

Qualification des corrections NRTK au sein du réseau TERIA

■ Paul CHAMBON - Mohamed RIZKI - Rakul IYNGARATHASAN

Les utilisateurs des récepteurs mobiles GNSS ont un besoin accru de contrôler leurs mesures sur le terrain. En effet, le développement rapide de la technologie NRTK (Network Real Time Kinematic), permettant avec un seul récepteur de travailler en totale autonomie, a permis de démocratiser cet usage dans le monde de la topographie pour les travaux de géoréférencement ou de levé. L'objectif des travaux menés a été de fournir un outil permettant de mieux appréhender le traitement des corrections GNSS issues du réseau NRTK TERIA. Celui-ci permet ainsi aux utilisateurs d'être informés de manière transparente sur la qualification des corrections VRS (Virtual Reference Base Station).

MOTS-CLÉS

GNSS, NRTK, KPI, ionosphère, troposphère, VRS, RTCM

TERIA, présentation du réseau

Créé en 2005, le réseau TERIA répond à une volonté et un besoin des géomètres-experts de disposer d'un outil de géoréférencement GNSS indépendant, offrant un haut niveau de précision et un contrôle qualité rigoureux.

Depuis sa création, le réseau TERIA a su rester à la pointe de la technologie GNSS en se dotant rapidement d'un département dédié à la recherche et au développement. Cette dynamique d'innovation a permis le lancement, dès 2018, du service de liaison satellitaire TERIASat, une avancée majeure qui assure une couverture dans les zones blanches et renforce la sécurité des usagers en cas de catastrophe naturelle. Ce nouveau mode de communication

couvre l'ensemble du territoire national métropolitain, offrant un service innovant d'une précision centimétrique en temps réel et des performances proches du NRTK.

Le réseau ouvert à tout type d'utilisation propose des services qui sont contrôlés dans le cadre de la certification qualité ISO 9001 depuis 2011.

Les réseaux GNSS (figure 1) ont pour mission de transmettre des corrections de type RTK aux récepteurs GNSS des utilisateurs.

Pour cela, plusieurs standards ont été définis, notamment le protocole de connexion et d'échange de données ainsi que le format de transmission des corrections.

Parmi ces standards, le protocole NTRIP, grâce auquel le réseau TERIA est

compatible avec l'ensemble des récepteurs GNSS actuels sur le marché, est mis en œuvre.

Le format NTRIP (*Network and Transport of RTCM via Internet Protocol*) permet également de fournir différents services au travers de Mountpoint via une page web (NTRIP Caster). L'utilisateur se connecte simplement à ce service par Internet en utilisant un logiciel NTRIP client.

Les corrections sont standardisées au format RTCM, garantissant l'interopérabilité entre équipements. Ces messages RTCM (format standard pour l'échange des données brutes GNSS) communiquent les données d'observations issues de stations physiques ou de stations virtuelles (VRS), dont le concept sera présenté par la suite.

Au-delà de ces informations, il est possible de transmettre des métadonnées telles que la position de la station de référence, le type d'antenne et des résidus estimés sur les pseudodistances dans le cas de corrections VRS.

Problématique : qualité des données GNSS et enjeux de fiabilité

L'évaluation de la qualité des données GNSS est un enjeu majeur pour garantir un positionnement précis et fiable dans les cas aussi divers que la géodésie, la topographie et la navigation de précision. Bien que les systèmes GNSS, tels que ceux du réseau TERIA, offrent des corrections en temps réel, la qualité des corrections n'est pas connue de l'utilisateur final. Cette absence de visibilité est d'autant plus critique que de nombreux facteurs internes et externes peuvent impacter la précision des données reçues.

Parmi les principaux facteurs externes, les perturbations ionosphériques jouent un rôle crucial. L'ionosphère, une couche de l'atmosphère située entre 50 et 1 000 km d'altitude, contient des

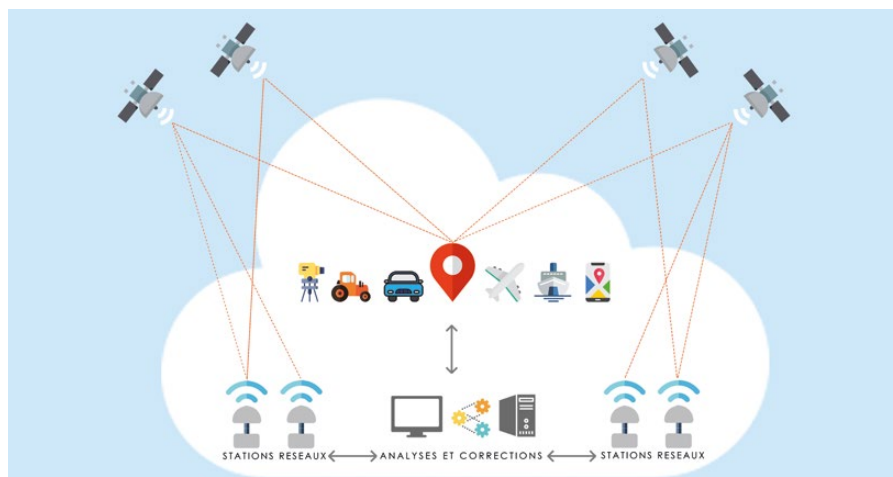


Figure 1. Fonctionnement d'un réseau NRTK (*Network and Transport of RTCM via Internet Protocol*).

particules ionisées qui influencent la propagation des ondes radio. Les variations de la densité électronique peuvent provoquer des retards dans les signaux GNSS, altérant la précision des corrections si ces perturbations ne sont pas correctement évaluées et corrigées en temps réel.

De la même manière, les perturbations troposphériques sont une autre source majeure d'erreurs dans les données GNSS. La troposphère, la couche la plus basse de l'atmosphère, est affectée par les variations de température, de pression et d'humidité, ce qui provoque des retards dans la propagation des signaux GNSS. Ces erreurs doivent être corrigées à l'aide de paramètres tels que le *Zenith Tropospheric Delay* (ZTD), mais la complexité des conditions météorologiques rend ces corrections difficiles sans une évaluation constante.

Outre les erreurs atmosphériques, des facteurs internes comme les erreurs systématiques peuvent également perturber les données GNSS. Les erreurs d'horloge des récepteurs GNSS, les biais géométriques dus aux configurations satellites, ou encore les décalages de signaux nécessitent des ajustements en temps réel pour garantir une précision subcentimétrique. Sans une surveillance en continu de ces facteurs, les utilisateurs risquent de recevoir des données fausses ou biaisées, compromettant ainsi la fiabilité des opérations, en particulier dans des secteurs comme la topographie ou l'agriculture de précision.

Actuellement, les utilisateurs reçoivent des corrections GNSS sans avoir de réelle visibilité sur la qualité des données à l'instant T. Cela crée un risque non mesurable, pouvant impacter des opérations sensibles. L'intégration de mécanismes de qualification des données en temps réel, capables de surveiller des paramètres tels que le SIC (*Single Ionized Correction*), SOC (*Single Offset Correction*), ainsi que l'ensemble de la chaîne de traitement, est primordiale pour garantir que les corrections reçues sont fiables et adaptées aux conditions spécifiques de l'environnement.

Le principal défi réside donc dans la création d'un outil d'évaluation en temps

réel de la qualité des données reçues, destiné aux utilisateurs de réseau GNSS comme ceux de TERIA.

Cela permettrait aux utilisateurs de diagnostiquer immédiatement toute anomalie, d'ajuster les opérations en conséquence et de s'assurer que la précision des services de positionnement reste optimale, même dans des environnements perturbés.

Comment fonctionne le calcul VRS

Pour mieux comprendre le concept déployé lors de ces travaux, il est essentiel de rappeler le principe de VRS (*Virtual Reference Base Station*) associé au service de qualification de la donnée GNSS chez TERIA.

Le principe consiste à utiliser un ensemble de stations fixes pour simuler des observations d'une station virtuelle, positionnée à des coordonnées prédéfinies, généralement au sein du chantier en cours. Ce procédé permet de fournir aux utilisateurs des corrections de haute précision, en tirant parti des bases très courtes, adaptées à leur environnement exact. Dans le contexte du réseau TERIA, le logiciel de GNSMART est employé comme socle technique au travers duquel nous avons pu développer une partie du projet actuel de qualification de la donnée.

Le traitement VRS (*figure 2*) s'appuie sur une chaîne de calcul décrite dans le graphique ci-dessus.

La première étape consiste à recueillir les données brutes des stations GNSS à partir des programmes RCVR_IN, qui sont ensuite stockées en temps réel et synchronisées dans une couche appelée OBS. Ces informations sont alors exploitées par deux programmes distincts : GPPNET et MSM_OUT.

L'exécutable GPPNET favorise la fixation des ambiguïtés entre les stations et MSM_OUT pour le calcul des VRS.

En sortie, le calcul réseau effectué au travers du moteur GPPNET fournit alors des modèles de corrections extrêmement précis via la structure SSRM (*State Space Representation Models*). Ces modèles prennent en compte diverses erreurs, dont celles liées à l'ionosphère et les erreurs géométriques, ces dernières contenant principalement les erreurs dues à la propagation du signal dans la troposphère.

Ces informations sont alors converties en coefficients FKP via le programme SSRM2FKP permettant d'individualiser, au travers de coefficients linéaires, les erreurs ionosphériques et troposphériques. À partir de ces données, le programme MSM_OUT génère des observations virtuelles en utilisant les observations effectuées en temps réel par une station de référence et les

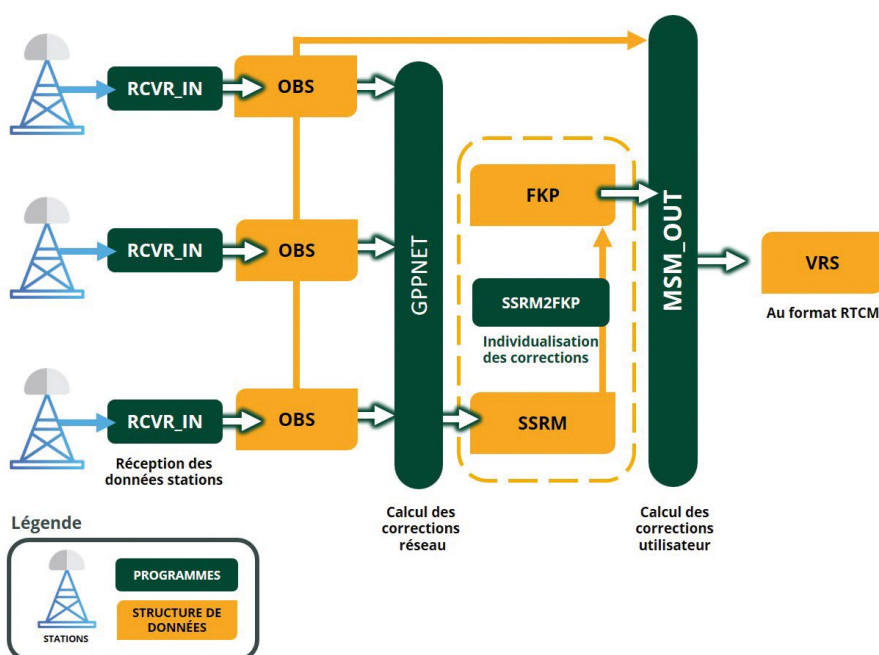


Figure 2. Fonctionnement du calcul VRS.



coefficients FKP individualisés pour cette station. En extrapolant les erreurs individualisées issues du modèle de correction calculées par le moteur GPPNET à partir des données brutes de la station de référence, le programme est capable de produire des observations virtuelles pour une position donnée.

Analyse de risque

Pour commencer le projet de la qualification des corrections VRS du réseau TERIA, une analyse de risque a été menée. Pour cela, chaque étape du calcul en partant des signaux bruts GNSS jusqu'à la fourniture des corrections NRTK a été décomposée. À partir de ce schéma, nous avons pu identifier toutes les sources impactant le traitement, aussi bien pour les sources externes qu'internes.

L'objectif de cette analyse était de lister l'ensemble des risques impactant la création des observations virtuelles délivrées aux utilisateurs. Le *tableau 1* liste les risques identifiés lors de ce projet.

Prenons comme exemple la notion de mouvement sur l'antenne de la station de référence servant à calculer la station VRS. Comme la technologie RTK, la solution VRS permet au récepteur de calculer un vecteur avec un point de base, offrant ainsi à l'utilisateur des coordonnées géoréférencées dans le système souhaité.

Toutefois, si la position de l'antenne de référence est altérée par un mouvement anormal, l'impact sur la position finale sera équivalent au déplacement de l'antenne subi en temps réel par rapport à sa position de référence.

Ainsi, l'analyse complète a permis de définir une liste exhaustive des risques liés à la fourniture de corrections VRS.



Figure 3. Récepteur de station de référence permanente (CORS)TERIA.

Mise en place de la qualification des données

Le projet de qualification des données s'est déroulé en plusieurs phases, avec pour objectif de couvrir l'ensemble des risques identifiés au préalable.

■ Sur la position des antennes de référence

La première étape a consisté à monitorer en temps réel les positions des antennes du réseau TERIA. Un contrôle est effectué en positionnant les antennes en mode RTK et en contrôlant en continu leur position. Ce suivi est assuré grâce à des récepteurs GNSS de fabricants différents, dont certains développés par TERIA (figure 3) dans le cadre de son programme de R&D.

Les informations remontées par les récepteurs sont ensuite stockées dans une base de données SQL, afin de transmettre à l'utilisateur les informations le concernant.

■ Sur le calcul VRS

Lors du traitement VRS présenté précédemment, nous avons également la possibilité de connaître la précision des

modèles ionosphériques et troposphériques. Pour cela, les informations des résidus par satellite sont disponibles en fonction de la position de l'utilisateur. Dans une grille générée automatiquement, nous stockons alors les informations d'erreurs maximums liées à sa position pour les erreurs ionosphériques et géométriques. En parallèle, le suivi continu de la disponibilité des stations et des ambiguïtés fixées est effectué pour fournir des critères de performance du calcul des VRS.

Pour garantir un accès à ces indicateurs, l'ensemble des informations est également stocké dans une base SQL.

■ Supervision

Pour assurer une disponibilité optimale du service, TERIA a également développé un outil de supervision qui contrôle en continu les performances du réseau. En parallèle à cela, des stations de contrôle sont aussi déployées afin de monitorer les performances du système de manière indépendante en plusieurs points et en temps réel. L'ensemble de ces données

N°	Phase de fonctionnement	Phénomène dangereux identifié	Impact sur la qualité de service	Fréquence d'exposition au phénomène	Occurrence du phénomène
1	Usage Nominal	Panne d'une constellation GNSS	P0 : Pas de risque identifié	1 - Année	2 - Événement imaginable mais inhabituel
2	Usage Nominal	Nouveau masque local sur les stations	P3 : Dégradation Qualité GNSS des corrections	1 - Année	3 - Événement possible
3	Usage Nominal	Brouilleur à proximité de la station permanente	P3 : Dégradation Qualité GNSS des corrections	1 - Année	3 - Événement possible
4	Usage Nominal	Coupure de courant sur les stations de référence	P1 : Micro-coupures sur les corrections	2 - Mois	4 - L'événement va assurément se produire
5	Usage Nominal	Problème serveur logiciel et matériel	P2 : Pas de corrections	1 - Année	3 - Événement possible
6	Usage Nominal	Météo - troposphère	P3 : Dégradation Qualité GNSS des corrections	2 - Mois	4 - L'événement va assurément se produire
7	Usage Nominal	Météo - ionosphère	P3 : Dégradation Qualité GNSS des corrections	1 - Année	4 - L'événement va assurément se produire
8	Usage Nominal	Internet coupure brève	P1 : Micro-coupures sur les corrections	2 - Mois	4 - L'événement va assurément se produire
9	Usage Nominal	Déplacement accidentel Antenne	P4 : Corrections fausses (décalage en coordonnées)	1 - Année	2 - Événement imaginable mais inhabituel
10	Usage Maintenance	Mise à jour logiciel et matériel	P0 : Pas de risque identifié	2 - Mois	4 - L'événement va assurément se produire

Tableau 1. Extrait du tableau d'analyse de risque.

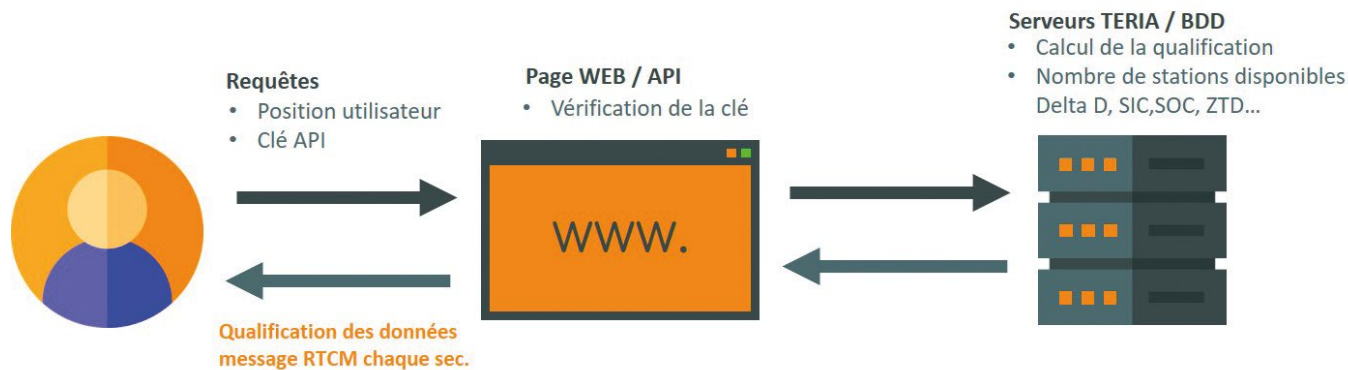


Figure 4. Fonctionnement de l'API.

est stocké dans une base SQL pour faciliter le suivi. Les indicateurs de performances suivis sont :

- la précision de positionnement en planimétrie et verticalité ;
- le statut du récepteur : ambiguïtés RTK fixées ou non ;
- la disponibilité du service.

■ La méthodologie suivante a été retenue

La collecte des données GNSS en temps réel est un processus automatisé qui fonctionne 24h/24 pour récupérer et traiter les données GNSS provenant des stations via des connexions TCP/IP. Ce processus est responsable de l'enregistrement et de la mise à jour continue des données dans une base de données dédiée. Les données collectées sont ensuite utilisées par l'API pour répondre aux requêtes des utilisateurs. Le processus se déroule en plusieurs étapes :

1. Disponibilité des stations : reçoit en temps réel des informations sur la disponibilité des stations GNSS via une connexion TCP/IP. Il extrait les données sur le nombre de satellites à ambiguïté fixée, la disponibilité des stations, et la dernière date de mise à jour. Ces informations sont stockées dans la base de données pour un suivi continu de l'état des stations.
2. Calcul des différences de coordonnées : reçoit les données GNSS brutes via plusieurs connexions TCP/IP. Il compare les coordonnées calculées en temps réel avec les coordonnées de référence et enregistre les différences (delta x, delta y, delta z, delta d) dans la base de données. Cela permet d'évaluer en permanence la précision des corrections envoyées par chaque station.

3. Calcul des paramètres SIC et SOC : un outil vient interroger le logiciel GNSMART pour récupérer sous forme de grille les valeurs de *Single Ionized Correction* (SIC) et *Single Offset Correction* (SOC). Les résultats sont stockés dans la base de données pour être exploités par l'API.

4. Calcul du ZTD : un outil est chargé de recevoir et de traiter les valeurs du *Zenith Tropospheric Delay* (ZTD). Une grille est stockée de la même manière que le SIC et SOC contenant les ZTD via une connexion TCP/IP dédiée, et les informations sont mises à jour en temps réel dans la base de données.

Coté utilisateur

■ Mise en œuvre d'une API

L'API développée par TERIA (figure 4) permet aux utilisateurs d'accéder aux données stockées en temps réel dans la base SQL. Lorsqu'une requête est reçue, l'API extrait les coordonnées contenues dans la trame NMEA de type GGA envoyée par l'utilisateur et procède à une série de calculs pour déterminer plusieurs éléments essentiels. Tout d'abord, l'API calcule le nombre de stations GNSS disponibles dans un rayon de 100 km autour de la position spécifiée par la trame. Ce nombre est déterminé en fonction de divers critères, tels que le nombre de satellites à ambiguïté fixée pour chaque station, ainsi que d'autres paramètres liés à la disponibilité. Ensuite, l'API identifie la station GNSS la plus proche de l'utilisateur. Elle va lire le vecteur déplacement de celle-ci, c'est-à-dire la différence entre les coordonnées de référence et les coordonnées calculées en temps réel pour l'antenne de la station de référence. Ce

paramètre permet d'évaluer la précision des corrections envoyées par la station. Enfin, l'API calcule les paramètres SIC, SOC, et ZTD. Le *Single Ionized Correction* (SIC) et le *Single Offset Correction* (SOC) sont utilisés pour corriger les erreurs dues aux perturbations ionosphériques et systématiques, tandis que le *Zenith Tropospheric Delay* (ZTD) sert à corriger les erreurs liées à la troposphère. Ces paramètres sont essentiels pour garantir la fiabilité des corrections GNSS envoyées à l'utilisateur.

Des contrôles sont finalement effectués sur la disponibilité et la qualité du service par des stations de contrôle au sol. L'ensemble des données communiquées par l'API est ensuite transmis via une encapsulation au format RTCM. Les données communiquées par l'API (figure 3) permettent ainsi de connaître la précision des modèles d'ionosphère et troposphère, le vecteur lié à la position de la station de référence, les performances des stations de contrôle et un KPI sur la disponibilité du service. Ainsi, il est possible d'évaluer au travers de ces KPI la performance attendue au maximum sur le positionnement final.

Exploitation

Les utilisateurs du réseau TERIA pourront bénéficier de cette nouvelle fonctionnalité de contrôle de qualité au travers de plusieurs outils. Dans un premier temps, l'application TERIAssr, qui permet entre autres de piloter les produits PXY, intégrera un menu "qualification de la donnée".

Puis, les applications sur Smartphone comme iTERIA permettront aux utilisateurs de récupérer ces informations sur le terrain quel que soit leur équipement de travail.



Pour terminer, un document décrivant l'API sera disponible pour fournir aux intégrateurs de solution la possibilité d'utiliser ces outils dans leur solution.

Pour aller plus loin : vers une transparence totale pour les utilisateurs

La qualification des corrections GNSS vise à offrir une transparence totale aux utilisateurs quant à la précision et à la fiabilité des services qu'ils utilisent. Au-delà de l'open data et de l'open source, il est essentiel pour les acteurs privés de fournir les moyens nécessaires aux utilisateurs du secteur de la topographie pour se contrôler et évaluer la performance des mesures effectuées. Depuis l'origine, l'autocontrôle est une pratique essentielle pour les géomètres, garantissant la fiabilité des mesures et la responsabilité qui leur est liée. Au travers de ces outils, TERIA perpétue cette tradition en assurant un contrôle rigoureux de ses services tout en communiquant de manière transparente avec ses utilisateurs.

Grâce à ces outils, TERIA permet de mieux anticiper les erreurs liées aux perturbations atmosphériques et aux anomalies systémiques, offrant ainsi un positionnement précis et fiable.

De plus, la visualisation à l'échelle nationale des paramètres SIC, SOC, et ZTD, basée sur une interpolation continue des données, permet de suivre les conditions atmosphériques en temps réel et d'améliorer la gestion des corrections GNSS. À travers ce procédé, TERIA renforce la qualité du service permettant aux utilisateurs de prendre des décisions éclairées et de maximiser la fiabilité des opérations.

Les prochains travaux pourraient consister à intégrer la technologie PPP pour contrôler en temps réel les ZTD, en comparant les valeurs générées depuis nos outils avec celles issues de l'algorithme PPP. Nous pourrions réaliser une même comparaison avec le positionnement des antennes de référence. Cette démarche permettrait un contrôle encore plus fin de la troposphère.

À ce jour, TERIA continue à investir dans l'installation de nouvelles stations de référence et de contrôle, afin de renforcer ce service de qualification des corrections NRTK de type VRS. ●

Bibliographie

https://www.geopp.de/pdf/gpsjin01_p.pdf
<https://www.geopp.de/pdf/geopp-rtcm-fkp59.pdf>

<https://www.reseau-teria.com/activite-ionospherique/>
<https://www.reseau-teria.com/prs30-et-prs32/>
<https://www.rtcn.org/>

Contacts

Paul CHAMBON, DG&CTO de TERIA, paul.chambon@reseau-teria.com
 Mohamed RIZKI, étudiant ENSG Stage effectué chez TERIA en 2024,
 Rakul IYNGARATHASAN, ingénieur système embarqué TERIA

ABSTRACT

Those utilising GNSS mobile receivers are required to exercise greater control over the measurements they take in the field. The rapid development of NRTK technology, which enables a single receiver to operate autonomously, has made it more accessible for use in topographic surveying and georeferencing. The objective of this research was to develop a tool for more effectively understanding the processing of GNSS corrections from the TERIA NRTK network. This will provide users with transparent information on the qualification of VRS corrections.

• géomatique • topographie • SIG • géomatique • cartographie • génie civil •

• photogrammétrie • géodésie • métrologie • hydrographie

• photogrammétrie • géodésie • métrologie • hydrographie

POUR COMMUNIQUER PENSEZ À L'AFT ANNONCES, BANNIÈRES, ÉVÈNEMENTS



L'AFT rapproche tous les professionnels de la topographie et de la géomatique (producteurs, utilisateurs, enseignants...)



CONTACT : CHRISTOPHE BAGIEU

Tél : 06 80 68 96 11 Courriel : communication@aftopo.org

• géomatique • topographie • SIG • géomatique • cartographie • génie civil •