

Du NRTK vers le PPP-RTK, un exemple avec TERIA

■ Paul CHAMBON

Introduction TERIA

Le réseau TERIA a été initié en 2005 par l'Ordre des géomètres-experts avec l'ambition de doter la profession d'un outil de géolocalisation temps réel de précision centimétrique (0-5 cm).

L'idée de base était de répondre à l'obligation de géoréférencement de la production topographique dans un référentiel unique.

Cette démarche a constitué le socle de la mise en place de "Géofoncier" : le premier portail cartographique du foncier des géomètres-experts.

La société EXAGONE a été chargée de la mise en œuvre et de la gestion du réseau TERIA. Plus de la moitié des cabinets en France en sont actionnaires. Le service a été ouvert sur abonnement à toutes clientèles dès son origine.

Dans une démarche "Qualité de son management", TERIA est, à ce jour, l'unique réseau GNSS certifié QUALITÉ et ENVIRONNEMENT ISO 9001 - ISO 14001.

Aujourd'hui, TERIA couvre en France le territoire de la métropole et des Îles de Mayotte et Réunion, l'extension Guyane Antilles devant être opérationnelle en 2019. TERIA est de plus connecté aux réseaux européens limitrophes pour assurer une continuité transfrontalière.

Rappels techniques

Le RTK et N-RTK

Le RTK (*Real Time Kinematic*) est une technologie visant en première approche à transmettre en temps-réel les observations depuis un pivot aux mobiles GNSS. Ce procédé technique leur permet de lever les ambiguïtés (nombres entiers de longueurs d'onde dans chaque distance satellite-récepteur, inconnus lors de la première mesure de phase sur chaque fréquence) et ainsi proposer un positionnement de

précision centimétrique. La fonction du mobile est quant à elle de calculer le vecteur pivot-mobile en effectuant un calcul par double différence généralement. Cette modalité de calcul exige un géoréférencement très précis (1 à 2 cm) du pivot, car dans le cas contraire c'est l'ensemble des points relevés qui se retrouve en décalage du système de référence.

Le NRTK (*Network RTK*) consiste à mutualiser les données de plusieurs stations fixes d'un réseau. Elles sont transmises en temps réel à un centre serveur qui retourne aux usagers des corrections modélisées pour toute la zone de couverture. Il existe plusieurs types de corrections en NRTK :

- FKP (*Flächen-Korrektur-Parameter*)
- MAC (*Master Auxiliary Concept*)
- VRS (*Virtual Reference Station*)

Historiquement, le FKP a été initié par la société GEO++ basée en Allemagne (Geo++® White PaperNr. 2002.01), le MAC par la société LEICA Geosystems (*White Paper June 2005 Take it to the MAX!*) et le VRS par la société TRIMBLE (*White paper Virtual Reference Station Systems, 2002*). La diffusion des corrections NRTK se fait généralement en RTCM (*Radio Technical Commission for Maritime Services*), qui est le format standard pour l'échange des données brutes GNSS. Ainsi à l'origine de TERIA

en 2005, le RTCM 2.3 était le format d'échange utilisé avec le seul format de données FKP. Il a été remplacé en 2008 par le RTCM 3.1 pour intégrer les données GLONASS, le format MAC ainsi que des messages standards sur le calcul des résidus en VRS. Ceci a permis de mettre à disposition deux nouveaux types de corrections (point de montage MAC30 et PRS30). Depuis 2018, le RTCM 3.2 ou aussi appelé RTCM MSM (*Multiple Signal Messages*) a pris le relais pour véhiculer également les données GALILEO et BEIDOU.

Le réseau TERIA a toujours eu pour politique de fournir des corrections adaptées au matériel GNSS des clients, en fournissant les corrections privilégiées pour chaque constructeur pourvu qu'elles répondent aux standards. Pour ces mêmes raisons les corrections GALILEO et BEIDOU sont mises à disposition via le RTCM 3.2 même si actuellement tous les messages du RTCM 3.1 n'ont pas encore été adaptés pour GALILEO et BEIDOU en RTCM 3.2. Techniquement il existe une différence de philosophie importante entre ces trois types de corrections.

Le format MAC (*Master Auxiliary Concept*).

Ce format consiste à diffuser au récepteur mobile les observations brutes de la station la plus proche (dite station

Type	Content
1014	GPS Network Auxiliary Station Data coordinate difference between one Aux station and the master station
1015	GPS Ionospheric Correction Differences for all satellites between one Aux station and the master station
1016	GPS Geometric Correction Differences for all satellites between one Aux station and the master station
1017	GPS Combined Geometric and Ionospheric Correction Differences for all satellites between one Aux station and the master station (same content as both types 1015 and 1016 together, but less size)
1018	RESERVED for GPS Alternative Ionospheric Correction Difference Message Message type 1018 is not yet defined.



maîtresse) et d'ajouter à cela des corrections MAC, c'est-à-dire de fournir des corrections différentielles entre la station maîtresse et les stations auxiliaires environnantes. Cela permet au récepteur mobile de modéliser ses propres corrections locales NRTK. L'ensemble du réseau NRTK n'a qu'un impact relativement faible sur le calcul des corrections, car une grande partie du traitement est embarquée dans le mobile GNSS. Ci-contre, voici une table détaillant les données MAC pour le GPS au format RTCM 3

Le Format FKP (*Flächen-Korrektur-Parameter*)

En FKP, le réseau NRTK va fournir davantage de corrections. Comme pour le format MAC le récepteur mobile va recevoir les données brutes de la station la plus proche (RTK), auxquelles nous allons fournir des corrections géométriques et ionosphériques précises. Ces données vont lui permettre de converger rapidement et précisément. Dans ce cas le réseau NRTK a besoin de calculer de manière précise ces corrections ionosphériques et géométriques. Le calcul et la transmission de ces deux données se font sous la forme d'un calcul de plans centrés sur chaque station composant le réseau. Ainsi seuls les plans de la station servant de base au mobile sont transmis. Voici ci-dessous la table RTCM 3 des messages pour le FKP

Type	Content
1034	GPS FKP
1035	GLONASS FKP

Le format VRS (*Virtual Reference Station*)

Pour le VRS, le récepteur mobile envoie sa position approchée, à partir de laquelle le serveur va fournir les observations artificielles qui seraient obtenues par une station située en cette position. La première position reçue par le serveur servira à calculer les coordonnées de cette station virtuelle. Ainsi le récepteur mobile fonctionne en positionnement différentiel simple (RTK avec cette station VRS). Pour estimer la qualité des observations virtuelles, les résidus des calculs sont

Type	Content
1030	GPS Network Residuals
1031	GLONASS Network Residuals

transmis au récepteur via des messages RTCM standards, voir ci-dessus.

Ainsi le récepteur peut estimer la qualité de son positionnement en fonction de la qualité des observations générées. De cette façon, une grande partie du travail est effectuée par le serveur pour fournir de manière très précise des données virtuelles issues de modèles, à partir des mesures réelles obtenues sur les stations permanentes.

Au final quel que soit le type de correction choisi par l'utilisateur, la précision reste la même et les temps de convergence relativement proches.

La technologie NRTK permet ainsi au réseau TERIA de couvrir toute la France métropolitaine, la Réunion et Mayotte, et en 2019, la Guyane et les Antilles françaises.

L'accès aux corrections NRTK :

L'accès aux corrections NRTK se fait au travers d'un serveur NTRIP, qui identifie les utilisateurs avant de leur adresser les corrections. La connexion se fait via une connexion Internet. Aujourd'hui, la majorité des utilisateurs du réseau TERIA utilise le réseau téléphonique pour accéder à Internet, soit via une carte SIM directement insérée dans leur équipement de levé, soit via un partage de connexion avec leur Smartphone.

Cependant notre expérience montre qu'il reste un point limitant pour les utilisateurs confrontés aux zones non couvertes (zones blanches) ou mal couvertes (zones grises) par le réseau téléphonique. Les utilisateurs peuvent consulter des cartes de couverture mises à disposition par les opérateurs téléphoniques (par exemple pour Orange: <https://reseaux.orange.fr/cartes-de-couverture/mobile-3g-4g>)

Une première solution a été apportée en proposant des cartes SIM multi-opérateurs. Ainsi lorsqu'un opérateur est en difficulté sur une zone géographique, la carte bascule automatiquement sur celui qui assure la meilleure desserte.

Un autre inconvénient du protocole NTRIP en NRTK est qu'il faut que l'utilisateur renvoie sa position au serveur lors de son identification afin de lui

envoyer les corrections adaptées. En effet comme vu précédemment, les corrections sont locales. Elles sont soit issues de la station GNSS la plus proche (FKP et MAC), soit issues d'une station virtuelle située à proximité de la position du récepteur mobile (VRS). Il est donc nécessaire de travailler avec le protocole TCP/IP afin d'avoir un lien bidirectionnel entre l'utilisateur et le serveur NTRIP.

Une solution palliative est de diffuser les corrections par satellites. Ainsi nos travaux d'innovation initiés en 2010 ont permis de mettre en place le service TERIASat.

L'innovation TERIASat : du NRTK vers le PPP-RTK

Les travaux de recherche et d'innovation ont permis de développer un nouveau type de service basé sur l'association de deux technologies :

- Le NRTK (*Network Real Time Kinematic*)
- Le PPP (*Precise Point Positioning*)

Le NRTK permet de calculer de manière très précise les corrections atmosphériques nécessaires pour maîtriser les contraintes de traversée des deux couches atmosphériques ionosphère et troposphère. Ces deux informations sont essentielles pour le PPP-RTK. Pour le calcul de ces deux modèles nous utilisons la solution GNSMART de GEO++ qui fournit les corrections NRTK de TERIA.

Le PPP consiste à calculer des corrections globales au niveau des signaux GNSS bruts, sans bénéficier de l'effet différentiel avec une autre station proche. Cette méthode exige une connaissance très poussée de tous les paramètres qui perturbent la mesure (horloges, orbites, attitude de chaque satellite, propagation dans l'atmosphère, marées terrestres, etc.). Ainsi toute une série de corrections sont mises à disposition, en particulier :

- les corrections d'horloges,
- les corrections d'orbites,
- les biais électroniques des satellites sur le code et la phase.

Il existe des services publics PPP temps-réel utilisables à des fins de recherche et de tests et mis à disposition via le site de l'IGS : <http://www.igs.org/rts>





Le PPP seul permet alors de corriger de manière très précise toutes les erreurs liées au système GNSS. Il est donc possible de se positionner de manière centimétrique en PPP avec un seul récepteur. Toutefois, les modèles de corrections atmosphériques ne convergent actuellement vers une estimation précise qu'au bout de 20 à 30 minutes seulement. Cette technologie de positionnement précis n'est donc utilisée que dans des cas très spécifiques en domaine maritime, dans des zones géographiques où il n'est pas économiquement possible de fournir un service RTK/NRTK (chantier ponctuel, zone de grande culture...), etc.

L'association PPP-RTK consiste donc à transmettre des corrections PPP et à diffuser en parallèle des corrections via des modélisations des erreurs troposphériques et ionosphériques très précises issues d'un réseau de station GNSS dense. Il s'agit du concept SSR (http://www.geopp.com/pdf/ion2005_fw.pdf).

De ce fait, il est possible de travailler avec une précision centimétrique sur l'ensemble de la zone de couverture des modèles atmosphériques, tout en gardant un temps de convergence équivalent au NRTK.

Cette technologie a plusieurs avantages comparée au NRTK :

- les erreurs sont décomposées par poste d'erreur,
- le service est global et localement augmenté,
- les corrections dépendent de modèles et non de la(les) station(s) la(les) plus proche(s),
- la diffusion des corrections ne dépend pas de la position du mobile,
- la bande passante nécessaire ne dépend pas du nombre d'utilisateurs.

Cette technologie n'est pour le moment pas encore standardisée au niveau du format, seule la partie PPP a ses propres messages RTCM. Le choix a été donc fait de créer un service TERIASat basé sur un format en partie propriétaire. Cette solution s'appuie donc sur les messages

RTCM existants et fournit des corrections d'ionosphère et de troposphère via des messages propriétaires.

Les récepteurs actuels ne sont pas compatibles avec les messages RTCM pour le PPP, car toutes les solutions commerciales PPP (tel que Omnistar, Starfire, Atlas, etc.) fonctionnent avec des formats de type propriétaire. Notre format de corrections n'est donc pas compatible en direct avec les récepteurs du marché, mais l'innovation allant dans ce sens, il fallait se conformer avec les standards actuels. Il a donc fallu innover pour exploiter nos corrections avec les récepteurs actuels.

Les premiers essais ont consisté à utiliser les données brutes d'un récepteur et à ajouter les corrections PPP-RTK dans un moteur de calcul de la position.

Pour cela nous avons intégré en mode mobile des données de stations permanentes dans notre moteur de calcul des corrections NRTK (GNSMART de GEO++) sans spécifier les coordonnées de référence et sans utiliser ces mêmes données pour le calcul des corrections. Nous avons utilisé pour ces tests les données des flux temps-réel de stations IGN CREI, BRST, AXPV, SCOA et ENTZ le 20/08/2014. L'échelle des figures de 1 à 5 ci-contre est de +/- 10 cm, les écarts aux points connus sont E-W, N-S et verticaux. Cette méthode permet ainsi d'utiliser les modèles atmosphériques du réseau, sans avoir à les convertir dans un format spécifique pour les exporter. Les résultats étaient très bons. On avait un positionnement avec une déviation standard centimétrique et un temps de convergence de dix secondes.

Ces tests nous ont permis de valider nos choix techniques :

- la couverture est bien nationale,
- la précision centimétrique est atteinte,
- le temps de convergence est très rapide (autour de 10 s.).

Cependant, cette solution n'était pas compatible avec les appareils mobiles qui ne permettent pas d'accéder aux données brutes. Cela impliquait aussi une incompatibilité avec les logiciels des constructeurs, car la position n'était plus calculée par le récepteur mais par notre logiciel. En effet, dans ce cas la position est calculée par le serveur, hors les logiciels constructeurs utilisent des

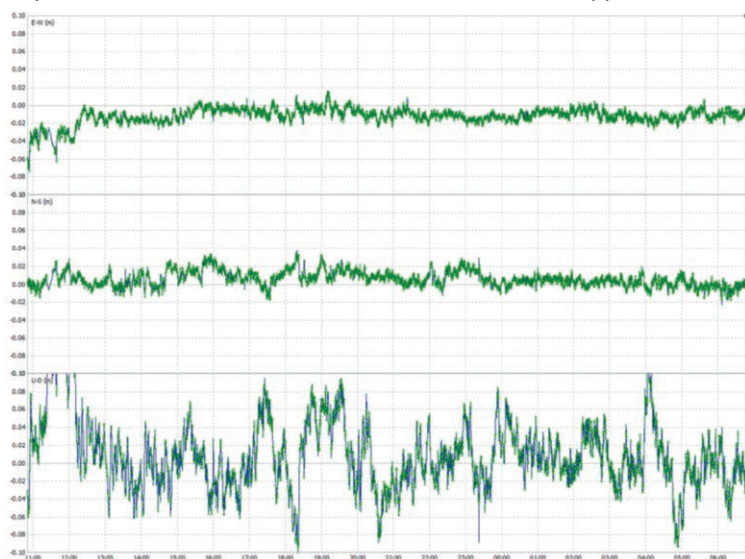


Figure 1. CREI

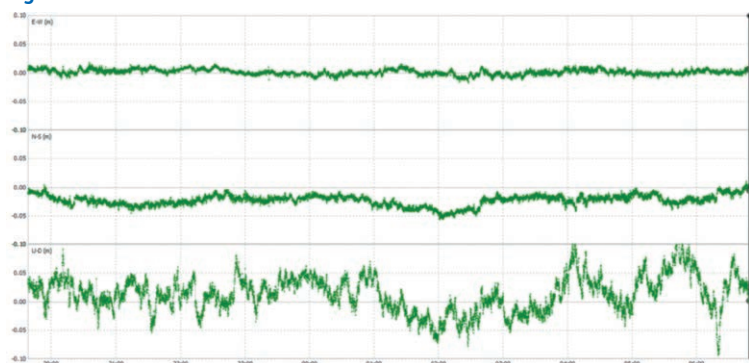


Figure 2. BRST

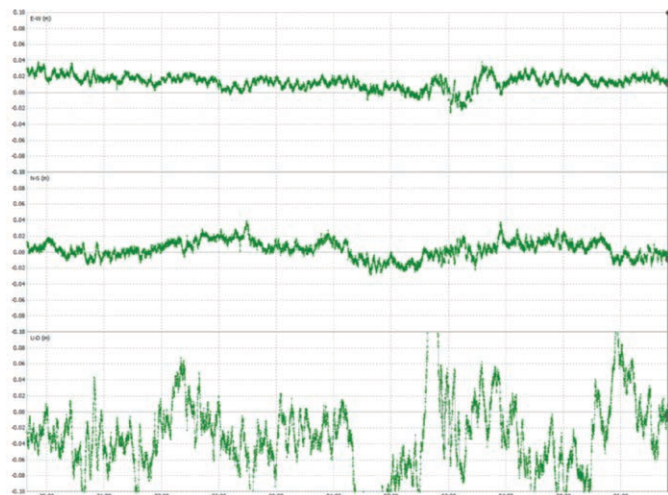


Figure 3. AXPV

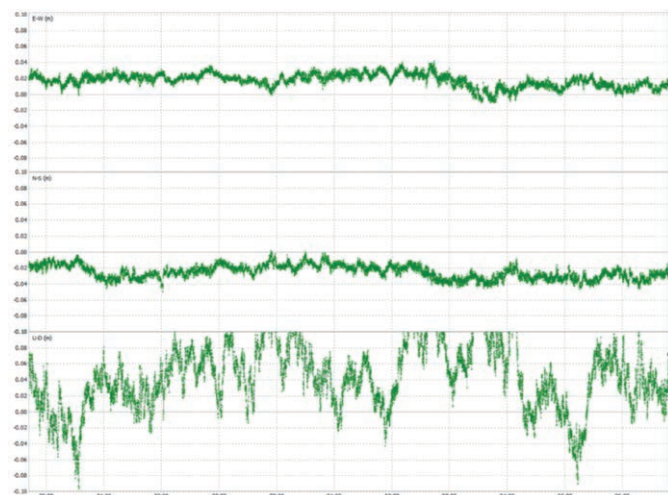


Figure 4. SCOA

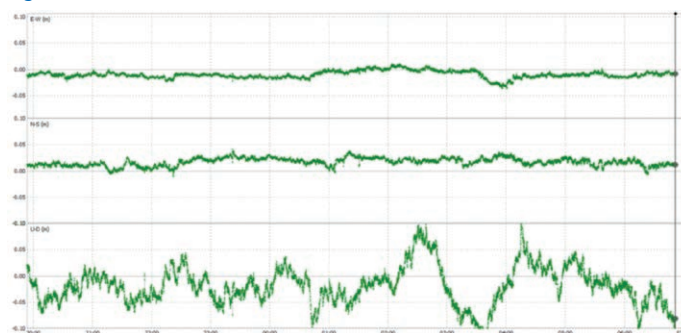


Figure 5. ENTZ

données propriétaires pour récupérer la position de leur récepteur. C'est aussi un changement de philosophie dans le sens où TERIA n'est plus seulement un opérateur de corrections GNSS, mais calcule également la position du mobile, ce qui n'est pas le cas en NRTK par exemple, où la position est calculée par le récepteur en utilisant les corrections du réseau.

Pour ces différentes raisons nous nous sommes donc orientés vers une solution à même de convertir les corrections PPP-RTK en corrections NRTK de type VRS. Cette solution nous a conduits à développer une *Library* TERIASat. Ce concept porte le nom de SSR2OSR évoqué dans le document http://www.geopp.com/pdf/ion2005_fw.pdf. Ainsi à partir des corrections PPP-RTK envoyées nous reconstruisons des observables virtuelles. Pour permettre de revenir au standard évoqué plus haut en NRTK : VRS.

En fait il s'agit d'effectuer la transformation inverse du calcul des corrections, en effet nous utilisons les observations de nos stations pour décomposer les pseudo-distances mesurées en :

- pseudo-distance
- erreur d'orbite,
- erreur d'horloge,

- erreur sur les délais ionosphérique et troposphérique,
- mesure des biais de code et phase.

En transmettant les corrections PPP-RTK et en récupérant les éphémérides, notre *Library* est en mesure de reconstruire les pseudo-distances pour générer des observations virtuelles et ainsi fournir des corrections de type NRTK au mobile au format RTCM 3.1 ou 3.2, format reconnu par l'ensemble des appareils du marché mais issu initialement de corrections PPP-RTK.

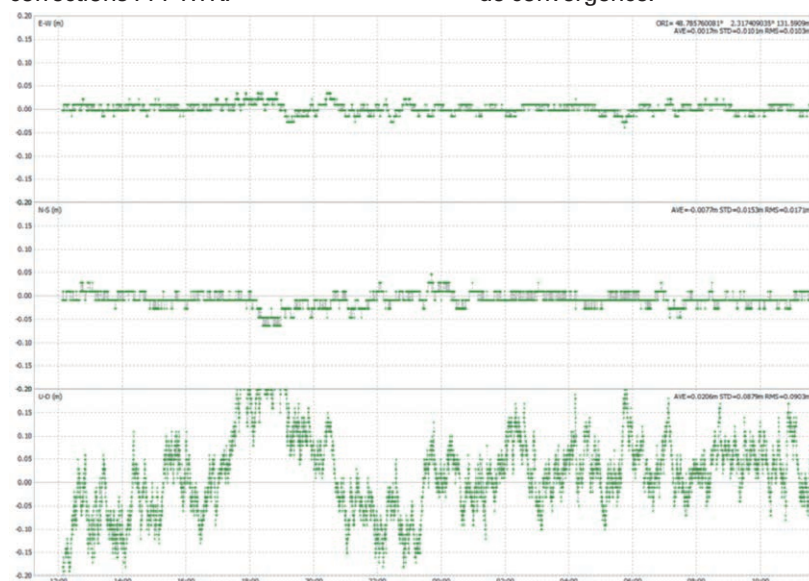


Figure 6. série temporelle : échelle +/- 20 cm

Pour cela, la *Library* récupère en temps-réel les corrections PPP-RTK, les éphémérides au format RTCM et la position du mobile au format NMEA de type GGA (Norme issue de la *National Marine Electronics Association*, la trame GGA permet notamment de transmettre la position GNSS). À partir de cette position nous récupérons l'heure GPS, afin de synchroniser le calcul des corrections avec le récepteur mobile et la position pour générer les observations de la station VRS.

Dans un premier temps la *Library* a été développée sous *Windows*. Et la troposphère n'était pas diffusée, mais seulement estimée en fonction de la position du mobile. Les premiers essais ont été effectués localement avec des modèles ionosphériques locaux sur une zone de 60 000 km². Voici les résultats des premiers essais avec un récepteur de marque TRIMBLE : les résultats (*figure 6*) ont été concluants sur le temps de convergence.





Pour la précision, en planimétrie celle-ci est bien conforme. Néanmoins en altimétrie on mesure des écarts relativement importants avec des variations allant jusqu'à 20 cm. Le fait que seule la composante altimétrique est impactée par des écarts importants nous a amenés à changer nos algorithmes. A présent, nous prenons en compte les erreurs de troposphère en diffusant des corrections pour cette couche atmosphérique.

Pour cela, nous avons fait le choix de diffuser les corrections troposphériques via une grille (figure 7). Le pas de la grille a été adapté en fonction des différents essais que nous avons effectués. Cette grille est utilisée par la *Library* en interpolant les valeurs de nœud de la grille à proximité de la position du mobile.

Pourtant au vu des résultats, les corrections ionosphériques semblent suffisamment précises et ne nécessitent pas d'ajustement.

Des résultats intégrant cette amélioration sont présentés par la suite (voir figure 10 et figure 11).

Pour résumer les corrections sont donc composées de :

- corrections d'orbites,

- corrections d'horloges,
- corrections des biais de code et de phase,
- modélisation ionosphérique,
- modélisation troposphérique (Grille).

Et la *Library* intègre ces corrections afin de fournir des corrections de type VRS au mobile.

En parallèle et afin d'être compatible avec le plus grand nombre d'équipement GNSS, nous avons fait le choix de partir sur une solution de communication satellitaire avec un boîtier externe dans un premier temps. Pour le développement, le choix s'est porté sur la société Viasat (figures 8 et 9).

Elle fut en mesure de nous fournir un boîtier de réception configurable afin d'intégrer notre *Library*. La nouvelle solution a pour spécificité d'offrir une communication en bande-L.

Cette bande de fréquence est intéressante, car elle permet de réceptionner les signaux avec des antennes de petites tailles. C'est d'ailleurs dans cette bande de fréquence que sont diffusés les signaux GNSS. La *Library* a été recompilée sous linux dans lequel nous avons ajouté des options supplémentaires



Figure 8. Essais dynamiques de réceptions des corrections en Bande-L



Figure 9. Le nouveau boîtier intégrant la *Library*

pour définir plus de choix sur la station VRS générée (longueur du vecteur, fréquence de rafraîchissement...).

Le POC (*Proof of Concept*) a été développé avec la première version du boîtier Viasat.

Par la suite, une nouvelle monture du boîtier nous a été livrée. Cette antenne de réception permettant de s'installer facilement, dans un sac à dos par exemple. Cette configuration a été testée dans différents domaines d'application (topographie, application agricole...).

La qualité du positionnement et le temps de convergence correspondaient bien à notre souhait (voir figures 10 et 11). Cependant, les résultats ont montré plusieurs limites telles que la nécessité d'orienter le sac à dos en direction du satellite géostationnaire lors d'une utilisation pédestre par exemple.

Pour contourner ces contraintes, nous nous sommes orientés vers les constructeurs de matériel GNSS. En effet certains récepteurs GNSS intègrent déjà un modem de réception L-Band. Ainsi ces équipements sont en mesure de réceptionner naturellement les signaux émis par le satellite géostationnaire.

Nous avons donc contacté plusieurs constructeurs afin de leur proposer d'intégrer la *Library* TERIASat directement dans le récepteur mobile. Le premier constructeur à avoir franchi le pas avec une solution commerciale a été Spectra Précision. Nous avons donc été en mesure de faire des tests (voir figures 10 et 11) avec deux récepteurs de leur gamme de produits :

- le SP90m,
- le SP60.

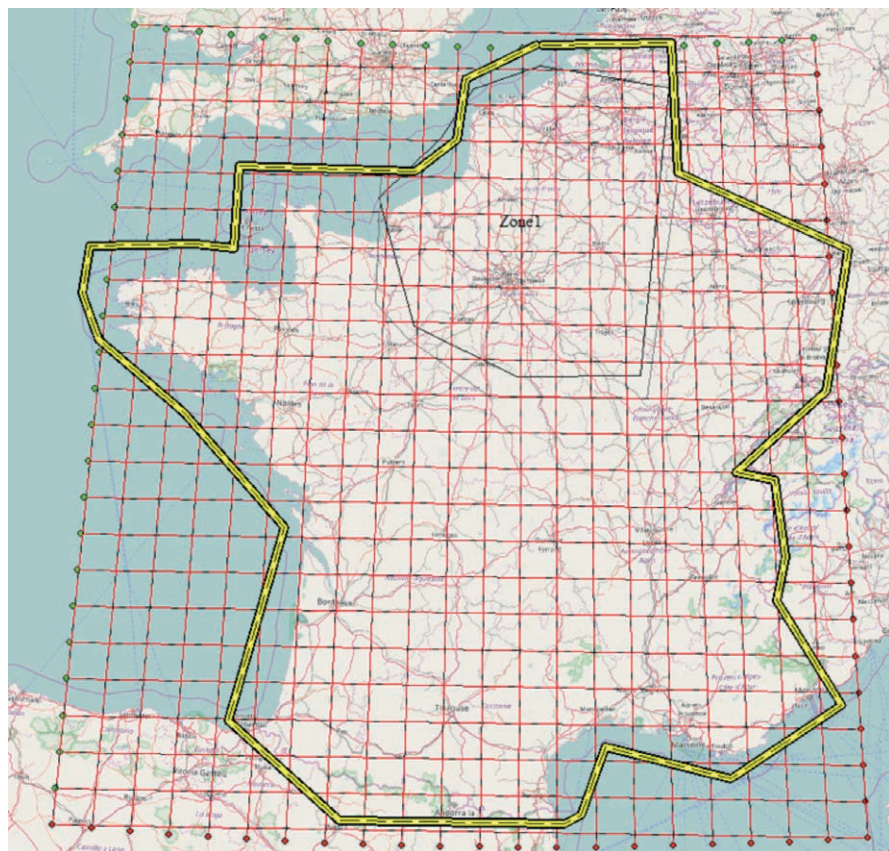


Figure 7. Grille troposphérique utilisée

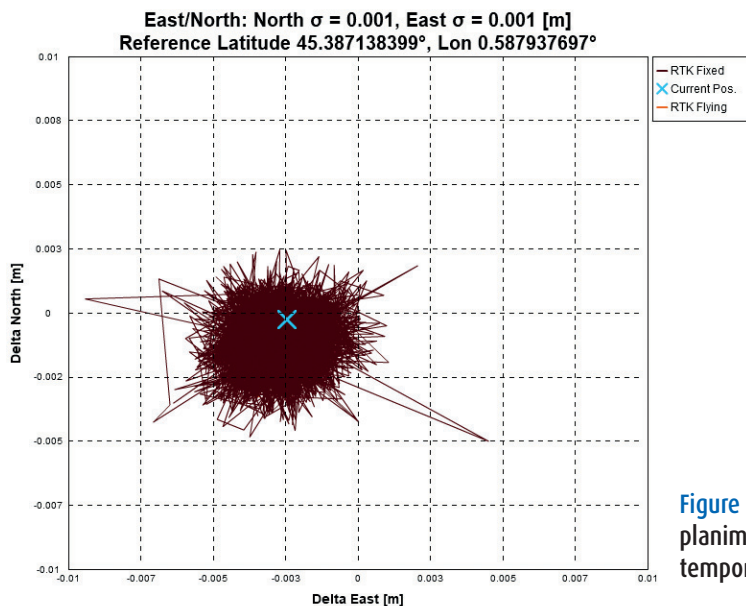


Figure 10. Précision planimétrique (série temporelle de 24h)

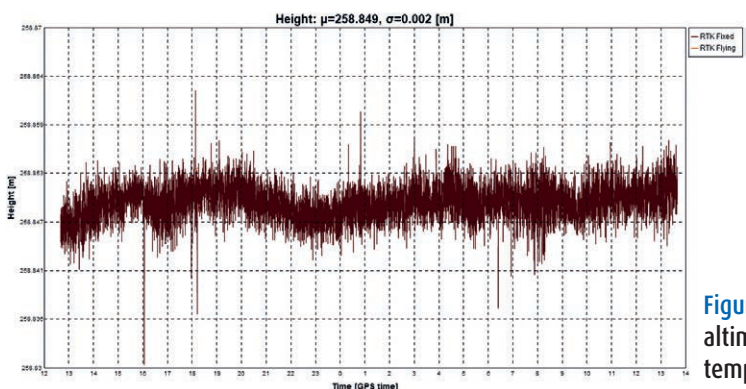


Figure 11. Précision altimétrique (série temporelle de 24h)

<http://www.geopp.de/pdf/geopp-rtcm-fkp59-1.1.pdf>

https://w3.leica-geosystems.com/downloads123/zz/general/general/tech_paper/brown_et_al_networkrtk_en.pdf

https://www.researchgate.net/publication/254250991_How_well_does_the_Virtual_Reference_Station_VRS_system_of_GPS_base_stations_perform_in_comparison_to_conventional_RTK
Le lexique GNSS : aftopo.org

ABSTRACT

TERIA is a NRTK service which enables the achievement of centimeter accuracy within a few seconds. The first limitation which is reported by the user at our assistance is that to have access to the service the customers need an Internet connection. Indeed the NTRIP protocol is based on http and need a TCP/IP connection to enable to connect to our server to receive the corrections. To be able to counter this limitation we have to work to change the format of the corrections. In NRTK our server needs the position of the rover to send the right corrections. Another approach consists to use PPP, which can be broadcasted but such services need 20 to 30 minutes to reach centimeter accuracy. So we work to combine PPP and NRTK to enable to have the NRTK performance with the advantage of PPP. For that we developed PPP-RTK corrections, which is PPP augmented with ionosphere and troposphere model. So we were able to broadcast all data to correct GNSS pseudo range in an area. Another limitation was that the rover is not able to use PPP-RTK corrections as it's not standardize. So we decided to counter also this limitation using a Library which can be installed in the rover and convert the PPP-RTK corrections in NRTK type VRS corrections which is fully standard in RTCM3. So our approach allowed us to broadcast corrections to enable GNSS rover to achieve centimeter accuracy in less than one minute. So we started a service transmitting such corrections through a geostationary satellite to cover area that are not covered by internet terrestrial networks (GSM, Wi-Fi ...). Also PPP-RTK has a lot of advantages to compared to NRTK and will certainly become a standard in the future, but as every new development it needs time for the industrial companies to agree on a standard...

Les résultats de tests étant probants, il a été décidé en 2018 de louer définitivement un canal satellite en bande L pour diffuser les corrections TERIASat.

TERIA est désormais en mesure de fournir un service commercial de corrections diffusées par satellite en utilisant la technologie PPP-RTK.

Le SP60 de Spectra Précision a été le premier appareil équipé de la *Library* TERIASat. Il propose une version intégrée du *Firmware* qui permet ainsi de gérer automatiquement les flux de corrections NRTK (via le réseau cellulaire) et PPP-RTK (via une réception satellitaire). L'intérêt est d'offrir à l'utilisateur la meilleure solution de positionnement en fonction de la ou les sources de corrections disponibles.

Pour les utilisateurs qui veulent accéder à la technologie TERIASat tout en conservant leur matériel GNSS, un boîtier en complément de dimensions réduites et se fixant sur la canne du mobile est en cours d'élaboration. Il sera compatible avec la majorité des

matériels en proposant de s'interfacer en Wifi, Bluetooth ou via un câble série. Aujourd'hui, de nouvelles applications se développent dans les domaines les plus divers et concernent tous les éléments structurants de la vie en société. Devant cette explosion et la prolifération des outils technologiques, une dominante se dégage, celle de la convergence de tous les besoins de géolocalisation vers une précision centimétrique. Ainsi, le PPP-RTK permet de répondre au besoin croissant du nombre d'utilisateurs. Et de nouveaux protocoles d'échange sont en cours de développement pour permettre d'augmenter la disponibilité multipliant les moyens de diffusion des corrections. ●

Contact

Paul CHAMBON, Directeur Technique TERIA.
paul.chambon@reseau-teria.com

Bibliographie

www.reseau-teria.com