.39E-03	1.11E-02
OHI3	PPP	9.42E-10	9.25E-10	5.99E-03	0.00588094
OHI2 – OHI3	DD	-8.51E-10	8.48E-10	-5.41E-03	5.40E-03
OHI2 - USNO	DD	-6.08E-09	2.48E-09	-3.87E-02	0.01577365

Tableau 5.15. Bilan de la variation moyenne de la latitude ϕ , le 2 janvier 2011, pour un traitement PPP et DD

d- Interprétation des résultats

Le tableau ci-dessous (Tableau 5.16.) résume les résultats obtenus lors de la comparaison entre le traitement PPP et le traitement DD (§2.3.3.)

Nous remarquons que la meilleure qualité d’estimation de la position de la station géodésique OHI2 est obtenue en utilisant le traitement en Double Différence DD, avec OHI3 comme station de référence. Par contre, lorsque c’est la station USNO qui est utilisée pour le traitement différentiel, nous obtenons les résultats les moins satisfaisants.

Stations	Mode	Déplacement h (m)	Sigmas (m)	Déplacement λ Est (m)	Sigmas (m)	Déplacement ϕ Nord (m)	Sigmas (m)
OHI2	PPP	0.01881359	0.0285883	-2.15E-02	1.95E-02	9.39E-03	1.11E-02
OHI3	PPP	0.14393924	0.0147284	-1.90E-02	0.0104969	5.99E-03	0.00588094
OHI2 – OHI3	DD	-0.00594902	0.0109781	-8.53E-03	4.20E-03	-5.41E-03	5.40E-03
OHI2 - USNO	DD	0.05318751	0.0147284	4.62E-02	0.03231011	-3.87E-02	0.01577365

Tableau 5.16. Comparaison entre les résultats obtenus en traitement PPP et traitement DD

La précision du positionnement GPS est influencée par des erreurs de transmission dans l'ionosphère et la troposphère, des erreurs des satellites, d'horloges et des multi trajets. Le mode relatif (DD), utilisé en observant simultanément un mobile et une base dont on connaît précisément les coordonnées, permet de corriger les erreurs de la majorité des facteurs mentionnés ci-dessus. C'est ce qui explique la bonne qualité des résultats obtenus en mode différentiel (de l'ordre du millimètre), par rapport au Positionnement Ponctuel Précis qui donne une précision de l'ordre du centimètre.

Dans un deuxième temps, nous remarquons qu'en utilisant le traitement différentiel, avec comme station de référence USNO, nous perdons de l'exactitude et surtout nous avons des sauts de valeurs pour la longitude et la latitude.

Ceci s'explique par le fait la longueur de la ligne de base joue un rôle très important dans la précision du traitement. Comme la distance OHI2-OHI3 est seulement de quelques mètres (~3m), les paramètres et les constantes communs aux satellites et aux stations sont facilement éliminés. Par contre, étant donné que la ligne de base entre les stations OHI2 et USNO est très grande (plusieurs centaines de kilomètres) la différentiation n'a pas accomplie son rôle, puisque les deux sites ne bénéficient pas des mêmes conditions météorologiques, les erreurs dues aux conditions de propagation (effets troposphériques) ne pourront donc pas être éliminés. De même pour les erreurs dues à l'horloge des satellites, et les effets relativistes.

3. CONCLUSION

Les données GPS sont en train de révolutionner la recherche en Sciences de la Terre, et particulièrement en géodésie. En effet, cet outil permet de mesurer directement les mouvements du sol liés à des séismes, à des éruptions volcaniques, ou aux déplacements lent de blocs tectoniques. Pour ces applications, une précision millimétrique est nécessaire car les mouvements à mesurer sont généralement lents. De plus, certains phénomènes géophysiques varient rapidement dans l'espace et dans le temps. Les réseaux GPS permanents, tel que l'IGS, permettent d'atteindre une résolution temporelle suffisante pour détecter ces signaux géophysiques transitoires.

Dans ce chapitre, nous nous sommes proposé de localiser quelques stations géodésiques du réseau permanent de l'IGS, en utilisant le logiciel GINS-PC (Géodésie par Intégrations Numériques Simultanées) développé et maintenu par l'équipe de Géodésie Spatiale du CNES. Nous avons testé plusieurs méthodes de localisation (statique, cinématique, non différenciée, double différence) afin d'apprécier les avantages et les inconvénients de chacune d'elles, en évaluant principalement leur précision, et en modifiant quelques paramètres tels que l'intervalle de collecte des données GPS, la distance entre deux récepteurs dans le positionnement différentiel...etc.

Nous avons commencé, dans le paragraphe §2.3, par la localisation de la station OPMT, située à l'observatoire de Paris, en mode statique sur 3 jours consécutifs, en collectant les données toutes les 5 minutes, et en libérant le résultat de localisation toutes les 24h.

L'avantage de ce type de positionnement est que le nombre de mesures recueillies sur une même station devient bien plus grand que le nombre d'inconnues à résoudre, d'où une plus grande précision du positionnement. Nous obtenons ainsi, une solution cumulée puisque les observations sont cumulées pour calculer une position unique.

Nous avons remarqué que les déplacements horizontaux sont faibles, avec une moyenne de 8.3 mm pour la longitude λ et de 2.01 cm pour la latitude ϕ . Par contre, les déplacements en h sont relativement élevé, avec une moyenne de 19.6 cm. Ces résultats confirment les travaux sur les déplacements géodésiques horizontaux et verticaux effectués par [BER09] et [BOU00], qui indiquent que la composante verticale est au moins deux fois plus perturbée que les composantes horizontales.

Ce qui n'est pas cohérent, c'est les sigmas associés aux solutions, qui représentent l'erreur formelle à posteriori et qui sont beaucoup trop optimistes dans ce cas (mode statique). Nous devrions

obtenir des barres d'erreur aussi grandes que les variations de la position. Ce problème doit être résolu au niveau de GINS pour le mode statique afin que les sigmas affichés soient cohérents.

Par la suite, après avoir modifié l'intervalle de collecte de données pour la même station, nous avons remarqué que les résultats obtenus avec plus de données collectées ($I=30s$ au lieu de $I=300s$), sont bien plus précis et surtout plus cohérents, car les sigmas associés aux mesures ont approximativement le même ordre de variation que la position estimée. L'inconvénient, est que l'augmentation de la quantité de données augmente également le temps de transfert et de traitement des données, ce qui se répercute sur le temps de calcul.

Dans un deuxième temps (§2.4.2), nous avons évalué la méthode PPP en mode cinématique, pour la localisation de la station USN3, située à Washington, sur 3 jours consécutifs avec libération des données toutes les 5 minutes (300s), ce qui permet de fournir 288 positions par jour. Nous avons pu remarquer à partir des séries temporelles obtenues, des signaux parasites qui sont de deux types : des sauts à minuit et des sauts en milieu d'arc dus à la mauvaise résolution des ambiguïtés. Ces sauts ne sont pas systématiques, mais apparaissent pour des solutions qui sont moins stables (par exemple lorsque moins de satellites sont en visibilité) [KIN03] [POR10].

Dans la dernière partie de notre étude (§2.4.3), nous avons comparé la méthode PPP non différenciée, avec la méthode Double Différenciée. Cette dernière requière l'utilisation de deux récepteurs, ce qui implique des coûts additionnels et une logistique plus complexe comparativement à l'utilisation d'un récepteur unique. Dans cette optique, la technique du Positionnement Ponctuel de Précision (PPP) a été développée afin d'atteindre une même précision avec un seul récepteur GPS.

Nous avons choisi de localiser la station OHI2, en utilisant la méthode PPP non différencié, puis de la comparer avec la méthode des Doubles Différences, en prenant la station OHI3 comme station de référence, puis la station USN3. Nous avons obtenu la meilleure qualité de localisation en utilisant le traitement DD, avec OHI3 comme station de référence. Par contre, lorsque c'est la station USNO qui est utilisée, nous obtenons les résultats les moins satisfaisants. Ce qui confirme que la technique différentielle permet de réduire l'impact des erreurs communes aux sites d'observations (orbites et horloges des satellites, délais atmosphériques, etc.), en raison de la corrélation spatiale présente dans la plupart des sources d'erreurs affectant le positionnement par satellites. Cette caractéristique fait en sorte que l'on puisse obtenir une précision centimétrique et ce, après seulement quelques minutes d'observations selon la distance séparant les récepteurs. Nous avons pu démontrer que la longueur de la ligne de base joue un rôle très important dans la précision du traitement. Comme la distance OHI2-OHI3 est seulement de quelques mètres (~3m), les paramètres et les constantes communs aux satellites et aux stations sont facilement éliminés, contrairement qu'avec la ligne de base OHI2-USNO (plusieurs centaines de kilomètres). Les résultats obtenus avec le mode PPP restent tout de même bons et acceptables avec une précision centimétrique.

Le Positionnement Ponctuel de Précision (PPP) par satellites devient progressivement une alternative au positionnement relatif, car il permet l'obtention d'une précision centimétrique lors de sessions d'observations prolongées. L'inconvénient majeur du PPP est qu'une longue période est requise pour atteindre un tel niveau de précision. En appliquant les modèles correctifs appropriés, une précision centimétrique peut être atteinte après quelques heures d'observations. En conséquence, le PPP requiert actuellement une période d'observations de près de 30 minutes pour obtenir une précision d'une dizaine de centimètres pour un récepteur statique, tandis qu'au moins le double du temps est nécessaire en mode cinématique [HER04].

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Le travail présenté dans cette thèse a été mené suivant deux axes :

Le premier axe vise, dans un premier temps, à étudier avec précision l'orbitographie des satellites artificiels autour de la terre, en prenant en compte toutes les perturbations qui font dévier le satellite de son orbite képlérienne idéale. Ces perturbations ont été répertoriées et détaillées selon leur ordre d'influence sur la modification de l'orbite initiale des satellites.

Lors de l'étude des différents types d'algorithmes utilisés pour la propagation d'orbites, nous avons opté pour l'implémentation de l'algorithme SGP4 (Simplified General Perturbations 4) qui prend en compte la distribution non sphérique de la masse de la Terre (bourrelet équatorial, le fait que la masse de la terre est plus importante du côté de l'hémisphère sud, plus un modèle géopotentiel de 4e ordre qui inclut une déviation additionnelle au niveau de la masse terrestre). SGP4 modélise également la densité de la haute atmosphère terrestre en utilisant la 4e puissance de l'altitude orbitale, en utilisant un coefficient pseudo-balistique fourni par les fichiers TLE, normalisé pour l'altitude orbitale et le profil de densité atmosphérique du moment.

Le SGP4 nécessite, comme paramètres d'entrée, la disponibilité des éléments orbitaux du satellite à poursuivre. Ces derniers sont fournis dans des fichiers TLE (Two Lines Elements) mis à la disposition des utilisateurs par le NORAD (North American Aerospace Defense) et qui présentent un codage en deux lignes de tous les satellites mis en orbite. Nous avons à cet effet réalisé une application afin de décoder ces fichiers et d'en extraire les éléments orbitaux.

Par la suite, nous avons implémenté, sous C++ Builder, le propagateur SGP4 dans un logiciel de calcul précis des orbites basses (LEO) que nous avons nommé LAAR-Track, et qui nous fournit la position et la vitesse de tous les satellites à basse orbite dans un repère ECI (Earth Centred Inertial).

Nous avons rajouté au LAAR-Track, un module qui permet de convertir les résultats position et vitesse dans le repère topocentrique relié à l'emplacement de la station et d'en déduire l'élévation et l'azimut que devra avoir l'antenne pour pointer le satellite avec un maximum de précision.

Nous avons validé notre logiciel en effectuant une comparaison avec le logiciel Wxtrack de David TAYLOR, qui est un des logiciels les plus utilisés et les plus performants en orbitographie. Nous avons constaté que les résultats obtenus avec les deux logiciels sont très proches :

- L'erreur en azimut varie de -0.2° à 0.2° , ce qui est très faible, et ne peut en aucun cas perturber la réception des images car le pas de déplacement de l'antenne est de 1.25° sur le plan horizontal.
- L'erreur en élévation est un peu plus importante, variant de -0.2° à 0.5° , mais cela reste correct, car aucune perte du signal ne peut être causée par cette différence.

La cause de ces erreurs ne peut pas être engendrée par les paramètres d'entrée des algorithmes de prévision (les éléments orbitaux), car nous avons utilisé les mêmes fichiers TLE pour les deux logiciels. Elle ne peut donc être produite que par l'utilisation de deux algorithmes de prévision différents.

Enfin, nous décrivons le système d'automatisation de la station de réception des images NOAA - HRPT, chargée d'effectuer l'asservissement du rotor de l'antenne sur le plan horizontal (variation de l'azimut) et sur le plan vertical (variation de l'élévation).

Afin de refléter l'amélioration apportée par l'automatisation, une comparaison a été établie entre la qualité des images reçues automatiquement et manuellement. Avec la réception manuelle, nous avons souvent des interruptions dans la réception du signal, principalement dues à l'imprécision des manœuvres de l'opérateur qui déplace l'antenne manuellement, via le pupitre de commande du rotor. Avec la réception automatique, ces discontinuités ont été évitées. Le laboratoire LAAR dispose à présent d'une base de données riche, par le nombre d'images et la diversité des formats, pouvant être exploitée pour diverses applications.

Le second axe de cette thèse est l'exploitation des données des satellites NAVSTAR du système GPS, qui a connu un grand succès dans le domaine civil et engendré un énorme développement commercial (navigation maritime, sur route, localisation de camions, randonnée, etc.) ainsi qu'un intérêt scientifique croissant pour le développement et l'exploitation des propriétés des signaux transmis pour de nombreuses applications (géodésie, transfert de temps entre horloges atomiques, étude de l'atmosphère, etc.)

Nous nous sommes intéressés principalement à la localisation précises de plusieurs stations géodésiques du réseau permanent de l'IGS, en utilisant les données GPS, qui sont distribuées par les stations IGS, gratuitement et disponibles entre 24 et 48 heures après leur enregistrement.

En premier lieu, nous nous sommes familiarisé avec le système GPS, en présentant les notions de base: principe de fonctionnement, types de positionnement, types d'observations. Nous avons, par la suite, répertorié les principales sources d'erreurs affectant les mesures GPS, et détaillé les solutions proposées pour corriger ou réduire l'impact de ces erreurs.

Par la suite, nous nous sommes intéressé au logiciel GINS-PC (Géodésie par Intégrations Numériques Simultanées), 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). Nous avons décrit sa structure de fonctionnement et expliqué les étapes nécessaires pour son utilisation à savoir :

- Le rapatriement des fichiers de données.
- 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.

A la base de toute la pyramide se trouve le fichier directeur, qui est un fichier de configuration du traitement à effectuer, et dans lequel l'utilisateur va spécifier certains paramètres du calcul qu'il souhaite faire, et choisir les blocs qu'il veut exécuter (prétraitement et/ou traitement). Nous avons détaillé les étapes pour la création d'un bon fichier directeur donnant des résultats précis et fiables.

Nous avons localiser quelques stations géodésiques du réseau permanent de l'IGS, en utilisant plusieurs méthodes de localisation (statique, cinématique, non différenciée, double différence) afin d'apprécier les avantages et les inconvénients de chacune d'elles, en évaluant principalement leur précision, et en étudiant l'influence de quelques paramètres (tels que l'intervalle de collecte des données GPS, la distance entre deux récepteurs dans le positionnement différentiel...etc.) sur les résultats obtenus.

L'avantage principal du positionnement statique est que le nombre de mesures recueillies sur une même station devient bien plus grand que le nombre d'inconnues à résoudre, d'où une plus grande précision du positionnement. Nous avons obtenu, une solution cumulée puisque les observations sont cumulées pour calculer une position unique (1 mesure calculée toutes les 24h).

Nous avons pu montrer que le traitement DD (Double Différence) donne de meilleurs résultats que le traitement PPP (Positionnement Ponctuel Précis) car il élimine les paramètres et les constantes communes aux satellites et aux stations. Nous avons également mis en évidence l'importance de la longueur de la ligne de base dans la précision du traitement relatif. En effet, plus cette distance est faible, plus les paramètres et les constantes communs aux satellites et aux stations sont facilement éliminés, puisque les deux sites bénéficient des mêmes conditions de collecte des données.

Par la suite, nous avons évalué l'influence de l'intervalle de collecte des données ; nous avons remarqué que les résultats obtenus avec plus de données collectées ($I=30s$ au lieu de $I=300s$), sont bien plus précis et surtout plus cohérents. L'inconvénient, est que l'augmentation de la quantité de données augmente également le temps de transfert et de traitement des données, ce qui se répercute sur le temps de calcul.

Malgré tous les avantages du traitement relatif, nous avons pu montrer que la méthode PPP donne tout de même de bons résultats, avec l'avantage principal 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.

Dans le cadre de l'amélioration du travail exposé dans cette thèse, nous proposons d'améliorer la station de réception des images satellitaires implantée au LAAR, en :

1. Disposant d'une antenne parabolique plus grande (au moins 1m20 de diamètre), car celle utilisée dans la chaîne de réception est une parabole grillagée de petite dimension : 970 x 760 mm. Plus la dimension de l'antenne est grande, plus la perte du signal est faible. Cependant, il faut faire un compromis car le rotor YEASU G5500 ne peut pas être adapté à de grandes antennes à cause de la contrainte du poids.
2. Améliorant le logiciel réalisé LAAR-Track, en lui rajoutant un module de prise en charge de l'interface de poursuite via le port parallèle du PC.

Il serait également très intéressant de s'équiper d'une station GPS permanente située sur le toit du Laboratoire (zone dégagée qui permet d'éviter les erreurs dues aux multi-trajets). L'observation permanente fournira des séries temporelles continues qui permettront d'analyser en détail les processus qui affectent la détermination de la position des stations au cours du temps (déformations tectoniques, variabilité troposphérique liée aux conditions météorologiques et aux saisons, stabilité du monument géodésique, etc.) et de déterminer au mieux les modèles statistiques décrivant les résultats et leurs incertitudes.

ACRONYMES UTILISES

AOS	Acquisition of Signal
AM	Amplitude Modulation
ANTEX	Antenna Exchange Format
APT	Automatic Picture Transmission
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer
BIH	Bureau International de l'Heure
CDDIS	Crustal Dynamics Data Information System
CHRPT	China High Resolution Picture Transmission
CNES	Centre National d'Études Spatiales
DGPS	Differential GPS
DORIS	Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite
DOY	Day Of Year
ECI	Earth Centered Inertial
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
EOP	Earth Orientation Parameter
EUMETSAT	European organisation for the exploitation of METeorological SATellites
FM	Frequency Modulation
GNSS	Global Navigation Satellite Systems
GMT	Greenwich Mean Time
GPS	Global Positioning System
GRGS	Groupe de Recherche en Géodésie Spatiale
GST	Greenwich sidereal time
HRP	High Resolution Picture
HRPT	High Resolution Picture Transmission
ICRF	International Celestial Reference Frame
IERS	International Earth Rotation and Reference Systems Service
IGN	Institut Géographique National
IGS	International GNSS Service
ITRF	International Terrestrial Reference Frame
JD	Julian Day
LAAR	Laboratoire d'Analyse et d'Application des Rayonnements
LOS	Loss of signal
LRT	Laboratoire Régional de Télédétection
LST	Local Sideral Time

MCC	Mission Control Center
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NIR	Near Infrared; electromagnetic spectrum from 0.75 to ~1.30 mm
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NORAD	North American Aerospace Defense
PCO	Phase Center Offset
PCV	Phase Center Variation
PM	Phase modulation
QFH	Quadra Filar Helix Antenna
RGP	Réseau GPS Permanent
RINEX	Receiver Independant Exchange Format
RMS	Root Mean Square
SDP	Simplified Deep-space Perturbations
SGP	Simplified General Perturbations
SLR	Satellite Laser Ranging
SNR	Signal-to-Noise Ratio
TAI	Temps Atomique International
TEC	Total Electron Content
TIR	Thermal Infrared; electromagnetic spectrum from ~1.30 to ~3.0 mm
TLE	Two Line Elements
UTC	Coordinated Universal Time
VIS	Visible; electromagnetic spectrum from 0.40 to 0.75 mm
VLBI	Very Long Baseline Interferometry
WEFAX	Weather Facsimile
WGS	World Geodetic System
ZHD	Zenith Hydrostatic Delay
ZTD	Zenith Tropospheric Delay
ZWD	Zenith Wet Delay

BIBLIOGRAPHIE

- [ALM92] P. Kenneth Seidelmann “the Explanatory Supplement to the Astronomical Almanac”, University Science Books (août 1992) - Ed Edition - Page 50
- [ARB96] Arbour, B. et Santerre, R. (1996). Effets des multitrajets sur les mesures de phase et le positionnement GPS. *Geomatica*, 50(2):159–172.
- [BEL91] Bélanger, P., Santerre, R. et Parrot, D. (1991). Etude de faisabilité sur l’utilisation du système de positionnement GPS pour les travaux d’auscultation topographique des ouvrages hydro-électriques. Rapport de recherche préparé dans le cadre du contrat de recherche d’Hydro-Québec, Division Ouvrages de Génie Civil, Service Appareillage, Région La Grande Rivière. 84 pages.
- [BER09] Bergeot N., Bouin M.-N., Diament M., Pelletier B., Régnier M., Calmant S., Ballu V. (2009), Horizontal and vertical interseismic velocity fields in the V, anuatu subduction zone from GPS measurements : evidence for central Vanuatu locked zone. *Journal. Geophysical Research.*, doi: 10.1029/2007JB005249
- [BEU96] Beutler, G. (1996). GPS Satellite Orbits. In Teunissen, P. et Kleusberg, A., éditeurs : GPS for Geodesy, chapitre 2, pp. 37–102, Springer Verlag, 1ère édition.
- [BOU00] Bouin, M.N. & C. Vigny, (2000) New constraints on Antarctic plate motion and deformation from GPS data, *Journal of Geophys. Res.*, 105 B 12, pp 28279-28294.
- [BRO59] Brouwer, D., “Solution of the Problem of Artificial Satellite Theory without Drag”, *Astronomical . Journal* 64, 378—397, November 1959.
- [BRU91] Brunner, F. K. et Gu, M. (1991). An improved model for the dual frequency ionospheric correction of GPS observations. *Manuscripta Geodaetica*, 16:205–214.
- [COH92] Cohen, C. (1992). Attitude Determination Using GPS : Development of an All Solid- State Guidance, Navigation, and Control Sensor for Air and Space Vehicles Based on the Global Positioning System. Thèse de doctorat, Department of Aeronautics and Astronautics, Stanford University, CA. 184 pages.
- [DEL00] <http://www.strout.net/info/science/index.html>
- [ELD04] Eldon J.Oja “Project Atmosphere Teacher’s Guide’s” Projet Atmosphère Canada – satellites météorologiques – septembre 2004.
- [ESA00] http://www.esa.int/esaMI/Eduspace_EN/SEM43O6SXIG_0.html
- [ESA10] <http://earth.esa.int/SMOS/>
- [ESA11] <http://www.esa.int/SPECIALS/Cryosat/index.html>
- [EUM03] Organisation européenne de satellites météorologiques - météorologie satellitale - Actualités européennes et internationales no. 18 mai 2003
- [EXE88] Exertier, P. : 1988, “Orbitographie des satellites artificiels sur de grandes périodes de temps. Possibilités d’applications”, Thèse de doctorat de l’Observatoire de Paris.

-
- [GEN06] Gendt, G. (2006). IGSMail-5440 : IGS Switch to new antenna model - a few remarks. <http://igscb.jpl.nasa.gov/mail/igsmail/2006/msg00163.html>.
- [HAR84] Hartmann, G. et Leitinger, R. (1984). Range Errors Due to Ionospheric and Tropospheric Effects for Signal Frequencies Above 100 MHz. *Bulletin Géodésique*, 58:109–136.
- [HAS03] Mémoire de Magister : « Réalisation et conception d’une station de réception des images Météorologiques NOAA » Département de Physique, Option : Rayonnement et Matière. Mai 2003.
- [HER04] Héroux, P., Gao, Y., Kouba, J., Lahaye, F., Mirault, Y., Collins, P., MacLeod, K., Tetreault, P. et Chen, K. (2004). Products and Applications for Precise Point Positioning – Moving Towards Real-Time. In *Proceedings of ION GNSS 2004*, Long Beach, CA, September 21–24, pp. 1832–1843.
- [HER05] Hernandez-Pajares, M., Juan, J., Sanz, J., Orus, R. et Salazar, D. (2005). Impact and implementation of the second order ionospheric term in GPS positioning (Summary). [http://gage152.upc.es/~manuel/Second order ionospheric term report v2.pdf](http://gage152.upc.es/~manuel/Second%20order%20ionospheric%20term%20report%20v2.pdf)
- [HK66] : Hilton, C.G. and Kuhlman, J.R., “Mathematical Models for the Space Defense Center”, Philco-Ford Publication No. U-3871, 17—28, November 1966.
- [HOF01] Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. et Collins, J. (2001). *GPS – Theory*
- [HOO80] Hoots, F.R., “A Short, Efficient Analytical Satellite Theory”. AIAA Paper No. 80-1659, August 1980.
- [HOQ07] Hoque, M. M. et Jakowski, N. (2007). Higher Order Ionospheric Effects in Precise GNSS Positioning. *Journal of Geodesy*, 81:259–268.
- [HRPXX]. HRPT READER HELP
- [HUI79] Hujsak, R.S., “ A Restricted Four Body Solution for Resonating Satellites with an Oblate Earth ”, AIAA Paper No. 79-136, June 1979.
- [ICD97] ICD-GPS-200C. Navstar GPS Space Segment / Navigation User Interfaces : Interface Control Document ICD-GPS-200C. IRN-200C-002, 1997. ARINC Research Cooperation, CA.
- [IGS07] IGS Products. <http://igscb.jpl.nasa.gov/components/prods.html>
- [IGS07] IGS (2007). IGS Products. <http://igscb.jpl.nasa.gov/components/prods.html>.
- [INN04] Les satellites météorologiques Salon Innov’Agri, septembre 2004
- [KAP96] Kaplan, E. D. (1996). *Understanding GPS, principals and applications*. Artech House Publishers.
- [KEL95] T.S. Kelso, “Orbital Coordinate Systems”, *Satellite Times Journal* , November/December 1995
- [KIN03] King, M., R. Coleman, and L. N. Nguyen (2003), Spurious periodic horizontal signals in sub-daily GPS position estimates, *Journal of Geodesy*, 77 (1), 15–21.]
- [KOU01] Kouba, J. et Héroux, P. (2001). GPS Precise Point Positioning Using IGS Orbit and Clock Products. *GPS Solutions*, 5(2):12–26.
-

-
- [KOU02] Kouba, J. (2002). Relativistic Time Transformations in GPS. *GPS Solutions*, 5(4):1–9.
- [KOU04] Kouba, J. (2004). Improved Relativistic Transformations in GPS. *GPS Solutions*, 8(3):170–180.
- [KOZ59] Kozai, Y., “The Motion of a Close Earth Satellite”, *Astronomical Journal* 64, 367—377, November 1959.
- [LAI02] Valery LAINEY « Théorie dynamique des satellites galiléens » Thèse de doctorat présentée à L’OBSERVATOIRE DE PARIS. Spécialité : Dynamique des systèmes gravitationnels – 2002.
- [LC69] Lane, M.H. and Cranford, K.H., “An Improved Analytical Drag Theory for the Artificial Satellite Problem”, AIAA Paper No. 69-925, August 1969.
- [LEI04] Leick, A. (2004). *GPS Satellite Surveying*. John Wiley & Sons, 3e édition. 435 pages
- [LIU74] J. J. F. LIU Northrop Services, Inc., Huntsville, Alu., “Satellite Motion about an Oblate Earth” AIAA JOURNAL, VOL. 12, NO. II, NOVEMBER 1974
- [LOY07] Sylvain LOYER, Janvier 2007 «Traitement des données GPS avec GINS »
- [MEN99] Mendes, V. (1999). Modeling the Neutral–Atmosphere Propagation Delay in Radiometric Space Techniques. Thèse de doctorat, Department of Geodesy and Geomatics Engineering, University of New Brunswick, Fredericton, NB, Canada. 353 pages.
- [MEY00] Meyer U., Charlot P., Biancale R. GINS: a new multi-technique software for VLBI analysis, Proceedings of the IVS 2000 General Meeting, 324-328, 2000.
- [MIS01] Misra, P. et Enge, P. (2001). *Global Positioning System – Signals, Measurements, and Performance*. Ganga–Jamuna Press. 390 pages.
- [NIE96] Niell, A. (1996). Global Mapping Functions for the Atmospheric Delay at Radio Wavelengths. *Journal of Geophysical Research*, 101(B2):3227–3246.
- [NOA01] NOAA KLM Users Guide - Sept. 2004 Revision
- [PER04] Félix Perosanz, «Orbitographie précise de satellites en orbite basse » , Journée thématique « Galileo et la science », 11/06/04, CNES, Paris
- [POR10] Portier, L. (2010), Suivi temporel de profils GPS en Antarctique, Rapport de Stage de fin d’Etude ESGT.
- [RAH08] *Revue Télédétection*, 2008, vol. 8, n° 2, pp. 137-146 “Software and hardware implements for tracking Low Earth Orbiting satellites” W.L.Rahal, N.Benabadi, A.H.Belbachir
- [REP03] Felix R. Hoots and Ronald L. Roehrich “Models for Propagation of NORAD Element Sets” SPACETRACK REPORT N° 3, 31 December 1988.
- [ROT06] Rothacher, M. et Schmid, R. (2006). ANTEX : The Antenna Exchange Format Version 1.3. <http://igscb.jpl.nasa.gov/igscb/station/general/antex13.txt>.
- [SAA73] Saastamoinen, J. (1973). Contributions to the theory of atmospheric refraction. *Bulletin geodesique*, 107:13–34.
-

-
- [SAN91] Santerre, R. (1991). Impact of GPS satellite sky distribution. *Manuscripta Geodaetica*, 16(1):28–53.
- [SCH03] Schmid, R. et Rothacher, M. (2003). Estimation of Elevation-Dependant Satellite Antenna Phase Center Variations of GPS Satellites. *Journal of Geodesy*, 77(7–8):440–446.
- [SCH05] Schmid, R., Rothacher, M., Thaller, D. et Steigenberger, P. (2005). 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*, 9(4):283–293.
- [SEE03] Seeber, G. (2003). *Satellite Geodesy*. de Gruyter, 2e édition. 589 pages and *Practice*. Springer Verlag, 5e édition. 382 pages.
- [TEL99] Institut National Agronomique Paris-Grignon, Département Agronomie–Environnement, UFR Dynamique Des Milieux Et Organisations Spatiales, cours de télédétection.
- [WEB1] <http://www.educnet.educatio.fr/orbito.htm>
- [WEB2] http://artemis.univ.fr/cybermeca/formcont/mecaspa/cours_sa/mouv_kep/mouv_kep.htm
- [WEB3] http://artemis.univ-mrs.fr/cybermeca/formcont/mecaspa/code_tle/code_tle.htm
- [WEL87] Wells, D., Beck, N., Delikaraoglou, D., Kleusberg, A., Krakiwsky, E., Lachapelle, G., Langley, R., Nakiboglu, M., Scharwz, K., Tranquilla, J. et Vanicek, P. (1987). *Guide to GPS Positioning*. Canadian GPS Associates, Fredericton, New Brunswick, Canada, 2e édition. 600 pages.
- [WGS72] World Geodetic System 1972
- [WXT00] guide d'utilisation du WxTrack
- [XU03] Xu, G. (2003). *GPS - Theory, Algorithms and Applications*. Springer Verlag, 1ère édition. 315 pages.
- [ZHU03] Zhu, S., Massmann, F.-H., Yu, Y. et Reigber, C. (2003). Satellite Antenna Phase Center Offsets and Scale Errors in GPS Solutions. *Journal of Geodesy*, 76(11–12):668–672.

ANNEXE:

Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, Turk. J. Elec. Eng. & Comp. Sci., **20**, (2012), 537-546. *"Automatic tracking system for weather satellites images reception"*

W.L.Rahal, N.Benabadji, A.H.Belbachir