

Etude des Potentialités du DGPS en Temps Réel avec Solution Omnistar pour des Fins de Géo-Localisation

Moha EL AYACHI et Mohamed STIFA, Morocco

Mots clés: DGPS, temps réel, localisation, précision, coût, analyse multicritère.

RESUME

La localisation est l'une des tâches incontournables que les professionnels de divers domaines cherchent à optimiser en termes du temps d'acquisition des données et du capital investi. Elle reste d'un intérêt majeur notamment avec l'émergence des systèmes d'augmentation et des services de correction différentielle en temps réel à large couverture. A Travers cette étude, on examine plus particulièrement les potentialités de la solution OmniSTAR de plus en plus sollicitée à l'échelle internationale. L'objectif derrière cette étude est d'établir un support d'information relative à cette solution pour les professionnels au niveau du Maroc. Ensuite, elle vise à identifier l'apport de cette solution et ses limites par rapport à la solution statique.

Pour atteindre ces objectifs, on a procédé à une analyse des différentes solutions DGPS existantes. Ensuite, on a conduit une étude expérimentale dans le cadre d'un projet d'établissement des points de contrôle (GCP) à travers le Maroc en utilisant la solution statique et la solution OmniSTAR HP. Enfin, on a entamé un processus de post-traitement sous trois logiciels commerciaux différents (TGO, LGO, GNSS) pour vérifier est ce que la différence entre les différents modes moyennant différents logiciels de traitement est significative. Les résultats de l'étude vont permettre aux professionnels de prendre une décision sur le choix des solutions technologiques à adopter pour la conduite de leurs projets.

Etude des Potentialités du DGPS en Temps Réel avec Solution Omnistar pour des Fins de Géo-Localisation

Moha EL AYACHI, Mohamed STIFA, Morocco

1. INTRODUCTION

On assiste actuellement à un besoin sans cesse croissant de la part des utilisateurs des systèmes de positionnement par satellite en une qualité de positionnement meilleure, rapide et à moindre coût pour localiser les objets de leurs intérêts. Le système GPS existant répond à une grande partie des besoins courants. Les solutions qu'il fournit restent pourtant entachées d'une série de contraintes qu'un utilisateur potentiel exigeant cherche constamment à surmonter. L'alternative du GPS différentiel (DGPS) peut apporter des réponses à certains besoins en offrant des corrections pour l'obtention des positions.

Parallèlement à l'émergence des systèmes d'augmentation et des nouveaux systèmes de positionnement par satellite (Galileo, Beidou, ...), d'autres opérateurs internationaux privés sont apparus et proposent des services DGPS en temps réel, mais non gratuits et avec des couvertures locales ou régionales. Parmi, ces opérateurs, on propose d'étudier le service de la constellation OmniSTAR. La problématique majeure à laquelle cette étude est destinée à répondre est d'analyser les potentialités du DGPS en temps réel utilisant la couverture satellitaire (OmniSTAR) en termes de précision ? L'étude propose aussi de répondre à une seconde préoccupation qui est l'analyse comparative entre la solution Omnistar par rapport à la solution statique avec un post traitement.

La méthodologie adoptée peut être résumée dans les éléments ci-dessous :

- La conduite d'une campagne d'observation des mêmes points GCP d'un réseau par le mode statique et le mode différentiel en temps réel avec la solution Omnistar;
- Le calcul et la compensation du réseau par trois différents logiciels commerciaux de post-traitement (TGO, LGO, GNSS);
- Le traitement des observations Omnistar par le Pathfinder office (PFO) pour apporter la correction différentielle.

Dans cette étude, les concepts de base de fonctionnement du GPS ne sont pas abordés et notre intérêt sera focalisé sur l'étude des aspects du mode différentiel.

2. LE MODE DE POSITIONNEMENT DIFFERENTIEL

2.1 Concepts de base et principe de fonctionnement

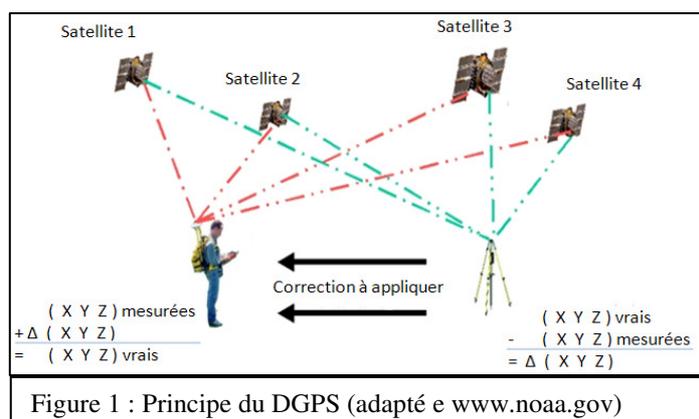
La localisation différentielle par GPS (DGPS) est une méthode d'amélioration des performances de positionnement par GPS en utilisant une ou plusieurs stations de référence bien localisées. Le DGPS peut être qualifié de solution basée code ou phase, à couverture locale ou étendue, à détermination directe ou inverse (Kaplan et Hegarty, 2006). Le mode différentiel signifie qu'on peut éliminer les erreurs communes aux récepteurs (erreurs d'orbite et décalage d'horloges des satellites) et de réduire les erreurs atmosphériques vue qu'elles sont corrélées spatialement (récepteurs proches) et temporellement (synchronisation des mesures) avec les erreurs observées à la référence. Pour cette fin, les différences simples, doubles et triples sont formées (Botton et al, 1997).

Une simple différence permet d'observer simultanément le même satellite au même moment à partir de deux récepteurs. Les termes d'erreurs communs disparaissent en plus des erreurs propres au satellite (erreur due aux éphémérides et au décalage des horloges du satellite). Quant à la double différence, elle est constituée d'une différence de deux simples différences à un instant donné entre deux satellites et deux récepteurs (Sammuneh, 2008). La triple différence est formée par la différence de deux doubles différences pour deux époques directement consécutives. En considérant les ambiguïtés constantes dans le temps, celles-ci sont entièrement éliminées (Azzouzi, 2008). En analysant un bilan d'erreurs du GPS et DGPS (Boutton et al, 1997), on remarque que plusieurs sources d'erreurs peuvent être éliminées (Tableau 1).

Tableau 01 : Bilan des erreurs GPS naturel et DGPS (Botton et al, 1997)			
Sources d'erreur	GPS avec SA	GPS sans SA	DGPS
Secteur spatial :			
- erreur d'horloge satellitaire,	3.0	3.0	#0
- perturbations satellitaires,	1.0	1.0	#0
- disponibilité sélective (SA)	30	0	#0
- divers : radiation thermique,...	0.5	0.5	#0
Secteur de contrôle :			
- incertitudes sur les éphémérides,	4.2	4.2	#0
- divers : satellitaire,...	0.9	0.9	#0
Secteur utilisateur :			
- délai ionosphérique,	5.0	5.0	#0
- délai troposphérique,	1.5	1.5	#0
- bruit électronique : récepteur,	1.5	1.5	1.5
- multi-trajets,	2.5	2.5	2.5
- divers	0.5	0.5	0.5
σ UERE	31	8	3

D'après la valeur de l'UERE (User Equivalent Range Error), le DGPS est nettement plus précis que le GPS naturel. En effet et grâce au DGPS, des sources d'erreur ont été complètement annulées (SA et erreur d'horloge satellitaire). Toutefois d'autres sources d'erreur persistent (les multi-trajets et le bruit du récepteur) ce qui signifie que la précision atteignable par le DGPS dépend du site et de la qualité du récepteur utilisé. Le système DGPS utilise un récepteur GPS placé à un endroit connu (station de base) et un autre mobile.

Le premier récepteur mesure au moins le code C/A et calcule à chaque instant (t) l'erreur entre l'emplacement déterminé par signaux GPS et son emplacement connu. Cette erreur ainsi que sa vitesse de variation est ensuite transmise par une liaison sans fil au récepteur mobile (Figure 1). Celui-ci est capable d'utiliser cette information pour corriger sa position calculée à partir des signaux GPS reçus.



Etant donnée le temps parcouru par les corrections entre la station de référence

et le mobile, il existe une évolution de ces erreurs dans le temps. Il faut donc tenir compte de cette vitesse de variation afin d'extrapoler au mieux les corrections à appliquer au mobile. La correction qui est effectivement appliquée au niveau de chaque pseudo-distance du mobile est donnée par (Botton et al, 2005) : $PRC(t_1)=PRC(t_0)+RRC(t_0) \cdot (t_1 - t_0)$

Avec:

- t_1 : instant d'application de la correction au niveau du mobile ;
- t_0 : instant d'élaboration de la correction au niveau de la référence ;
- $PRC(t_0)$: correction sur la pseudo-distance élaborée à t_0 ;
- $RRC(t_0)$: vitesse de variation de la correction élaborée à t_0 .

Le choix d'une source des corrections DGPS est étroitement lié au besoin de l'utilisateur. En effet on peut opter pour un DGPS en temps réel ou en temps différé selon l'utilisation. En temps différé, il s'agit d'effectuer un post-traitement à partir des fichiers d'observations, en formant les différences nécessaires à l'estimation du vecteur entre les deux stations. Un exemple courant de ce mode est l'utilisation des stations de référence opérantes en continu (CORS) qui est un groupe de 100 stations GPS de référence fournissant des mesures de code et de phase aux utilisateurs pour des applications de post-traitement. Ces données GPS sont enregistrées pour un taux de 30 secondes dans un format RINEX 2.1 et sont disponibles pour 31 jours sur le site web CORS. Leur utilisation consiste à télécharger ces fichiers RINEX, les renommer et les décompresser pour enfin appliquer un post-traitement avec Trimble Pathfinder Office ou autres logiciels de correction différentielle (www.ngs.noaa.gov).

En temps réel, la station fixe estime à chaque instant sa position à partir des mesures de code, puis la compare à la position "vraie". A partir de cet écart, elle apporte à chaque mesure de code une correction pour ramener la position estimée à la même valeur que la position "vraie" et transmet ces corrections. A ce niveau, on peut utiliser sa propre station fixe ou recourir à des satellites géostationnaires.

Quatre types de vecteurs peuvent être utilisés pour ces transmissions. On distingue la voie directe par l'utilisation des protocoles de communication radioélectriques sans fil VHF ou UHF. Puis la voie RDS (Radio Data System) qui est destinée essentiellement aux automobilistes qui, grâce à leur autoradio, peuvent recevoir les corrections DGPS déjà modulées en sous porteuse FM. Il y'a aussi la voie GSM ou GPRS qui assure la liaison d'appel du récepteur utilisateur vers la station de référence. Enfin, on trouve la voie de satellites géostationnaires qui assure une rediffusion des corrections reçues de la part de la station de référence (montante) sur une couverture définie. Pour les liaisons de type radio, plus la fréquence augmente plus le volume de données qui peut être transféré par unité de temps augmente. Ainsi VHF et UHF sont souvent utilisées dans le cadre des liaisons terrestres pour une portée donnée par (Wellenhof et al, 2001) :

$$d = 3,57 * \sqrt{k} * (\sqrt{ht} + \sqrt{hr})$$

Les paramètres ht et hr indiquent les hauteurs en mètre des antennes émettrice et réceptrice respectivement par rapport au niveau moyen du terrain. Le facteur k dépend du gradient vertical et de la réfraction et varie entre 1.2 et 1.6.

La communication par satellites emploie des fréquences de l'ordre du GigaHertz et permet des flux de données allant jusqu'à 19200 bps voire plus sur de longues distances. L'échange des corrections entre le récepteur et le mobile a été standardisé depuis 1985 en adoptant le standard RTCM104 (Radio Technical Commission for Maritime Services, Special Committee

104) disponible sous plusieurs versions (la version 2.2 par exemple est RTCM 1998). Le message ainsi transmis est quasiment identique au message GPS de navigation (Wellenhof et al, 2001).

2.2 Le DGPS en temps réel à large couverture (RTDGPS)

Il existe Aujourd'hui des services mondiaux pour la diffusion des corrections GPS qui fonctionnent suivant le principe du WADGPS (Wide Area DGPS). Les corrections sont calculées à partir d'un réseau de stations et non pas d'une station isolée, d'où une meilleure qualité des corrections. Il y a une décorrélation des sources d'erreurs: ionosphère, troposphère, horloges satellites et une cartographie de ces erreurs ainsi que l'estimation de la vitesse d'évolution de la correction au cours du temps.

Une autre technique aussi utilisée est la station de référence virtuelle (VRS: Virtual Reference Station). En effet, à partir des cartes de corrections transmises et de la vitesse d'évolution de la correction, le récepteur mobile reconstitue les corrections qui seraient fournies par une station fixe se trouvant à l'emplacement donné par ces coordonnées de navigation (Botton et al, 2005). A l'échelle du globe, deux systèmes RTDGPS existent aujourd'hui: LandSTAR développé par la société française RACAL (Thales) et OmniSTAR développé par la multinationale allemande Fugro. Ces services de corrections DGPS ont une couverture mondiale et fournissent (24/24 h) des corrections qui sont retransmises aux utilisateurs par des satellites géostationnaires. En effet, un réseau de stations GPS transmet les observations à un centre de contrôle qui, après calculs des corrections, les transmet à un satellite géostationnaire de relais pour une diffusion cryptée. L'accès à ce type de service est payant.

Parmi ces services, l'OmniSTAR constitue un réseau mondial de stations qui analyse les signaux GPS en permanence. Trois stations de contrôle déterminent les corrections à apporter aux signaux des satellites en tout lieu. Les corrections sont transmises à l'aide de satellites géostationnaires offrant une couverture de l'ordre de 90 % des terres émergées. L'Europe est entièrement couverte. "Ce système nécessite un matériel spécial pour recevoir et décoder les signaux ainsi qu'un abonnement" (Correia, 2000). (www.geoafrica.co.za).

La couverture du service est mondiale, pour cela il convient de souscrire un abonnement adapté à la zone de réception souhaitée du signal. Le satellite étant plus haut dans le ciel que n'importe quelle antenne radio terrestre fait que l'utilisateur n'a ni à acheter ni à mettre en station sa propre base. La seule contrainte pour l'utilisateur est de rester "à vue" de ce satellite. A noter que le service OmniSTAR utilise six satellites de grandes puissances sur les bandes de fréquences spécifiques. Son principe de fonctionnement est basé sur des satellites GPS qui passent en continue à vue des stations de références. Chaque station de référence reçoit les signaux et détermine son propre jeu de corrections qui est ensuite acheminé vers les stations de contrôle qui vérifient chaque 24h la qualité des données, en particulier l'intégrité des données provenant des satellites. Les données de correction des stations sont régulièrement transmises à des satellites géostationnaires qui assurent la rediffusion de ces corrections sur une zone géographique étendue mais bien définie.

Au niveau de l'utilisateur, le récepteur compatible OmniSTAR reçoit les jeux de corrections via une antenne omnidirectionnelle, les démodule et les traite en tenant compte de sa propre position absolue, en appliquant le principe dit de la station virtuelle (VBS = Virtual Base Station). A ce niveau on distingue deux situations :

- "Si l'utilisateur est localisé dans une zone géographique limitée, les corrections sont alors calculées en un ou plusieurs points choisis par l'utilisateur, qui travaille comme

si une station de référence réelle positionnée sur ces points lui envoyait ces corrections DGPS (cette station étant par exemple située à l'emplacement initial de l'utilisateur).

- Si l'utilisateur souhaite disposer du service dans une zone plus large (régionale ou continentale), sans savoir à l'avance où il peut se trouver, le microprocesseur inclus dans le récepteur OmniSTAR calcule alors de façon dynamique le meilleur jeu de corrections applicables à l'utilisateur, en fonction de sa position, en appliquant une moyenne pondérée des données de correction des stations de référence les plus proches (la pondération se fait en fonction de la distance du mobile à la station, mais également en fonction de la qualité intrinsèque du jeu de corrections correspondant) "(Botton et al, 2005).

3. L'ETUDE EXPERIMENTALE

3.1 Matériels et méthodes

3.1.1 Les outils de localisation :

Les outils exploités dans cette étude expérimentale sont :

- Une paire d'antenne, HuaceNav X90, de type bi-fréquence pour la localisation en mode différé;
- 3 paires d'antennes Trimble Pathfinder ProXRT, qui combinent la technologie H-star de Trimble et permettent la correction par OmniSTAR et la possibilité d'intégrer des satellites GLONASS ;
- Les 2 stations permanentes de type Leica du réseau des stations GPS permanentes de l'Agence Nationale de la Conservation foncière, du Cadastre et de la Cartographie.

3.1.2 Les outils logiciels

Les récepteurs Pathfinder ProXRT sont exploités par le logiciel Terrasync qui permet d'appliquer les corrections aux observations sur le terrain. Il est capable de collecter des données H-STAR et d'enregistrer les résultats sous format de fichiers (.SSF). Pour le post-traitement du Pathfinder, on a utilisé le PathFinder Office qui est compatible avec tous les logiciels de saisie terrain capables de générer des fichiers de données brutes au format SSF. Pour effectuer le post traitement des observations conduites par les autres récepteurs, on a utilisé trois logiciels commerciaux qui sont le Trimble Géomatics Office, le Leica Géomatics Office et le logiciel GNSS Solutions.

3.2 La campagne d'observation

Le but derrière la conduite d'une campagne d'observation est de déterminer un réseau de points de contrôle (GCP) pour la rectification des images satellitaires. La précision exigée sur la détermination horizontale des points GCP est de l'ordre décimétrique qui est largement suffisant pour ce cas d'étude. Les différentes missions de cette campagne d'observations sont en nombre de trois comme décrites dans les paragraphes ci-dessous.

3.2.1 Mission 1 : Observation des points en mode statique

Cette première mission a été planifiée pour le choix des emplacements des 25 GCP localisés sur une grille de $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ en latitude et en longitude. La zone est comprise entre les latitudes 34°N et 35°N et les longitudes 5°W et 6°W . La planification a été assurée par l'usage de l'interface Google Earth qui a facilité la définition des sites et le choix des itinéraires de navigation entre les GCP (Figure 2).



Figure 2: Visualisation globale des points sous Google Earth (à gauche) avec un zoom sur le point 34N5W-5 (à droite)

Ensuite, les points sont observés en mode statique par les récepteurs X90 de HuaceNav pour un temps d'occupation moyen de 90 minutes.

3.2.2 Mission 2 : Observation des points en mode OmniSTAR

La deuxième mission a concerné une zone comprise entre les latitudes 33°N et 34°N et les longitudes 3°W et 5 °W. L'emplacement des points a été effectué grâce à une carte de reconnaissance et une préparation journalière grâce à Google Earth. Chaque point a été observé en utilisant le récepteur GPS Pathfinder ProXRT de Trimble pour un temps d'occupation moyen de 12,5 minutes. Les croquis des points GCP ont été établis simultanément pour le repérage des points. Toutes les observations effectuées sont transférées quotidiennement sous formats (.SSF). Les données de la première et la deuxième mission sont exploitées lors de l'analyse des résultats pour évaluer le rendement.

3.2.3 Mission 3 : Réobservation de la première mission par le service OmniSTAR

Il s'agit dans cette troisième mission de sélectionner parmi l'ensemble des points GCP observés en mode statique de la mission 1 un échantillon de points à observer en utilisant le service OmniSTAR HP. Ce choix des points est conditionné par des raisons logistiques et techniques essentiellement. Ainsi dix points ont été adoptés. Chaque point a été observé en utilisant le récepteur GPS Pathfinder ProXRT de Trimble pour un temps d'occupation moyen de 30 minutes.

3.3 Le traitement des observations

3.3.1 Le Post traitement par logiciels commerciaux

Les trois logiciels commerciaux exploités pour déterminer en post traitement les coordonnées des GCP observés sont le TGO, le LGO et le GNSS. Chaque logiciel adopte une stratégie de traitement et de vérification des attitudes des résultats. Chaque logiciel dispose d'une série de critères pour juger de la qualité des résultats finaux. L'étape principalement considérée essentielle pour les trois logiciels et le traitement des lignes de bases.

Le logiciel TGO utilise trois paramètres pour juger de la qualité de calcul. Il utilise le ***ratio*** en se basant sur la comparaison des variances respectives des meilleures solutions fixes. Il est le rapport entre la variance de la solution qu'il y a de mieux avant la meilleure solution divisée par la variance de cette dernière. Pour indiquer avec quel degré de succès les données observées s'adaptent à la solution de la ligne de base, il exploite la notion la ***variance de***

référence. Enfin, pour renseigner sur la précision des mesures utilisées pour déterminer la solution de la ligne de base, le TGO exploite le RMS (l'erreur moyenne quadratique) qui est basé seulement sur le bruit mesuré des observations (SNR) car il est indépendant de la géométrie des satellites (GDOP). Le logiciel TGO se base dans l'acceptation des lignes de bases sur le critère le plus mauvais, ceci est pris en considération lors de la validation des résultats du traitement (Stifa, 2009).

Pour évaluer les résultats obtenus par chaque logiciel, on doit tenir compte de certains facteurs ou de certains modèles pour vérifier des tests. Pour le TGO, on utilise le facteur de référence pour effectuer le test de Chi-Carré. Le facteur de référence (FR) indique une valeur qui renseigne sur la qualité de la correspondance des erreurs à posteriori de l'ajustement avec les résidus des observations, sachant que chaque type d'observation a ses propres erreurs estimées. Quant au test du Chi-Carré qui consiste en une évaluation du facteur de référence du réseau et des degrés de liberté. Si le FR est proche de 1, les degrés de liberté sont admissibles et le réseau s'adapte mathématiquement, alors l'ajustement de réseau devrait passer le test du chi carré.

Pour le LGO, il utilise le test F de Fisher pour vérifier l'hypothèse nulle H_0 qui stipule que :

- Il n'y a pas d'erreurs grossières présentes dans les observations;
- Le modèle mathématique donne une description exacte des relations entre les observations et les paramètres;
- Le modèle stochastique choisi pour les observations décrit correctement les propriétés stochastiques des observations.

Le test F est souvent appelé le test du modèle d'ensemble, parce qu'il teste le modèle en général. La valeur de F est testée contre une valeur critique de la distribution F, qui est une fonction de la redondance et du niveau de signification. L'hypothèse H_0 est également rejetée lorsque le modèle mathématique est incorrect, ou n'est pas assez raffiné. L'information fournie par le test F, à savoir l'acceptation ou le rejet de H_0 n'est pas très précise. Si on soupçonne que H_0 est refusée en raison d'une erreur grossière présente dans l'une des observations, il faut alors procéder à un autre test de Watson (W) afin de rechercher des erreurs dans les observations individuellement.

Un rejet du test F ne mène pas directement à la source du rejet lui-même. Dans ce cas d'autres hypothèses doivent être formulées pour décrire une erreur ou une combinaison d'erreurs possibles. Il y a un nombre infini d'hypothèses qui peuvent être formulées comme une alternative pour l'hypothèse nulle H_0 . Plus ces hypothèses sont complexes, plus difficile serait leur interprétation. Une hypothèse simple mais efficace est la dite hypothèse conventionnelle alternative fondée sur l'hypothèse qu'il y a une aberrance présente dans une seule observation tandis que toutes les autres sont correctes.

L'hypothèse précitée suppose qu'il y a juste une observation erronée à la fois. Cette méthode fonctionne très bien pour les observations, par exemple les distances, les azimuts et les différences de hauteurs. Toutefois, pour certains cas il n'est pas commode de tester les composantes DX, DY, DZ du vecteur séparément. À cet effet, il y a le test T de Student qui peut être à 2 ou à 3-dimensions. Ce test comme les deux autres, a son propre niveau d'importance et sa propre valeur critique (Stifa, 2009).

La qualité des résultats obtenus par le logiciel GNSS Solution est décrite par deux tests de base tels que le test Tau et le test QA. Le test Tau examine les valeurs résiduelles comme indicateur de qualité sur les observations individuelles. Ce test consiste à vérifier automatiquement si les valeurs résiduelles pourraient refléter une observation aberrante. En

effet, le résidu normalisé d'observations est exploité pour déterminer si statistiquement la valeur résiduelle est attendue au sein des limites calculées. Chaque résidu normalisé est testé avec deux résultats possibles. Le test Tau réussi indique que l'ampleur du résidu normalisé n'est pas supérieure à la limite de la valeur résiduelle. C'est habituellement une bonne indication que l'observation est exempte d'anomalie. Le test Tau échoue indique que l'ampleur de l'état normalisé est plus important que prévu. L'observation doit donc être contrôlée.

Pour évaluer automatiquement la précision pour chaque point de contrôle, le GNSS utilise le test QA (ou tie test. Ceci est accompli grâce à l'exploitation d'un des points de contrôle fixé dans l'ajustement imperceptiblement contraint en comparant sa position corrigée à la position connue. Un test compare ensuite les spécifications de la précision introduite par l'utilisateur et la précision calculée pour chaque point de contrôle. Si le test QA réussit, la précision calculée du point de contrôle testé se réunit aux spécifications introduites. C'est une indication que le point de contrôle peut fixer dans l'ajustement complètement contraint. Si le test QA échoue, les résultats de la précision calculée ne répondent pas à ces spécifications. Si ce point de contrôle est tenu fixé dans l'ajustement cela entraînerait une dégradation de la précision du réseau. Dans un tel cas, le point de contrôle devrait être examiné en détail pour déterminer si une faute n'a pas été commise lors de la saisie des coordonnées du point de contrôle. Si aucune erreur n'est relevée, une décision doit être faite pour déterminer si ce point pourrait être tenu fixe ou non.

L'ensemble des résultats relatifs aux écart-types des valeurs ajustées des latitudes et longitudes dans le cas de notre réseau sont illustrés dans le tableau 2 ci-dessous.

Tableau 2 : résultats ajustés du réseau σ_φ : écart type sur la latitude, σ_λ : écart type sur la longitude, σ_{he} : écart type sur l'élévation ellipsoïdale.									
Logiciel Point	TGO (cm)			LGO (cm)			GNSS (cm)		
	σ_φ	σ_λ	σ_{he}	σ_φ	σ_λ	σ_{he}	σ_φ	σ_λ	σ_{he}
3311	0,7	0,8	1,9	3,4	4,7	6,9	2,6	3,8	11,9
3312	1,0	1,6	3,4	4,2	2,9	8,6	4,4	3,0	22,9
3341	0,6	0,9	1,6	1,6	1,3	3,3	0,6	0,6	4,4
3352	1,1	1,1	2,2	4,9	10,9	11,4	4,0	5,1	18,6
3356	0,6	0,7	1,5	2,6	2,1	5,7	3,1	4,6	7,8
3451	0,7	0,9	1,7	19,6	25,5	40,0	4,4	5,0	6,8
3452	0,7	1,1	2,2	4,3	3,3	9,7	2,8	4,7	10,0
3453	0,8	1,1	2,5	4,5	3,5	9,6	2,7	4,0	5,7
3454	0,9	1,3	2,7	4,1	3,1	7,6	1,8	2,2	3,4
3455	1,0	1,4	3,2	2,2	1,7	5,1	0,5	0,6	1,0

3.3.2 Positionnement Ponctuel Précis (PPP)

La technique du Positionnement Ponctuel Précis (Precise Point Positioning) a émergé dans la dernière décennie pour fournir une précision sur la position de l'ordre du décimètre sur de très grandes régions géographiques. Dans le système PPP, l'utilisateur emploie l'horloge et les positions précises des satellites calculées et fournies par un réseau externe (comme celles

organisées par IGS). Cette technique peut être considérée comme un DGPS basé code qui fonctionne sur de vastes régions (Kaplan et Hegarty, 2006). La technique utilise des observations (non différentielles) de phase et de code pour les deux fréquences, ainsi que les orbites précises, pour arriver à une précision parfois subdécimétrique pour un point unique (statique ou cinématique). Cela est possible si on tire profit, en plus des estimations des horloges et des orbites précises des satellites, de la modélisation des effets systématiques qui causent des variations de l'ordre du centimètre dans les mesures GPS.

Contrairement au positionnement relatif, les erreurs communes ne disparaissent pas dans le PPP et ne sont pas aussi minimisées. Certains des ces erreurs sont (Asgari, 2005):

- Les mouvements du phénomènes que les mouvements marées terrestres et océanique;
- Les erreurs que les effets de la l'ionosphère et le
- Les erreurs liées aux les horloges, centre de phase de relativité et la phase
- Les erreurs dues au l'excentricité du l'antenne et la phase

Tableau 4 : Ecart types des résultats par OmniStar temps réel			
POINT	σ_{horiz} (cm)	σ_{he} (cm)	PDOP
3311	22	15	3,53
3312	21	14	2,89
3341	15	12	2,91
3352	19	16	2,15
3356	20	15	2,00
3451	29	12	2,01
3452	14	14	2,22
3453	22	24	2,14
3454	16	13	2,22
3455	27	28	3,58

site dus à des géophysiques tels tectoniques, les la surcharge d'observation telles troposphère, de multi-trajet; satellites tellesque l'excentricité du l'antenne, la initiale de l'antenne; récepteur à savoir centre de phase de de l'antenne.

Dans le cadre de cette étude, on a utilisé le service du Centre canadien de télédétection CSRS-PPP (Canadian Spatial Reference System-Precise Point Positioning) pour le traitement PPP des données. Ce service se base sur les meilleures éphémérides précises disponibles (finales, rapides ou ultrarapides) pour le traitement des fichiers d'observations GPS en mode statique (monofréquence et bifréquence) ou cinématique. Le service nous a renvoyé après inscription, les résultats par email. Le résultat récupéré pour chaque point est structuré en un fichier compressé contenant les différents détails du traitement, en un résumé des résultats sous format PDF et en un fichier compressé contenant les résiduels des observations et les azimuts et élévations des satellites utilisés conformément à la dernière version des éphémérides de l'IGS.

Par souci de synthèse, on s'est contenté des résultats traités dans l'ITRF 2005, sachant que celui-ci est pratiquement confondu avec le WGS84 pour des applications non scientifiques (10 cm environ) (Botton et al, 2005). L'effet sur les coordonnées ne dépasse pas les deux à trois centimètres de différence (CSRS-PPP). La précision sur la détermination augmente avec la période longue d'acquisition pour permettre la résolution des ambiguïtés. Ceci dépend évidemment des conditions d'observations et du matériel utilisé (CSRS-PPP). Les résultats obtenus pour les différents points de l'étude sont décrits dans le tableau 3.

3.3.3 Positionnement en Temps Réel

On a opté pour un temps d'occupation de 2000 secondes (plus que 30 min). Les résultats des écarts types des points collectés au niveau terrain en temps réel sont donnés par le tableau 4.

Tableau 3 : Ecart types des résultats par traitement PPP Mise en œuvre d'OmniSTAR				Tableau 4 : Ecart types des résultats par OmniStar temps réel		
POINT	σ_{φ} (cm)	σ_{λ} (cm)	σ_{he} (cm)	σ_{horiz} (cm)	σ_{he} (cm)	PDOP
3311	3,6	6,8	14,9	22	15	3,53
3312	7,7	22,7	26,2	21	14	2,89
3341	3,7	6,7	15,3	15	12	2,91
3352	3,0	8,0	11,7	19	16	2,15
3451	6,5	9,7	24,3	20	15	2,00
3452	6,1	17,9	25,5	29	12	2,01
3453	3,6	8,4	10,5	14	14	2,22
3454	4,7	12,3	17,9	22	24	2,14
3455	6,0	19,9	19,0	16	13	2,22
3456	4,3	8,0	15,5	27	28	3,58

3.3.4 Calcul des positions par correction différentielle

Pour la correction différentielle (DGPS), la station de base effectue des enregistrements de la correction pour chaque satellite directement dans un fichier, ainsi que l'enregistrement de sa propre position. Le récepteur mobile enregistre également les mesures de chaque satellite de diffusion. Une fois la collecte de données est terminée, les deux fichiers sont transformés en utilisant le logiciel GPS Pathfinder office pour récupérer des données GPS corrigées en mode différentiel. La correction différentielle peut être sollicitée pour compléter et rectifier des observations en temps réel. Généralement, cette correction différentielle améliore l'exactitude des positions GPS entre 0,5 et 5 mètres, selon le récepteur et la technique de collecte des données. Pour une collecte de données de haute précision l'amélioration de l'exactitude peut atteindre le niveau centimétrique. Les régions qui ont des stations de référence peuvent fournir des données de base requises pour la correction différentielle.

Le logiciel Pathfinder office fournit de son côté une liste de certaines stations que l'on peut utiliser pour obtenir les données de base selon le récepteur et la technique de collecte de données utilisée (Guide Pathfinder ProXRT, 2009). Dans le cadre de cette étude, on a identifié un fournisseur en ligne des fichiers de bases qui seront utilisées. Ce choix est conditionné par un meilleur indice d'intégrité du fournisseur et un éloignement minimal par rapport au site des observations. Le fournisseur exploité est SOPAC (Stifa). Le résultat du traitement est décrit dans un ensemble de fichiers corrigés (.cor) comme indiqué dans le tableau 5.

Tableau 5: Résultats sous PFO des traitements			
POINT	σ_{φ} (cm)	σ_{λ} (cm)	σ_{he} (cm)
3311	30	30	70
3312	30	30	60
3341	30	30	60
3352	30	30	70
3356	20	20	50
3451	20	20	50
3452	20	20	50
3453	30	30	80
3454	30	30	50
3455	20	20	60

4. ANALYSE DES RESULTATS

Grâce à l'outil d'analyse statistique SPSS, on doit répondre dans le cadre de l'analyse des précisions, aux questions suivantes :

- Existe-t-il une différence significative entre les coordonnées obtenues en mode statique par traitement des données sous différents logiciels de post-traitement?

- Existe-t-il une différence significative entre les coordonnées obtenues en temps réel et celles obtenues après correction différentielle sous PathFinder Office (PFO)?
- Existe-t-il une différence significative entre les coordonnées obtenues en mode statique et celles obtenues en temps réel?
- Les coordonnées obtenues en mode statique, en temps réel et par la méthode PPP sont-elles significativement différentes et quelle combinaison de méthodes adopter?

4.1 Analyse de la précision

Pour un logiciel de post-traitement, la précision des observations en mode statique est fonction de la longueur de la ligne de base et du temps d'occupation (Tableau 6).

Tableau 6 : Un exemple des précisions attendues en mode statique sous un PDOP <3, élévation de 15° et poursuite d'au moins 6 satellites (Benaim ,2008). (σ_B =précision planimétrique ; σ_h =précision altimétrique)

	ligne de base	Durée	Epoque (s)	Ephémérides	Précision (mm)
Bifréquence (L1 & L2) $\sigma_B=3\text{mm}+10^{-6}D$ $\sigma_h=6\text{mm}+10^{-6}D$	20 km	1 h	10 ou 15	Ephémérides transmises	$\sigma_B = 23$ $\sigma_h = 26$
	30 km	2 h			$\sigma_B = 33$ $\sigma_h = 36$
	50 km	3 h			$\sigma_B = 53$ $\sigma_h = 56$
	100 km	4 h			$\sigma_B = 103$ $\sigma_h = 106$

La plupart des erreurs de positionnement par GPS sont des erreurs de type systématique, qui ne sont pas prises en compte dans le calcul des écarts types à posteriori. En utilisant des logiciels commerciaux pour le traitement, la difficulté majeure qui se pose est le choix de la pondération pour les lignes de base en entrée du logiciel. La solution optimale à cette situation est de procéder à une pondération des observations en utilisant des écarts types d'un modèle théorique. Toutefois le succès de cette approche reste étroitement dépendant de la qualité et de la complexité du modèle d'erreur choisi (Botton et al, 1997).

4.1.1 En mode statique

L'objectif d'entamer cette comparaison par des statistiques descriptives est de détecter l'existence de valeurs aberrantes qui peuvent biaiser notre analyse. Le post traitement sous chaque logiciel commercial concerne dix points GCP avec leurs coordonnées latitudes, longitudes et élévations géocentriques. Chaque coordonnée est traitée séparément de l'autre. La première étape a consisté de tester l'homogénéité des variances de groupe basée sur le calcul de la statistique de Levene. Ce résultat du test a montré que les variances sont homogènes car la signification a une valeur de 1 qui est supérieure à 5% (Tableau 7).

Tableau 7 : Test d'homogénéité de variance des coordonnées en mode statique

	Statistique de Levene	ddl1	ddl2	Signification
Latitude	2,05312E-12	2	27	1
Longitude	1,4658E-13	2	27	1
Élévation géocentrique	1,05767E-06	2	27	0,999998942

Ensuite, on a procédé à l'analyse de la variance à un seul critère pour tester l'hypothèse d'égalité des moyennes des coordonnées des 10 points GCP (Tableau 8).

Tableau 8 : Test d'égalité des moyennes des coordonnées des points GCP

		Somme des carrés	ddl	Moyenne des carrés	F	Signification
Latitude	Inter-groupes	2,64E-15	2	1,3233E-15	9,849E-14	1
	Intra-groupes	0,36271	27	0,0134352		
	Total	0,36271	29			
Longitude	Inter-groupes	6,81E-14	2	3,4459E-14	3,216E-13	1
	Intra-groupes	2,892847	27	0,10714236		
	Total	2,892843	29			
Élévation ellipsoïdale	Inter-groupes	0,008256	2	0,0041281	1,464E-07	0,999999
	Intra-groupes	761203,0	27	28192,7073		
	Total	761203,1	29			

Le Tableau 8, suite au test de l'analyse de la variance ANOVA1 sous SPSS, indique qu'à un niveau de confiance égale à 99,9% la différence entre les coordonnées des points GCP n'est pas significative. Donc les résultats (φ , λ , h) des points GCP obtenus par post-traitement en utilisant les trois logiciels commerciaux sont indépendants du logiciel utilisé.

4.1.2 En mode OmniSTAR

Dans ce cas, on doit vérifier est ce que la différence des coordonnées est significative à 95% si on exploite les résultats obtenus directement en temps réel par Omnistar et ceux obtenus après un post traitement sous PFO, le cas où on a utilisé la correction différentielle. On peut effectuer une analyse de variance pour vérifier l'homogénéité des variances des moyennes des positions des différents points GCP. De même, on peut élaborer une analyse ANOVA1 pour indiquer si les valeurs des coordonnées des points en latitudes, longitudes et élévations ellipsoïdales ne présentent pas de différences significatives. La signification du test est pratiquement 1, c'est-à-dire que les variances des moyennes sont homogènes (Tableau 9).

Tableau 9 : Test d'homogénéité de variance des coordonnées en mode statique

	Statistique de Levene	ddl1	ddl2	Signification
Latitude	4,77551E-10	1	18	0,999982804
Longitude	1,2641E-11	1	18	0,999997202

A partir du tableau 10, on peut conclure que la différence entre les valeurs des coordonnées des points GCP n'est pas significative à un degré de confiance de 99%. Cette analyse concerne uniquement les valeurs des latitudes et longitudes.

Donc les positions planimétriques recueillies au niveau du terrain par correction différentielle en temps réel grâce au service OmniSTAR ne diffère pas significativement des résultats obtenus après correction différentielle sous PFO. En d'autre terme, on peut se limiter aux coordonnées OmniSTAR terrain puisque cette deuxième, correction différentielle n'a pas apporté d'amélioration.

Tableau 10 : Test d'égalité des moyennes des coordonnées des points GCP

		Somme des carrés	ddl	Moyenne des carrés	F	Signification
Latitude	Inter-groupes	1,7E-11	1	1,7E-11	1,36E-09	0,999971
	Intra-groupes	0,241834	18	0,013435		
	Total	0,241834	19			
Longitude	Inter-groupes	1,7E-10	1	1,7E-10	1,67E-09	0,999967
	Intra-groupes	1,928550	18	0,107141		
	Total	1,9285506	19			

4.1.3 Comparaison des modes statique, OmniSTAR et PPP

Puisqu'on a conclu que les résultats des post-traitements en mode statique (PTS) sont identiques, on peut choisir indifféremment le résultat d'un logiciel quelconque (TGO par exemple). D'autre part on a conclu que les coordonnées OmniSTAR terrain sont pratiquement identiques aux résultats après correction sous PFO. En introduisant la méthode PPP, on analysera ici la convergence des trois solutions. Pour cette fin, on forme les différences des coordonnées des trois groupes (la latitude et la longitude) suivant les logiciels comme suit : (PPP – PTS) dénotée code 1, (PPP – OmniSTAR) dénotée code 2 et (PTS – OmniSTAR) dénotée code 3.

On réalise d'abord un test d'homogénéité de variances des différences entre coordonnées (Latitudes et Longitudes) des trois groupes : modes statique, OmniSTAR et PPP. Le test de Levene utilisé présente une valeur qui s'éloigne largement de 1. Ceci permet de conclure que les variances sur les moyennes ne sont pas homogènes (Tableau 11).

Tableau 11 : Test d'homogénéité de variance des différences de coordonnées entre les trois groupes

	Statistique de Levene	ddl1	ddl2	Signification
Latitude	20,8296492	2	27	3,37264E-06
Longitude	7,990642186	2	27	0,001879919

On procède ensuite à une analyse de variance pour tester l'hypothèse nulle consistant à vérifier est ce qu'il ya une différence significative à un niveau de risque entre les différences de coordonnées des trois groupes. Le test d'analyse de variance a révélé qu'il y a une différence significative entre les différences de coordonnées des trois groupes à un niveau de risque de 5% (Tableau 12).

Tableau 12: Test d'égalité des moyennes des coordonnées des points GCP

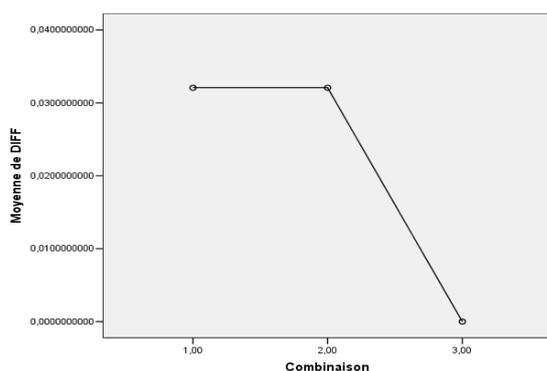
		Somme des carrés	ddl	Moyenne des carrés	F	Signification
Latitude	Inter-groupes	0,0068241	2	0,003428	3,557989	0,042508905
	Intra-groupes	0,0260173	27	0,000963		
	Total	0,0328755	29			
Longitude	Inter-groupes	0,2227197	2	0,111359	4,277175	0,024342132
	Intra-groupes	0,7029677	27	0,026035		
	Total	0,9256875	29			

Puisque l'hypothèse nulle de l'ANOVA1 n'est pas vérifiée, on procède au test Post hoc pour indiquer lesquelles des trois paires de groupes sont différentes. La method adoptée pour établir ce test est celle de Tukey puisqu'elle est sensible à la détection de petites différences entre les couples de moyennes. Les différents résultats sont décrits dans le tableau 13.

Tableau 13: Test de Tuckey						
	Comb.	Comb.	Différences	Signification	Intervalle de confiance à 95%	
	(I)	(J)	(I-J)		Borne inférieure	Borne supérieure
Latitudes	Codes 1	Code 2	2,501E-07	1	-0,1789163	0,178916804
		Code 3	0,182778577	0,044532665	0,00386202	0,36169513
	Codes 2	Code 1	-2,501E-07	1	-0,1789168	0,178916304
		Code 3	0,182778327	0,044533001	0,00386177	0,36169488
	Codes 3	Code 1	-0,182778577	0,044532665	-0,36169513	-0,003862023
		Code 2	-0,182778327	0,044533001	-0,36169488	-0,003861773
Longitudes	Codes 1	Code 2	2,501E-07	1	-0,1789163	0,178916804
		Code 3	0,182778577	0,044532665	0,00386202	0,36169513
	Codes 2	Code 1	-2,501E-07	1	-0,1789168	0,178916304
		Code 3	0,182778327	0,044533001	0,00386177	0,36169488
	Codes 3	Code 1	-0,182778577	0,044532665	-0,36169513	-0,003862023
		Code 2	-0,182778327	0,044533001	-0,36169488	-0,003861773

On remarque que la combinaison des différences (codes 1, codes 2) dans le test a une signification de 1 alors que les combinaisons (codes 1, codes 3) et (codes 2, codes 3) ont une signification qui s'éloigne largement de la valeur 1. Cela signifie que les deux dernières combinaisons présentent une différence significative contrairement à la première. Donc, la différence (PTS, OmniSTAR) s'écarte des deux autres qui contiennent le PPP. Pour décider de la différence à adopter, on se réfère aux diagrammes des moyennes ci-dessous (Figure 3).

Diagrammes des moyennes



Diagrammes des moyennes

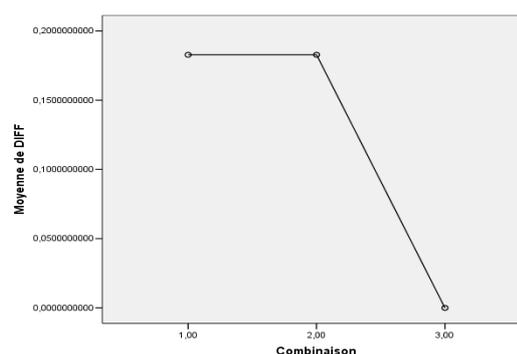


Figure 1 : Diagramme des moyennes des différences de latitudes (à Gauche) et de longitudes (à Droite) sous SPSS

On peut déduire que les deux solutions des modes post traitement en statique et Omnistar (PTS, OmniSTAR) convergent vers les mêmes résultats en termes de latitudes et longitudes vu que leur différence tend vers 0.

4.2 Evaluation du mode OmniStar par rapport au Statique

4.2.1 Indicateurs de précision

Puisque les deux solutions (statique et OmniSATR) se sont avérées meilleures, il est indispensable d'analyser la précision de localisation de chacune d'elles par rapport à l'autre. La notion fondamentale exploitée est l'erreur moyenne quadratique RMS (Root Mean Square). En effet, l'unité de base utilisée pour l'évaluation de l'erreur dans le domaine du GPS est le DRMS (Distance Root Mean Square) qui est l'erreur moyenne quadratique de distance. La valeur RMS représente la plage au sein de laquelle 68% d'un groupe de positions va tomber. C'est en d'autres mots la probabilité de 68% qu'une seule position sera dans l'intervalle de la valeur RMS. Par inférence, il y a 32 % de chance qu'une position sera plus loin de la valeur RMS (Kaplan et Hegarty, 2006).

$$\text{DRMS} = \sqrt{\sigma_{\varphi}^2 + \sigma_{\lambda}^2}$$

D'après le tableau des caractéristiques du matériel bifréquence utilisé en mode statique on a la précision horizontale en mode statique est : + 5mm + 1 ppm RMS. La solution OmniSTAR quant à elle est déclarée de précision décimétrique voire subdécimétrique pour des temps d'occupation élevés. La précision nominale de l'outil OmniSTAR HP selon le mode d'utilisation et le temps d'occupation est donnée comme suit (www.fugro.com) :

- Précision de OmniSTAR HP en mode dynamique :
 - Au niveau de un mètre à la première minute.
 - 50 cm après dix minutes (écart – type 3D)
 - 30 cm après 25 minutes (écart – type 3D)
 - 4-5 cm après plusieurs heures (écart – type 3D).
- Précision de OmniSTAR HP en mode statique :
 - 30 cm dans 10 minutes (écart – type 3D)
 - 4-5 cm après une heure (écart – type 3D).

En mode statique la position converge beaucoup plus rapidement. Pratiquement, cette précision dépend des conditions d'observations, en particulier : le PDOP, le nombre de satellites observés, leurs élévations, le SNR etc. Plusieurs tests ont montré que la précision se situe au niveau du deuxième décimètre après 30 minutes d'observation. La précision du décimètre en planimétrie peut être atteinte en moins d'une heure généralement. Cette précision a été validée par un procédé pratique en observant plusieurs points (à l'intérieur du campus IAV). Le résultat obtenu après import du fichier SSF sous PFO est un nuage de positions dont la précision s'améliore en fonction du temps d'occupation (Figures 4 et 5).

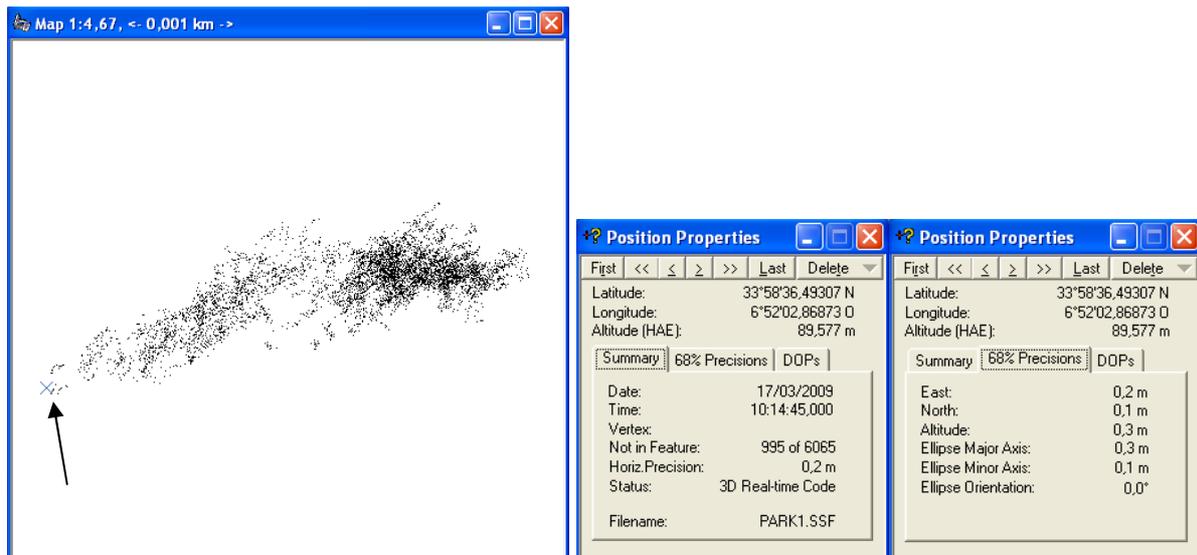


Figure 0 : Position enregistrée dans les premières minutes d'observation (nuage éparpillé)

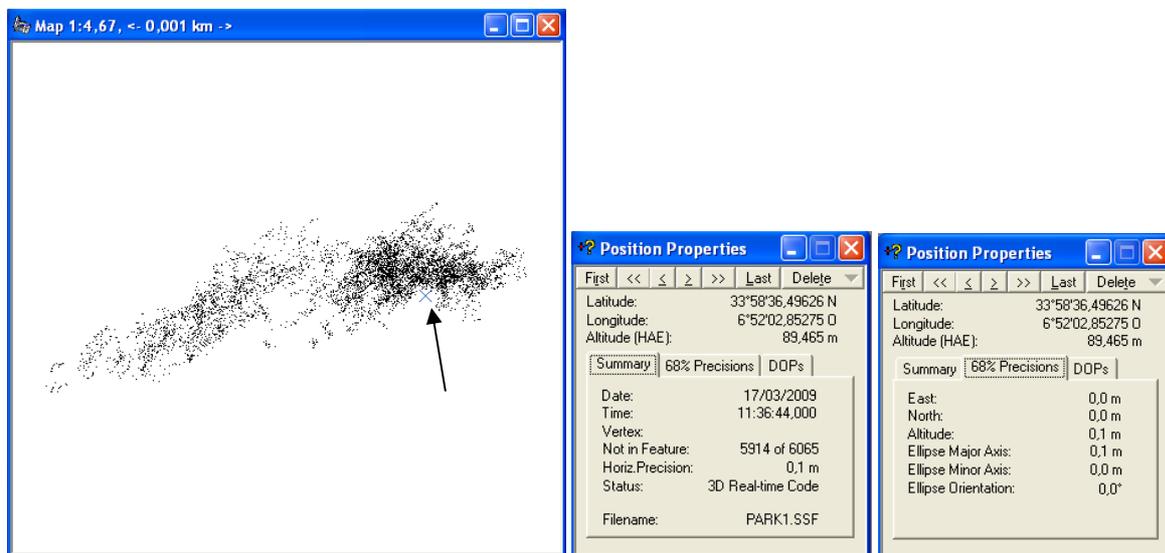


Figure 5 : Position enregistrée vers les dernières minutes d'observation (nuage dense)

La précision décimétrique nous donne le seuil de la ligne de base à partir duquel les deux méthodes OmniSTAR et statique peuvent être comparables. En résolvant l'équation : $5\text{mm} + 10^{-6} * D = 100 \text{ mm}$ on obtient la longueur de la ligne de base limite : $D = 95 \text{ km}$. Sans tenir compte du temps d'occupation on a :

- Pour $D < 95 \text{ km}$ le mode statique est nettement plus précis (précision $< 10 \text{ cm}$) ;
- Pour $D > 95 \text{ km}$ le mode OmniSTAR est nettement plus précis (précision = 10 cm indépendamment de la longueur de base).

Toutefois cette comparaison n'est pas tout à fait indépendante du temps d'occupation. En effet, on peut atteindre la précision du décimètre en mode OmniSTAR à partir de 30 minutes (nominale) et en moins d'une heure généralement. En mode statique, la longueur de la ligne

de base conditionne le temps d'occupation qui varie entre 1h et 4h pour une ligne de base de 15 à 100 km.

5. CONCLUSION

Le système différentiel par satellite OmniSTAR HP est disponible aujourd'hui dans une grande partie du monde. Il utilise les mesures GPS L1 /L2 corrigées de l'ionosphère par code et par phase. Cette solution (HP) est obtenue en exploitant les orbites relatives en combinaison avec les stations de références régionales. Ce service demande, outre la nécessité d'un matériel spécifique, des frais d'abonnement annuels. Ce type de services connaît de plus en plus de succès dans différents domaines d'applications (les SIG de précision, les applications agricoles...). Leurs avantages sont la couverture, la continuité et la garantie du service. Les inconvénients sont le coût et la difficulté de recevoir les signaux des satellites géostationnaires dans certaines régions de latitudes élevées et certains environnements difficiles (zones urbaines).

D'après l'étude menée ci –avant on a conclu que pour un travail de localisation :

- Un post traitement par des logiciels de commerce n'influence pas les résultats obtenus en mode statique;
- La correction différentielle sous PFO des données déjà collectées en temps réel grâce au service OmniSTAR n'améliore pas remarquablement les résultats ;
- Pour un travail de localisation situé dans un périmètre de 95 km par rapport aux stations de références la solution préconisée est le mode statique avec post-traitement, suivie de la solution avec traitement PPP puis de la solution OmniSTAR ;
- Pour un travail de localisation situé au delà de 95 km, la solution préconisée est le mode OmniSATR suivi du mode PPP avec post traitement et le mode statique avec avec post-traitement (logiciels de commerce).

OmniSTAR peut s'avérer, pour certains, une solution chère mais dans ce cas on sera contraint d'opérer, dans une vision d'optimisation précision - coût - rendement, au deçà d'un rayon de 95 km vis-à-vis de sa station de référence. Ce propos serait davantage intéressant si les stations de références (dans notre cas les stations permanentes) sont suffisamment nombreuses de manière à pouvoir se trouver continuellement à moins de 95 km d'elles, et dans ce cas des travaux d'équipement, de densification et de mise en service des stations permanentes doivent être entrepris.

Pour ces considérations il est vivement recommandé de mener des études plus approfondies sur les aspects précision, coût et rendement des systèmes de localisation disponibles aujourd'hui et ceux en phase de déploiement afin d'optimiser un investissement éventuel dans ce domaine prometteur et indispensable. Un centre de veille technologique qui s'occupe de ce volet est vivement sollicité, comme le recommande certains professionnels du secteur, étant donné la vitesse grandiose à laquelle les techniques de localisation évoluent.

REFERENCES

- Abidin H. (2002) Fundamentals of GPS signals and data, par les éditeurs John D. Bossler, John R. Jensen, Robert B. McMaster et Chris Rizos, Edition Taylor & Francis.
- Afa I. et Ourouadi T. (2008) Développement d'une approche de contrôle des dossiers de stéréopréparation établie par GPS, mémoire 3ème cycle, section Topographie, Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II.

- Asgari J. (2005) ETUDE DE MODELES PREDICTIFS DANS UN RESEAU DE STATIONS GPS PERMANENTES, Thèse de Doctorat de l'Observatoire de PARIS en Dynamique des Systèmes Gravitationnels.
- Azzouzi R. (2008) Polycopié et Manuel du Cours de Géodésie Spatiale, Département de la Géodésie et la Topographie, Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II.
- Azzouzi R. (2008) Notes de cours, Dr. Rachid Azzouzi, département de la Géodésie et la Topographie, Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II.
- Benaïm ELH. (2007) Comprendre GPS pour comprendre GNSS, Département de la Géodésie et la Topographie, Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II.
- Bossler J.D. (2002) Datums and Geodetic Systems, par les éditeurs John D. Bossler, John R. Jensen, Robert B. McMaster et Chris Rizos, Edition Taylor & Francis.
- Botton S., Duquenne F., Egels Y., Even M. et Willis P. (1997) GPS Localisation et Navigation, Edition Hermes.
- Botton S., Duquenne F., Bétaille D., Peyret F. et Willis P. (2005) GPS Localisation et Navigation par satellites, Edition Hermes et Lavoisier.
- Charbonnel A. (2005) Equipement –Support, Le Havre ENMM.
- Collins J., Lichtenegger H. et Wellenhof B.H. (2001) GPS Theory and Practice, Cinquième édition révisée, Edition Springer –Verlag/Wien.
- Correia P. (2000) Guide pratique du GPS, Deuxième tirage, Edition Eyrolles.
- El-Rabbany A. (2002) Introduction to GPS The Global Positioning System, Edition Artech House Boston & London.
- Figueirêdo D.C. (2005) Curso Básico de GPS.
- French G.T. (1996) Understanding the GPS an introduction to the global positioning system what it is and how it works, Edition GeoResearch.
- Jacobson L. (2007) GNSS Markets and Applications, Edition Artech House Boston & London.
- Kaplan E.D. & Hegarty C.J. (2006) Understanding GPS Principles and Applications, deuxième édition, Edition Artech House.
- Kennedy M. (2002) The Global Positioning System and GIS: An Introduction, University of Kentucky, Deuxième édition, Edition Taylor & Francis.
- Kupper A. (2005) Location-Based Services Fundamentals and Operation, Université Ludwig Maximilian Munich, Germany, Edition John Wiley & Sons.
- NGS-US (1986) Geodetic Glossary, NGS Rockville, MD US Dept of Commerce.
- Perry C. & Rains G. (2005) Explaining GPS —The Global Positioning System, Calvin Perry, Public Service Representative et Glen Rains, Associate Professor Biological and Agricultural Engineering Department — Tifton Campus, Bulletin 1269.
- Prasad R. & Ruggieri M. (2005) Applied Satellite Navigation Using GPS, GALILEO, and Augmentation Systems, Edition Artech House.
- Rizos C. (2002) Introducing the Global Positioning System, par les éditeurs John D. Bossler, John R. Jensen, Robert B. McMaster et Chris Rizos, Edition Taylor & Francis.
- Rizos C. & Stewart M. (2002) GPS Projects : some planning issues, par les éditeurs John D. Bossler, John R. Jensen, Robert B. McMaster et Chris Rizos, Edition Taylor & Francis.
- Sammuneh M.A. (2008) Cours de Géodésie Spatiale, Département de la Topographie à la Faculté de Génie Civil, Université d'Alep, Syrie.
- Seeber G. (2003) Satellite Geodesy, Deuxième édition complétée et révisée, Edition Walter de Gruyter Berlin & New York.
- Taylor G. et Blewitt G. (2006) Intelligent Positioning GIS-GPS Unification, George Taylor, University of Glamorgan Wales, UK et Geoff Blewitt, Nevada Bureau of Mines and Geology/Seismological Laboratory University of Nevada, Reno, USA, Edition John Wiley & Sons.
- Trimble (2005) Explication de la technologie H-Star, livre blanc Trimble Navigation Limited.
- Trimble (2009) Guide Pathfinder ProXRT.

US.National Academy Press (1995) The Global Positioning System
A Shared National Asset: Recommendations for Technical Improvements and Enhancements, National
Academy Press Washington D.C. .

BIOGRAPHICAL NOTES

Moha El-ayachi, Ingénieur et Professeur au Département de Géodésie et Topographie de l'Intsitut Agronomique et Vétérinaire Hassan 2 à Rabat. Il est member actif de l'Ordre National des Ingénieurs Géomètres Topographes.

Mohamed Stifa, Ingénieur en Sciences Géomatiques et Ingénierie Topographique. Agence Nationale de la Consevation Foncière, du Cadastre et de la Cartographie. Rabat, Maroc.

CONTACTS

Moha EL-AYACHI : moha.elayachi@gmail.com,
Mohamed STIFA: stitopo@gmail.com .

Tel:+ 212 662 124 657 / Fax: +212 537 680 180.