

Évaluer un récepteur GNSS RTK pour la topographie

■ Florian BIROT

L'arrivée de récepteurs bas-coût performants sur le marché a bousculé certains a priori sur ces matériels et remobilisé les utilisateurs autour de la notion de test d'un appareil de mesure GNSS. Dans ce contexte, nous proposons d'explorer plusieurs méthodes d'évaluation des récepteurs GNSS. Nous nous focalisons sur les performances de positionnement, même si, aujourd'hui, une composante importante de la qualité d'un récepteur se trouve aussi dans son accessibilité, sa facilité d'utilisation et la capacité à toucher différents métiers, notamment certaines corporations qui ne sont pas nécessairement formées aux spécificités de la précision, du traitement du signal, ou de la géodésie. Les performances de positionnement restent relativement simples à évaluer, car nous avons accès facilement à des grandeurs mesurables permettant de le faire, contrairement à d'autres critères importants pour l'utilisateur final, comme l'ergonomie ou la facilité d'utilisation.

MOTS-CLÉS

GNSS, RTK, évaluation, statistique

Dans un passé pas si loin lointain, les intégrateurs de puces GNSS bifréquence code et phase étaient rarement surpris de voir des prix à trois ou quatre chiffres sur le catalogue NovAtel, Trimble ou Septentrio. Les cartes OEM donnaient tout de suite le ton du prix du produit fini. Et cela, à raison ! Car ces cartes étaient des références en la matière, par la qualité des signaux traités et celle des horloges internes. Ainsi, lors de la conception d'un récepteur GNSS orienté pour la topographie, ajouter à la puce GNSS une antenne GNSS, un modem GSM ou radio, des batteries, amenait rapidement l'appareil à des niveaux de prix dépassant les 10 000 €. Et cela aurait pu rester ainsi. Pourtant, sur les cinq dernières années, on a pu voir des constructeurs, souvent issus du monde du "chip mass market" (marché de masse des puces en tout genre, cellulaires, WiFi, Bluetooth, ou processeurs, comme Ublox ou Broadcom) sortir des puces GNSS à des prix unitaires à deux chiffres, permettant par conséquent à des intégrateurs de sortir des appareils RTK à moins de 5 000 €, voire à moins de 2 000 €.

Le marché du GNSS semble connaître la même révolution que celui de l'ordinateur dans les années 90 avec

l'avènement du *Personal Computer* : l'équipement est devenu moins élitiste, plus accessible. Et l'accessibilité s'est non seulement faite par le prix, mais aussi la facilité d'utilisation. Si le prix est une notion facile à définir, la "facilité d'utilisation" est plus floue et sujette à interprétation. La "facilité d'utilisation" d'un équipement pourrait être sa faculté à être utilisé par des personnes non formées aux spécificités techniques de son fonctionnement. C'est bien ce qui s'est passé avec les PC. Qui aujourd'hui est tout à fait conscient du rôle de chacun des composants d'un ordinateur, du système d'exploitation ou des spécificités de l'informatique réseau ? Il semble bien en aller de même avec le GNSS RTK standard d'aujourd'hui : quand on l'allume, il offre une position centimétrique sans que l'utilisateur n'ait à effectuer la moindre action. Cependant, par manque de critère mesurable sur cet aspect, l'évaluation de la "facilité d'utilisation" ne fait pas partie de l'objet de cet article.

L'humain est étonnant

Commercialiser un récepteur valant cinq à dix fois moins cher que les prix du marché génère des réactions diverses

chez les utilisateurs connaisseurs de la technologie de la géolocalisation de précision. Il y a les réfractaires ("non, à ce prix ça ne peut pas marcher"), les enthousiastes ("je vais en commander cinq") ou les indifférents ("tant que ça marche quand j'appuie sur le bouton"). Pour un certain nombre, cela s'est traduit par une volonté retrouvée de tester rigoureusement le matériel. L'attitude alerte et vouée au contrôle que l'on connaît bien chez le topographe avait semblé se perdre lentement mais sûrement face aux performances toujours plus incroyables des constructeurs GNSS historiques. Nous en tenons pour preuve les nombreuses vidéos virales d'utilisateurs se contentant de filmer les indicateurs de qualité en temps réel donnés par un récepteur placé sous une végétation dense, sans aller plus loin. Mais est-ce que cela est vraiment un "test" ou une "évaluation" du produit ? Si le récepteur vous annonce une précision à 1,0 cm, êtes-vous sûr et certain qu'une mesure future du même point vous donnera des coordonnées similaires à plus ou moins 1,0 cm ? Y a-t-il un intérêt pour le constructeur à annoncer des indicateurs de qualité trop optimistes, pour faire tourner les têtes ou, au contraire, trop pessimistes, pour se couvrir en cas d'erreur du calculateur interne ?

Un indicateur de qualité, aussi vu sous le nom de RMS, ou CQ3D, ou sigma, est un terme issu du calculateur en temps réel. On le nomme aussi précision *a posteriori*. Sa valeur est dépendante des valeurs de précision *a priori* sur les observations. Notons l'équation du système de positionnement X sous forme matricielle :

$$NX = C$$

Où X est le vecteur de position.
Avec

$$N = A^T P A$$

$$C = A^T P B$$



Où
 A est la jacobienne du système.
 B est le vecteur des observations.
 P est la matrice des poids associés.
 On peut noter :

$$P = \Sigma_B^{-1}$$

Où Σ_B est la matrice de variance/covariance *a priori* sur les observations. Les éléments diagonaux de cette matrice correspondent aux précisions *a priori* sur les n observations.

$$\Sigma_L = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & & \\ & \ddots & \\ & & \sigma_n^2 \end{bmatrix}$$

L'estimation de X est obtenue par :

$$\hat{X} = (A^T P A)^{-1} A^T P B$$

Et la matrice de variance/covariance sur les paramètres est calculée avec :

$$\Sigma_{\hat{X}} = k N^{-1}$$

Où k est un nombre réel. Les éléments diagonaux de cette matrice correspondent aux précisions *a posteriori* sur les m paramètres.

$$\Sigma_{\hat{X}} = \begin{bmatrix} \hat{\sigma}_1^2 & & \\ & \ddots & \\ & & \hat{\sigma}_m^2 \end{bmatrix}$$

Cela fait alors apparaître la relation entre les deux matrices de variance/covariance.

$$\Sigma_{\hat{X}} = k(A^T \Sigma_B^{-1} A)^{-1}$$

On remarque très vite que des valeurs fausses sur les précisions *a priori* ressortiront sur les précisions *a posteriori*. Pour pallier cela, l'algorithme de positionnement effectue généralement une repondération [RTKlib, 2012].

$$\Sigma_{\hat{X}}' = k'(A^T \Sigma_B^{-1} A)^{-1}$$

Avec

$$k' = \alpha k$$

Où α est un nombre réel.

Dans un récepteur non *open source*, nous ne savons rien de la logique interne de repondération après calcul, qui pourrait faire tendre les indicateurs sur certaines valeurs pour qu'elles soient plus conformes à ce que l'on attend sur le terrain. Il n'y a donc absolument aucune raison de faire confiance à un indicateur de qualité du constructeur lors d'une première utilisation. Au contraire, il peut être fort judicieux de les contrôler.



Figure 1. Un géomètre utilise le GNSS pour obtenir des coordonnées dans un système géodésique donné avec une précision centimétrique.

Que faire pour évaluer un récepteur GNSS destiné à la topographie

Il faut d'abord rappeler comment est utilisé un récepteur GNSS en topographie. Celui-ci est principalement utilisé pour les opérations de rattachement géodésique, c'est-à-dire pour obtenir des coordonnées avec un ordre de précision du centimètre dans le système géodésique localement en vigueur, en temps réel sur le terrain ou en post-traitement, pour un jeu de points de calage ou pour un levé complet. La capacité de l'appareil à fournir à l'homme de l'art les coordonnées avec précision et relative simplicité est ce qui en fait sa richesse. C'est donc sous ce prisme que nous discuterons des méthodes d'évaluation d'un récepteur GNSS : celui des performances de positionnement.

■ Tester les performances de positionnement

Un test simple peut être mené sans prendre en compte les indicateurs qualité internes du récepteur. Le test consiste à placer le récepteur



Figure 2. Vue d'une borne du RBF et de son environnement dégagé.

sur un point de référence stable et matérialisé (borne, clou, console...), et déterminé par des méthodes indépendantes et *a priori* au moins deux fois plus précises que la précision à évaluer. Les positions sont collectées pendant au moins une heure pour avoir un échantillon assez volumineux, et on en fait l'analyse, en séparant la planimétrie de l'altimétrie. Le réseau matérialisé de bornes du RBF est idéal pour cela. Ce réseau donne accès à environ un millier de bornes connues avec une précision inférieure à 1 cm en planimétrie et 5 mm en altimétrie [SGN, 2021].

La série de coordonnées collectées permet ensuite de construire les variables statistiques d'intérêt en leur soustrayant d'abord les coordonnées connues du point de référence.

$$X = \begin{pmatrix} X_e \\ X_n \\ X_h \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_e \\ X_n \\ X_h \end{pmatrix}_{\text{mesure}} - \begin{pmatrix} X_e \\ X_n \\ X_h \end{pmatrix}_{\text{ref}}$$

Puis en exprimant l'écart planimétrique résultant :

$$X_{\text{plani}} = \sqrt{X_e^2 + X_n^2}$$

X_{plani} et X_h sont les variables statistiques d'intérêt.

Ce test, sous son aspect direct et facilement réalisable, permet en fait d'évaluer le système (récepteur + source de corrections RTK) et non uniquement le récepteur seul. Néanmoins, on peut *a minima* conclure que la qualité du

Système : RGF93 (ETRS89) - Projection : LAMBERT-93
 Système altimétrique : NGF-IGN 1969

Point	e (m)	n (m)	Précision plani	Altitude (m)	Précision alti
a	644083.283	6842771.111	< 1 cm	157.258	< 5 mm

Figure 3. Affichage des coordonnées d'une borne du RBF et des précisions associées.



récepteur est *au moins* équivalente, voire *meilleure*, que celle des résultats.

$$\sigma_X^2 \approx \sigma_{\text{récepteur}}^2 + \sigma_{\text{corrections}}^2$$

La moyenne de la variable qualifiera l'exactitude (en faisant le raccourci que l'échantillon suive une loi normale, ce qui est normalement le cas si l'on se réfère au théorème central limite [Wikipédia, 2021]), et l'écart-type (sigma) qualifiera la justesse.

L'exactitude, ou "précision absolue", est la capacité du récepteur à se positionner aux vraies coordonnées. La justesse, ou "précision relative", est la capacité du récepteur à reproduire fidèlement une mesure de coordonnées. Ces deux notions sont souvent mélangées dans le terme un peu passe-partout de "précision". Il faut d'ailleurs être prudent lorsqu'on annonce une précision "au centimètre près" (1 sigma ou 67 % de probabilité = 1 centimètre), car cela n'a pas la même signification que "précision centimétrique" (1 sigma > 1 centimètre). Le RTK se trouve plutôt dans la seconde catégorie, comme le notent [Legros et al., 2013].

Les résultats de l'évaluation s'expriment alors en posant que le récepteur est capable de se positionner à moyenne +/- sigma de la position vraie.

■ Le test de répétabilité sur une mesure courte durée

Contrairement au test précédent, le test sur une courte durée est plus proche de ce que peuvent expérimenter les utilisateurs de récepteur GNSS topo. En général, la collecte d'un point en RTK se fait sur quelques secondes. Les données d'un chantier ne sont pas toutes collectées dans la même initialisation RTK, voire avec la même source de corrections RTK (régénération d'une VRS après coupure télécom par exemple).

Il convient alors de faire plusieurs mesures du même point dans des conditions d'observation différentes pour limiter la corrélation des résultats, et d'en faire l'analyse. Pour obtenir des conditions d'observation différentes entre mesures, il faut laisser un temps minimal de quelques heures s'écouler pour que la constellation de satellites utilisés dans le calcul soit sensiblement différente (satellites ayant changé de

position, nouveaux satellites apparus, satellites disparus), et que les perturbations ionosphériques et troposphériques changent. Si le test est effectué tous les jours à la même heure, il faut savoir qu'une corrélation subsiste sur la constellation GPS, mais pas sur les autres systèmes. Les GPS retrouvent leur position vue du sol à un jour sidéral d'intervalle (1 jour sidéral = 23 h 56 min 4 s), mais ce n'est pas le cas pour GLONASS (8 jours sidéraux), Galileo (10 jours sidéraux) ou BeiDou (7 jours sidéraux pour la partie non-géosynchrone de la flotte).

Pour reproduire ces conditions de mesure, nous proposons de tester un récepteur GNSS RTK avec la procédure suivante :

1. stationner le récepteur sur un site de précision planimétrique < 1 cm et altimétrique < 5 mm (par exemple un point du RBF) ;
2. initialiser le récepteur ;
3. enregistrer les coordonnées moyennes du point sur trois secondes consécutives ; relever en même temps le PDOP et la valeur des indicateurs qualité constructeur fournis par le récepteur à ce moment-là ;
4. faire l'expérience 3 fois par jour pendant cinq jours, en espaçant de plusieurs heures chaque session ;
5. former la variable statistique $X = X_{\text{mesure}} - X_{\text{ref}}$ et en faire l'analyse, comme lors du test précédent, et exprimer les mêmes résultats ;
6. confronter les résultats aux indicateurs de qualité du constructeur et au PDOP.

Notez qu'en suivant la procédure, nous pourrions qualifier les indicateurs du constructeur et en déduire s'ils sont fiables ou s'il vaut mieux s'en tenir à des contrôles indépendants sur le terrain.

Pour analyser leur pertinence et mieux comprendre ce qu'ils expriment, nous pouvons les comparer avec l'écart de la position à la moyenne des positions, et les comparer avec l'écart de la position à la position vraie. Nous avons alors deux nouvelles variables. Nous souhaitons les avoir au plus proche de zéro. Plus elles en sont éloignées, moins les indicateurs de qualité du constructeur sont fiables.

La notion d'environnement masqué

Ces tests peuvent se réaliser sous tout type d'environnement d'observations, dégagé, légèrement masqué ou fortement masqué. Dans des configurations masquées, il est possible de ne pouvoir, sur certaines sessions, obtenir un mode FIXE. Cela fait partie de l'évaluation. C'est pour cela qu'il faut associer à chaque mesure un indicateur de DOP. Cet indicateur a beau être aussi vieux que le GPS, il est très pertinent pour analyser les performances de positionnement d'un récepteur GNSS RTK. Quand on fait du différentiel, le DOP en FIXE est supérieur ou égal au DOP en SINGLE, car moins de satellites sont utilisés dans le calcul de position (on utilise le sous-ensemble commun de satellites à la base et au mobile). C'est pourquoi il faut bien relever la valeur du DOP fourni au moment de la mesure RTK plutôt que de l'extraire d'un simulateur en ligne.

La notion d'environnement masqué n'est pas bien définie. Il n'existe pas, à notre connaissance, de grandeur mesurable pour l'exprimer. Cela est souvent fait "au jugé" et il nous semble que parler de l'obstacle le plus élevé autour du site est insuffisant. Un outil existe qu'il semble intéressant de mieux exploiter : le relevé de masques. Nous proposons de définir succinctement un indicateur de masquage d'un lieu à partir du relevé de masques. Le relevé de masques se présente dans un repère en coordonnées polaires. C'est un contour associant à un azimuth une valeur d'élévation du masque vu sur site.

Le cas illustré nous indique entre autres la présence d'un obstacle s'élevant à 30° dans la direction sud-ouest, par exemple une colline au vu de l'évolution de l'élévation à droite et à gauche de cet azimuth. Plus le contour est proche de l'extrémité, plus la direction est dégagée et, plus elle est proche du centre, plus l'obstacle présent est haut.

Pour créer notre indicateur, notons qu'un relevé de masques peut se "mesurer" : on peut mesurer la surface à l'intérieur du contour et la



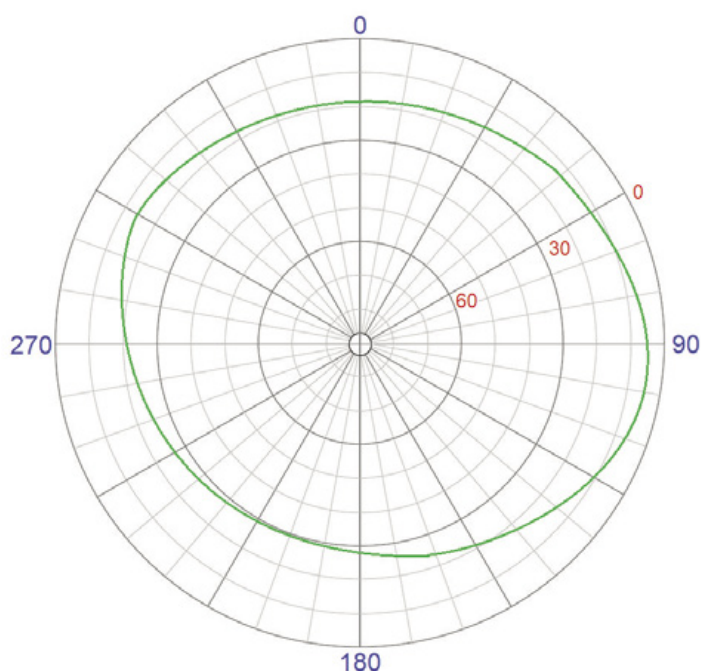


Figure 4. Exemple de relevé de masques (azimut en bleu, élévation en rouge, en degrés).

normer (lui donner une valeur entre 0 et 1) par rapport à la surface du repère polaire. C'est une première piste à explorer pour qualifier un environnement de mesure GNSS. Avec cette définition, le relevé de masques suivant correspond à un indicateur de masquage de 0,5.

Notre indicateur est exploitable. Est-il pertinent ? Tout ce qu'il renseigne est le niveau de masquage du site.

Il ne dit rien sur la capacité de ces masques à produire des phénomènes de trajets multiples au récepteur. Au contraire du relevé de masques, qui se fait visuellement, la capacité d'un environnement à créer des multitrajets se caractérise plus difficilement. Le multitrajet résultant est dépendant du satellite, de la nature de la surface réfléchissante, de la capacité de l'antenne à le filtrer, de celle du récepteur

à le détecter... Nous ne tenterons pas de fournir un indicateur simple pour ces phénomènes ici. Il existe la combinaison multipath pour évaluer ces phénomènes, mais cela se calcule *a posteriori*, à partir d'observations multifréquences. Ce n'est donc pas adapté pour une évaluation *a priori* d'un environnement de mesure.

Notre indicateur de masquage a ses limites. Sachant que le calculateur GNSS rejette généralement les satellites d'élévation inférieure à 10°, car ceux-ci sont trop bruités par leur traversée de l'atmosphère, il n'est probablement pas nécessaire de prendre en compte les masques en dessous d'une élévation de 10°. Mais prendre cela en compte rendrait l'indicateur dépendant du récepteur utilisé pour le test, ce que nous ne voulons pas, car nous cherchons à proposer un indicateur standardisé.

Dans le même ordre d'idée, étant donné qu'il existe une zone blanche satellite sur tout site (même au bout d'une période temporelle, aucun satellite ne sera passé dans une certaine partie du ciel), tout masque présent dans cette zone ne saurait être considéré comme problématique pour la visibilité des satellites. Le souci qui apparaît alors est que cette zone blanche dépend des constellations traitées par le système récepteur + corrections RTK. Pour rester indépendant du récepteur, nous n'intégrerons pas cet aspect dans la définition de notre indicateur.

Pour faciliter son usage, nous donnons à cet indicateur un nom et une unité : ce sera l'indice M (comme masque), exprimé en % (le taux de remplissage du contour optimal). Sur la figure 5, l'indice M vaut donc 50.

Ainsi, pour compléter l'évaluation d'un récepteur GNSS RTK, nous proposons de réaliser les tests dans des environnements à différents seuils d'indice M :

- plus de 90 (les sites du RBF ont de bonnes chances d'être dans cette catégorie) ;
- entre 50 et 90 ;
- entre 30 et 50 ;
- moins de 30.

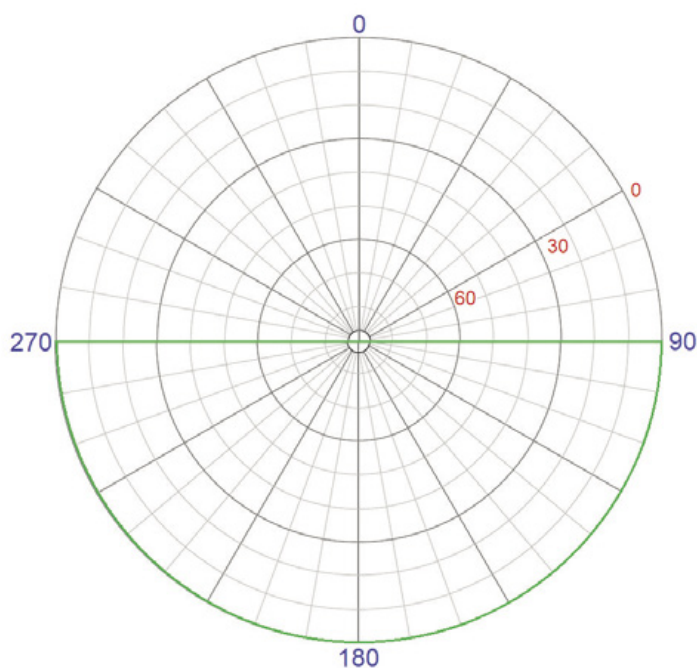


Figure 5. Relevé de masques avec un indicateur de masquage à 0.5.

Les spécifications de précision du constructeur

Les constructeurs de récepteurs GNSS RTK fournissent une fiche technique avec des précisions planimétriques et altimétriques. Elles sont constituées d'une constante en mm et d'un facteur d'échelle en ppm relatif à la longueur de la ligne de base.

Suffisent-elles à évaluer un récepteur GNSS RTK (en un autre sens, pourquoi s'embêter avec les tests présentés précédemment) ? Comment sont-elles obtenues ? Et quel sens leur donner ?

Il n'est pas toujours clair d'obtenir les informations sur la méthode d'obtention de ces valeurs. Leica Geosystems cependant indique que ces valeurs sont obtenues conformément à la norme ISO17123-8. Que dit cette norme ?

En substance, elle indique la méthodologie de mesure et de traitement des résultats pour exprimer les précisions. Trois récepteurs sont mis en situation : une base de référence et deux mobiles du modèle à évaluer. Les deux mobiles sont séparés d'une distance de 2 à 20 mètres. La distance horizontale et la dénivelée entre les deux points stationnés par les mobiles doivent être étalonnées à mieux que 3 mm (on imagine que cela est faisable avec une station totale). Les coordonnées des deux mobiles sont déterminées depuis la base. On en déduit la distance plane entre les deux mobiles et la dénivelée, que l'on compare dans un premier temps aux valeurs de référence étalonnées afin de détecter toute valeur aberrante. Une série de mesure consiste en cinq jeux de coordonnées à obtenir sur les deux mobiles en moins de 25 minutes, afin de rester dans le même cycle d'influence de multitrajets. Trois séries, séparées chacune d'au moins 90 minutes, sont réalisées pour avoir des jeux de mesures effectuées dans des

conditions d'observations décorrélées. Un système matriciel faisant apparaître les paramètres a (la constante) et b (le facteur d'échelle) est alors créé et peuplé avec les mesures terrain, puis résolu par moindres carrés [iso.org, 2021].

Ces valeurs donnent une idée de la qualité de la ligne de base calculée entre un mobile et une base. Nous obtenons en fait une évaluation de cette équation de positionnement :

$$\Delta X_{B \rightarrow m} = X_m - X_B$$

Avec

X_m le vecteur des coordonnées du mobile

X_B le vecteur des coordonnées de la base

$\Delta X_{B \rightarrow m}$ le vecteur des composantes de la ligne de base

En réalité, l'utilisateur cherche généralement à obtenir X_m à partir de X_B et du calcul de la ligne de base. L'équation résolue sur le terrain est plutôt :

$$X_m = X_B + \Delta X_{B \rightarrow m}$$

Si l'on a pu évaluer la qualité de la ligne de base et que ces valeurs sont fournies par le constructeur, il reste, dans les faits, à prendre en compte l'incertitude sur X_B . C'est pour cela que les performances de positionnement d'un récepteur GNSS RTK sur le terrain ont une variance nécessairement plus forte que ce qui est annoncé dans les fiches techniques.

$$\sigma_{X_m}^2 = \sigma_{X_B}^2 + \sigma_{\Delta X_{B \rightarrow m}}^2$$

X_B a nécessairement une incertitude :

- incertitude du géoréférencement initial ;
- incertitude de la mise en station (centrage, verticalité, hauteur d'antenne).

Donc

$$\sigma_{X_B}^2 > 0$$

Et donc

$$\sigma_{X_m}^2 > \sigma_{\Delta X_{B \rightarrow m}}^2$$

Les valeurs données par les constructeurs sont donc à interpréter en conséquence.

Cet article avait pour objectif d'exposer différents tests d'évaluation d'un récepteur GNSS RTK et d'en expliquer les subtilités et les limites. Nous poursuivrons dans un futur article en réalisant ces tests avec le Reach RS2 du constructeur Emlid et avec le SP85 de Spectra Precision. ●

Contact

Florian Birot

Dirigeant FB SOLUTIONS

florian@fb-solutions.tech

Bibliographie

[iso.org, 2021], ISO - ISO 17123-8:2007 - *Optics and optical instruments — Field procedures for testing geodetic and surveying instruments* — Part 8: GNSS field measurement systems in real-time kinematic (RTK), <https://www.iso.org/standard/42213.html#:~:text=ISO%2017123-8%3A2007%20specifies%20field%20procedures%20to%20be%20adopted,when%20used%20in%20building%20C%20surveying%20and%20industrial%20measurements.,> consulté en septembre 2021

[Legros et al., 2013], *Le positionnement cinématique temps réel suivant les méthodes "NRTK" et "RTK pivot libre"*, Legros R., Morel L., Viguier F., Birot F., XYZ n° 135, p.47-54, 2013

[SGN, 2021], *Serveur de fiches | Géodésie* (ign.fr), <https://geodesie.ign.fr/fiches/index.php?module=e&action=visuageod>, consulté en septembre 2021

[Wikipedia, 2021], *Théorème central limite* — Wikipédia (wikipedia.org), https://fr.wikipedia.org/wiki/Th%C3%A9or%C3%A8me_central_limite, consulté en septembre 2021

ABSTRACT

The arrival of many low-cost GNSS RTK receivers seems to have rekindled a taste for testing surveying equipment. We look at how to evaluate the positioning performance of these receivers, what to consider and what to look out for.

Cinématique en temps réel (conforme à la norme ISO17123-8)	Ligne de base individuelle RTK réseau	Hz 8 mm + 1 ppm V 15 mm + 1 ppm Hz 8 mm + 0,5 ppm V 15 mm + 0,5 ppm
--	---------------------------------------	--

Figure 6. Aperçu de la fiche technique du GS18 de Leica Geosystems.

Precision	Static	H: 4 mm+0.5 ppm V: 8mm+1 ppm
	PPK	H: 5 mm+0.5 ppm V: 10mm+1 ppm
	RTK	H: 7 mm+1 ppm V: 14 mm+1 ppm

Figure 7. Aperçu de la fiche technique du Reach RS2 de Emlid.