

systèmes GNSS RTK à faible coût

Avec un degré de précision de l'ordre du centimètre

Giovanni Carrera (Italie)

Le GPS (*Global Positioning System*) est connu et utilisé dans le monde entier dans la vie de tous les jours. Cependant, d'autres systèmes, appelés GNSS RTK, sont moins connus. Ils effectuent des mesures de la phase de la porteuse sur plusieurs systèmes de satellites et atteignent une précision inférieure au centimètre, à des prix désormais abordables, même pour un hobbyiste.

Les premiers récepteurs RTK (*Real-Time Kinematic*) étaient exclusivement destinés à des usages professionnels, tels que les mesures topographiques. Les récepteurs professionnels coûtaient encore plusieurs milliers d'euros. Depuis quelques années, on trouve sur le marché des modules offrant de nombreuses applications à un coût nettement inférieur : Outre les applications traditionnelles telles que les SIG (systèmes d'information géographique), ces récepteurs RTK sont particulièrement adaptés au contrôle d'aéronefs et autres véhicules, tels que les UAV (*Unmanned Aerial Vehicles*) et les UGV (*Unmanned Ground Vehicles*) comme les engins agricoles sans présence humaine et les drones.

An interesting application is by using two RTK receivers linked together to measure not only position, but also heading and roll, or pitch. This satellite compass is much more accurate than a magnetic compass and even than a gyrocompass.

Une application intéressante consiste à utiliser deux récepteurs RTK reliés entre eux pour mesurer, non seulement la position, mais aussi le cap et le roulis, ou le tangage. Ce compas satellitaire est beaucoup plus précis



Source : Shutterstock

qu'un compas magnétique et même qu'un gyrocompas. J'ai utilisé trois récepteurs RTK, dont les antennes ont été montées sur le pont d'un navire, pour mesurer les trois mouvements angulaires avec une grande précision.

GNSS

Les récepteurs de navigation par satellite sont généralement appelés GPS, mais les récepteurs les plus sophistiqués, qui sont capables de traiter des signaux provenant de diverses constellations de satellites, comme le GLONASS russe, le BeiDou chinois ou le Galileo européen, sont définis comme des GNSS (*Global Navigation Satellite Systems* ou systèmes mondiaux de navigation par satellite).

Contrairement aux appareils GPS ordinaires, les récepteurs GNSS peuvent voir davantage de satellites, et choisir ceux qui ont la meilleure position ou des signaux plus forts ; il s'agit d'une caractéristique très importante quand il s'agit d'effectuer des mesures avec une précision inférieure au centimètre, comme le RTK. La technique RTK est utilisée pour obtenir des mesures de position instantanées et très précises avec les systèmes satellitaires GNSS. Elle utilise la mesure de la phase des ondes porteuses transmises par les satellites, seuls certains récepteurs satellites sont capables d'effectuer le suivi de la phase de la porteuse. La précision de ces récepteurs est de l'ordre du centimètre, voire du millimètre, selon la qualité du récepteur et de son antenne. Ces récepteurs, essentiellement conçus pour un usage topographique, sont capables de recevoir deux ou trois porteuses et coûtent plusieurs milliers d'euros. Cependant, des entreprises comme le suisse U-blox, produisent depuis des années des récepteurs à bas prix, capables d'effectuer des mesures de phase. Le problème se situait au niveau du logiciel de traitement, qui demeure encore très coûteux. L'ingénieur japonais Tomoji Takasu a largement contribué



à résoudre ce problème en écrivant ses programmes RTKLIB [1] et en les rendant open source (logiciels libres). Entre-temps, les évolutions technologiques de l'électronique ont permis la production de microcontrôleurs de plus en plus puissants, permettant au traitement RTK d'être effectué directement dans le récepteur lui-même, atteignant une précision de quelques centimètres, même sans utiliser un PC.

Et c'est précisément de ces systèmes que traite cet article ; étant donné l'étendue et la complexité de ces sujets, je n'aborderai pas en détail le principe de fonctionnement des systèmes GNSS, mais je propose plutôt une bibliographie : [2][3].

Systèmes de satellites

Le premier prototype de satellite GPS a été mis en orbite en février 1978 et, en 1995, le système a atteint sa pleine capacité opérationnelle (*FOC Full Operational Capability*) pour les applications civiles et militaire.

Outre le GPS américain, d'autres systèmes ont été introduits, tels que le GLONASS russe précédemment mentionné, le BeiDou chinois et le Galileo européen. Des systèmes satellitaires ont également été développés pour accroître la précision d'un récepteur autonome. Ces systèmes utilisent des satellites géostationnaires et un réseau de stations terrestres destinées à effectuer des corrections différentielles à long terme. Les résultats sont inférieurs à ceux obtenus avec le DGPS (*Differential GPS*), car le système opère sur une plus grande zone, mais l'utilisateur a l'énorme avantage de pouvoir améliorer la précision et la fiabilité des mesures sans utiliser d'équipement sophistiqué et coûteux !

Les récepteurs satellites modernes peuvent recevoir des satellites de différentes constellations ainsi que des signaux provenant de satellites SBAS (Satellite-Based Augmentation System), tels que le WAAS (*Wide-Area Augmentation System*) américain et l'EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay Service*) européen. Les fréquences porteuses des différents systèmes étant différentes, l'antenne doit également être capable d'assurer la réception de toutes ces fréquences. Pour des mesures de précision, l'antenne doit être de bonne qualité, car elle peut avoir une grande influence sur les résultats. Pour éviter que l'antenne ne soit perturbée par les réflexions des faisceaux multiples, il est préférable de la fixer sur une plaque métallique d'un diamètre d'au moins 10 cm, reliée à la terre.

Le récepteur différentiel en code et en phase

Pour les applications nécessitant une grande précision de la position, il convient d'utiliser des récepteurs DGPS/DGNSS. Les systèmes GPS/GNSS sont sujets à plusieurs erreurs de mesure, dues en grande partie à la propagation des ondes électromagnétiques dans l'ionosphère et la troposphère. Il en résulte une précision de positionnement horizontal allant de 2 à 10 mètres. Pour

y remédier, on utilise des systèmes différentiels, c'est-à-dire deux stations suffisamment proches (ligne de base ne dépassant pas 15 km) pour voir des satellites ayant la même configuration de position. Les récepteurs DGNSS peuvent réduire considérablement ces erreurs en utilisant la différence entre les mesures des deux stations. Les récepteurs fonctionnant uniquement avec les codes qui leur parviennent atteignent une précision de l'ordre du mètre, ceux qui utilisent également la phase de la porteuse peuvent atteindre une précision de l'ordre du millimètre. Ils utilisent deux récepteurs : l'un dans une station fixe ou de base, l'autre dans une station mobile (ou rover). Le récepteur du rover sera différent d'un récepteur standard, car il devra corriger les données en fonction des informations provenant de la station de base.

La station de base transmet les corrections différentielles en format brut ou RTCM (format international mis en place par la « *Radio Technical Commission for Maritime Services* » au rover. Ces stations doivent être suffisamment proches (<10 km) pour obtenir la meilleure précision ; pour des distances plus longues, la précision diminue car les récepteurs « voient » une configuration de position différente pour les satellites.

La station de base transmet les données brutes/RTCM via une liaison radio établie avec Wi-Fi, Bluetooth ou un modem radio, selon les distances à couvrir, comme le montre la **figure 1**. Si la zone est couverte par des réseaux cellulaires, les données peuvent être transmises par GSM, GPRS ou via l'internet.

Les récepteurs GPS courants mesurent la distance satellite-antenne en analysant le code reçu (portée du code). Les bits du code PRN (Pseudo Random Noise ou bruit pseudo-aléatoire) sont générés à une fréquence de 1,023 MHz, ce qui correspond à la longueur d'onde $\lambda = 2931 \text{ m}$, qui est la longueur spatiale de chaque bit. La mesure de corrélation des codes générés par le satellite et le récepteur s'effectue à 1 % de λ , ce qui conduit à une précision d'environ 3 à 5 m, en considérant également les autres erreurs inhérentes au système. Un système DGPS avec des récepteurs de codes offre une meilleure

Figure 1.
Système différentiel.

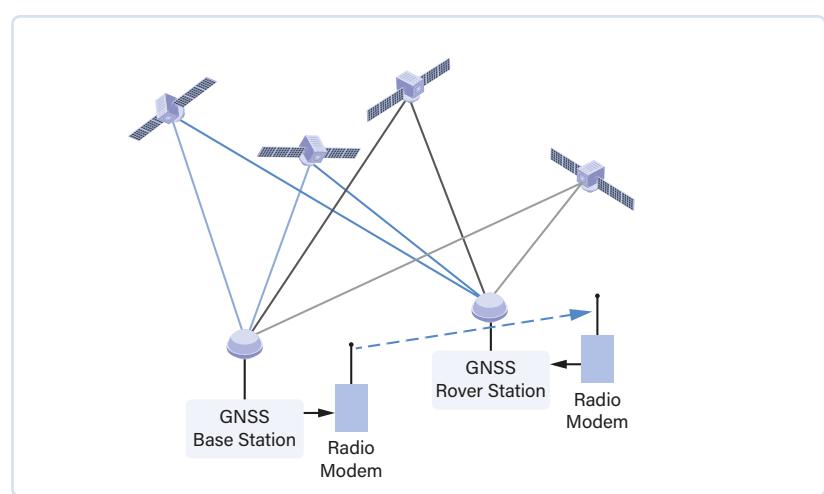
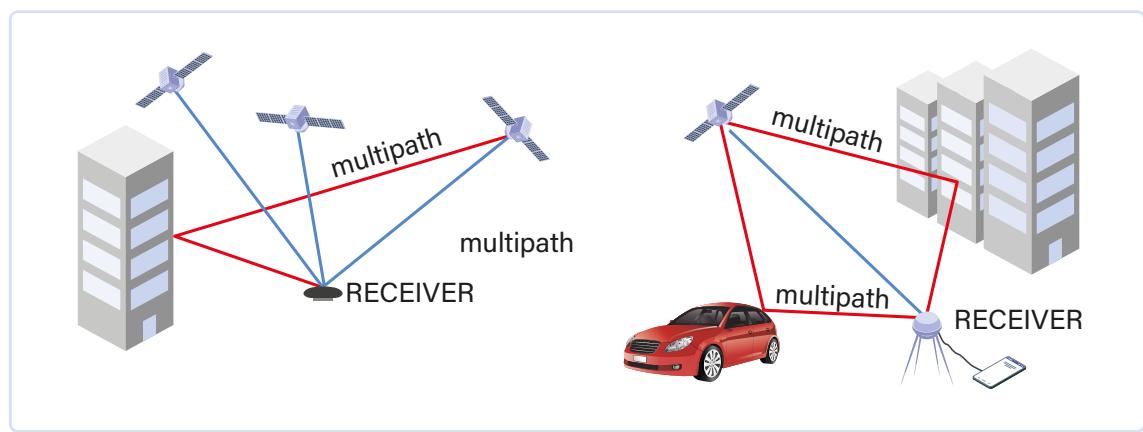


Figure 2.
Exemples de réception
de signaux multiples.



précision, mais elle descend difficilement en dessous d'un mètre.

Le code PRN se répète périodiquement, toutes les millisecondes, de sorte que la mesure de la distance présente une ambiguïté égale à cette périodicité, soit environ 300 km. Cette ambiguïté est considérable, mais elle est facilement éliminée puisque l'on connaît la distance avec une approximation d'au moins 100 km. Pour un positionnement très précis, nous avons besoin de récepteurs qui peuvent également travailler sur le suivi de la phase de la porteuse. Les mesures de phase sont beaucoup plus précises, car elles utilisent également les ondes porteuses : Pour le GPS, les longueurs d'onde sont d'environ 19 cm pour L1 et 24 cm pour L2. Si l'on considère qu'il est possible de mesurer des déphasages inférieurs à un degré, la précision devient de l'ordre du millimètre, sans tenir compte des autres sources d'interférence. Dans ce cas, la mesure de la distance est calculée en déterminant le nombre de cycles de la porteuse entre le satellite et l'antenne réceptrice, puis en multipliant ce nombre par la longueur d'onde. Le calcul du nombre de cycles entiers est un processus compliqué appelé « résolution d'ambiguïté ». Il nécessite au moins 6-7 satellites avec une bonne configuration de position, et la résolution de l'ambiguïté prend quelques dizaines de secondes. Le rover détermine sa position à l'aide d'algorithmes qui intègrent la résolution de l'ambiguïté et la correction différentielle. La précision de la position du rover dépend, entre autres, de sa distance par rapport à la station de base, appelée « ligne de base », de la précision des corrections différentielles et de la qualité des observations satellitaires de la station de base. Pour obtenir une bonne précision absolue, indispensable pour les utilisations topographiques, il est nécessaire de connaître la position de la station de base ; sinon, on travaille avec un positionnement relatif.

Mesures RTK et post-traitement

Si l'on souhaite des mesures de position précises en temps réel, nous avons besoin d'un système RTK. Le récepteur du rover doit être équipé d'un processeur supplémentaire suffisamment puissant pour pouvoir calculer la solution de l'ambiguïté de phase. De plus, le rover doit recevoir les données de correction en temps réel. Ces systèmes sont plus complexes et nécessitent un système radio ayant une capacité suffisante pour couvrir la zone dans laquelle ils devront fonctionner. Les récepteurs RTK sont plus coûteux que les récepteurs de phase

porteuse car ils nécessitent une plus grande puissance de calcul. Avec ces récepteurs, il n'est pas nécessaire d'avoir un PC, sauf pour visualiser les résultats des solutions RTK ou pour sauvegarder les mesures.

Si nous ne voulons pas connaître la position correcte en temps réel, nous pouvons travailler en mode post-traitement. Dans ce cas, le système ne nécessite pas la transmission de données de correction. La station de base et le rover doivent être équipés d'un petit ordinateur doté d'un logiciel spécifique pour le suivi et l'enregistrement des données sur disque. Il est également possible d'utiliser un petit enregistreur de données en série. En une seconde, les deux fichiers acquis par les stations au cours de la même période sont traités et les positions précises du rover peuvent être calculées. Le post-traitement permet généralement d'obtenir des mesures plus précises, car la puissance de calcul disponible est plus importante.

Éléments limitant l'utilisation du système RTK

Contrairement à un récepteur GPS normal, tel que ceux intégrés dans les smartphones ou les systèmes de navigation des voitures ou des bateaux, les systèmes RTK nécessitent les conditions de fonctionnement suivantes pour atteindre une précision de l'ordre du centimètre :

- la ligne de base, qui est la distance entre la base et le rover <10 km
- l'antenne doit voir le ciel à 360° horizontalement et à au moins 15° en élévation
- absence de sources d'interférences électromagnétiques à proximité
- signaux reçus des satellites >37 dB
- 7 satellites ou plus avec une bonne géométrie

Les obstacles qui peuvent masquer les satellites sont les murs, les grilles ou tôles métalliques, les pylônes, les arbres et même le corps des animaux. Un obstacle est un objet opaque aux ondes radio, dont les dimensions sont supérieures à la longueur d'onde λ de la porteuse. Pour le GPS, cette longueur d'onde est d'environ 19 centimètres. Pour ces raisons, il faut toujours se tenir à l'écart de l'antenne satellite.

Ces obstacles, en plus de ne pas laisser passer les ondes électromagnétiques, peuvent également agir comme des réflecteurs, créant le phénomène de trajets multiples, tels que ceux illustrés sur la **figure 2**.



En utilisant uniquement une constellation GPS, il peut y avoir des interruptions au cours de la journée, en raison de l'indisponibilité momentanée d'au moins sept satellites ayant un bon positionnement géométrique. Pour ces raisons, un récepteur GNSS capable de recevoir deux constellations ou plus en même temps dispose d'un plus grand nombre de satellites pour choisir ceux qui ont une meilleure configuration de positionnement géométrique.

Précautions pour le montage de l'antenne

Comme dans tous les systèmes radio, l'antenne est très importante et une installation incorrecte nuit considérablement à l'efficacité du système RTK. N'oubliez pas que la position, c'est-à-dire le point de repère, est relative au centre de l'antenne. L'antenne est relativement simple, elle doit avoir des caractéristiques isotropes uniquement pour la partie supérieure de l'horizon. L'antenne la plus courante est l'antenne patch, elle a une forme plate faite d'une plaque conductrice avec un matériau céramique interposé, elle a un profil bas et une forme carrée ou circulaire, et elle est souvent montée sur une base magnétique. Elle est généralement active, c'est-à-dire qu'elle intègre un amplificateur de signal dont l'impédance de sortie ($50\ \Omega$) correspond à celle du câble coaxial de ligne. Les récepteurs peuvent alimenter l'amplificateur de l'antenne par le même câble. L'antenne doit être montée de manière à respecter les règles décrites ci-dessus, c'est-à-dire dans une position surélevée par rapport aux obstacles environnants. Pour les systèmes RTK, ces règles sont encore plus restrictives que pour un système de navigation normal, qui fonctionne également à l'intérieur du véhicule. Un assemblage d'antennes tel que celui de la **figure 3a** est à éviter à tout prix, car son profil l'empêche de voir les satellites situés à moins de 45° d'élévation sur sa droite. Il est donc nécessaire de placer l'antenne sur un support élevé plus approprié, comme illustré sur la **figure 3b**.

Données brutes RTCM et RINEX

Comme nous l'avons mentionné, pour pouvoir traiter la position correcte en temps réel, le rover doit recevoir de la station de base les mesures de phase, à des fins de correction. Il existe généralement deux types de messages, tous deux en binaire :

- données en format brut
- données au format RTCM

Le premier est propriétaire, c'est-à-dire qu'il est développé par le fabricant du module de réception. Cela signifie que des modules de la même famille doivent être utilisés pour les deux stations. Le format brut est le plus complet et permet donc une plus grande précision. Cependant, il implique une plus grande quantité de données à transmettre, ce qui peut poser des problèmes au système de communication en raison de la plus grande largeur de bande requise.

Le format RTCM (*Radio Technical Commission for Maritime Services*) est de type standard, les dernières versions, 3.x, ayant une meilleure compression des données et une meilleure intégrité des messages que les versions 2.x. Il permet également utiliser différents récepteurs ou même des données provenant d'une station du réseau régional, l'important étant de vérifier que les versions sont identiques. L'inconvénient est toutefois sa moindre précision.

Il existe également un troisième format, le RINEX (*Receiver-INdependent Exchange Format*). Il s'agit également d'une norme, les dernières versions étant 3.x. Comme il s'agit d'ASCII, il n'est pas très compact. Seuls les récepteurs les plus coûteux offrent également ce format de sortie. Il est largement utilisé par les programmes de post-traitement tels que RTKPOST et RTKLIB. Dans ce cas, il faut acquérir les données brutes dans des fichiers puis les convertir en RINEX avec RTKconv. Le système de transmission de la base au rover n'est plus nécessaire, mais les stations doivent être équipées d'enregistreurs de données. Bien sûr, avec ce système que j'ai utilisé jusqu'à présent, nous ne disposons pas des données en temps réel, mais nous pouvons atteindre une plus grande précision, par rapport aux récepteurs RTK.

Utilisation des réseaux de stations fixes

Dans certaines régions, il existe des réseaux GNSS très précis qui permettent d'obtenir des mesures en temps réel. L'un de ces systèmes est NTRIP (Networked Transport of RTCM via Internet Protocol), ce protocole est implémenté dans RTKLIB. Pour l'Europe, voir EUREF [4]. En Italie, il existe un certain nombre de stations, mais toutes n'utilisent pas ce protocole.

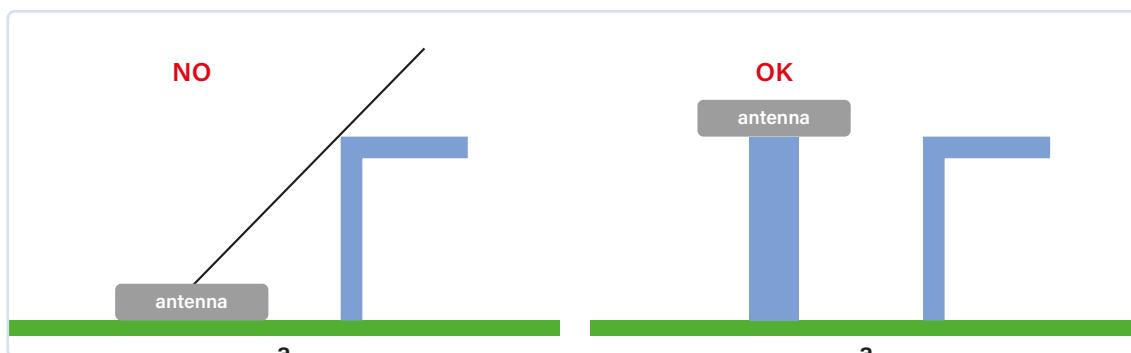


Figure 3.
Précautions pour
l'installation des
antennes.

Tableau 1. Récepteurs de phase GNSS

Référence de la carte	Dénomination et Fabricant	Module GNSS	Satellites reçus
 (Source : U-blox)	U-blox NEO-M8T Time & RAW Receiver	U-blox M8T	GPS, QZSS, GLONASS, BeiDou
 (Source : NVS Technologies)	NV08C-CSM-BRD NVS Technologies	NVS NV08C	GPS, Galileo, GLONASS
 (Source : NavSpark)	NS-RAW Carrier Phase Raw Measurement NavSpark	Venus822A	GPS, SBAS, QZSS

Tableau 2. Récepteurs RTK.

Référence de la carte	Dénomination et Fabricant	Module GNSS	Satellites reçus
 (Source : U-blox)	NEO-M8P RTK GNSS	U-blox M8P	GPS L1 C/A, GLONASS L1OF, BeiDou B1I
 (Source : NVS Technologies)	NV08C-RTK-M NVS Technologies	NV08C-RTK-M	L1 & L2 GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou
 (Source : Mikroe)	GNSS RTK Click MIKROE-4456	U-blox ZED-F9P	GPS, GLONASS, Galileo et BeiDou + SBAS et QZSS
 (Source: ArduSimple)	simple RTK2B ArduSimple	U-blox ZED-F9P	GPS, GLONASS, Galileo et BeiDou + SBAS et QZSS
 (Source : NavSpark)	S2525F8-GL-RTK EVB	S2525F8-GL-RTK	GPS, GLONASS



Dans ce cas, seul le récepteur du rover est connecté à un smartphone ou une tablette munie d'une carte SIM et de l'application RTKLIB. La précision est beaucoup plus faible que celle mettant en œuvre deux stations et dépend de la distance de la station de référence utilisée pour la correction. Ce système ne fonctionne que si le mobile peut accéder à un réseau terrestre et s'il y a des stations NTRIP à proximité.

Récepteurs GNSS pour systèmes RTK

Aujourd'hui, il existe plusieurs récepteurs sur le marché à un prix relativement bas. Les moins chers ne font que des mesures de phase et les transmettent à un PC ou à un Raspberry Pi sur lequel est installé le programme open-source RTKLIB du créateur japonais Tomoji Takasu. Ce programme s'est répandu parce qu'il est gratuit et très actuel. L'un de ces programmes, RTKPOST, peut traiter les données au format brut ou au format RINEX, en post-traitement. Avant d'acheter un récepteur de phase GNSS, il faut vérifier qu'il est inclus dans la liste des récepteurs compatibles avec RTKLIB.

Le **tableau 1** présente quelques exemples de cartes relativement bon marché avec mesure de la phase de la porteuse (RAW) et récepteurs compatibles RTKLIB. Ces cartes, avec un ordinateur et RTKLIB, peuvent devenir des systèmes RTK à faible coût. Seuls quelques modules U-blox sont capables de fonctionner sur la phase, le plus récent étant le NEO M8T.

La carte NavSpark NS-RAW, qui contient une puce SkyTraq Venus822A avec des sorties brutes et un microcontrôleur LEON3 Sparc-V8 32 bits avec une unité IEEE-754 64 bits à virgule flottante cadencée à 100 MHz, est particulièrement intéressante. Le logiciel est développé à l'aide de l'IDE Arduino avec l'ajout du programme Arduino NavSpark Boards by SkyTraq ajouté à l'aide du Card Manager. Le puissant processeur dispose d'une mémoire flash de 1024 Ko et d'une mémoire vive de 212 Ko. L'alimentation est assurée par le port USB, avec un régulateur à faible chute (LDO) qui fournit 3,3 V à la carte. L'antenne satellite se connecte à l'aide d'un connecteur U.FL.

Le **tableau 2** présente des exemples de cartes RTK bon marché. Il ne s'agit que d'exemples que j'ai sélectionnés en tenant compte du prix. J'ai longuement expérimenté les deux derniers récepteurs avec des résultats très satisfaisants, comme on le verra plus loin. Le système chinois SkyTraq a été testé il y a cinq ans et présente un bon rapport qualité-prix. Ce récepteur a été remplacé récemment par un récepteur plus performant.

Il y a quelques années, le système suisse U-blox ZED-F9P a été testé, il présentait de meilleures performances pour un prix plus élevé.

SkyTraq S2525F8 mesures de test

Une carte de développement basée sur le module SkyTraq S2525F8-GL-RTK [5] a été utilisée pour faciliter les tests.

Il s'agit d'un récepteur RTK, ayant un bon rapport qualité-prix, basé sur le chipset Venus8, qui offre une résolution centimétrique. La version la moins chère fournit une mesure RTK par seconde. La carte d'évaluation comporte deux adaptateurs TTL/USB basés sur la puce CP2102, pour la connexion au PC pendant l'installation et la configuration. Bien entendu, pour la connecter au PC, vous devez installer le pilote correspondant. Par défaut, la sortie NMEA du rover a une vitesse de transmission de 115 200 bit/s, tandis que la base émet au format SkyTraq Raw Data avec une vitesse de transmission de 57 600 bit/s.

La **figure 4** montre l'antenne et la carte, d'une taille d'environ 90×90 mm, utilisées pour les essais. L'antenne est une antenne multi bande bon marché pour GPS/Galileo, BeiDou, GLONASS. Il s'agit d'une antenne active avec un gain de 25×27 dB alimentée par 3,3 V à 10 mA (fournie par le récepteur). Ses dimensions sont de 49×46×16 mm, le connecteur est de type SMA et le câble coaxial est un RG174 de 3 m de long. Pour éviter le bruit des signaux multiples, les antennes ont été fixées sur une plaque métallique mise à la terre d'environ 15 cm de diamètre. Comme indiqué précédemment, il est nécessaire que la station rover reçoive le message de la station de base avec les corrections en temps réel, si l'on veut obtenir une grande précision. Ce message est assez long et sa longueur varie (voir RAW/RTCM dans le paragraphe « récepteur différentiel en code et en phase » ci-dessus). Une liaison radio en bande Wi-Fi réalisée avec des dispo-

Figure 4.
La carte GNSS RTK
et l'antenne.

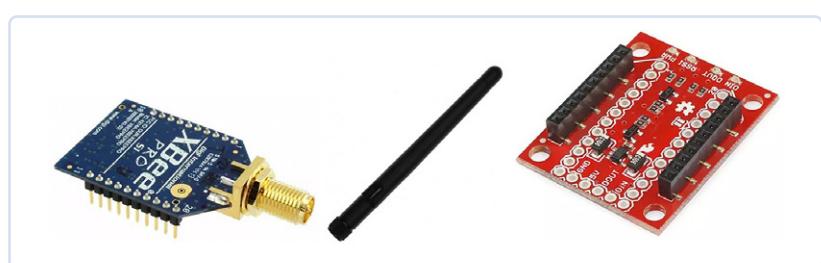
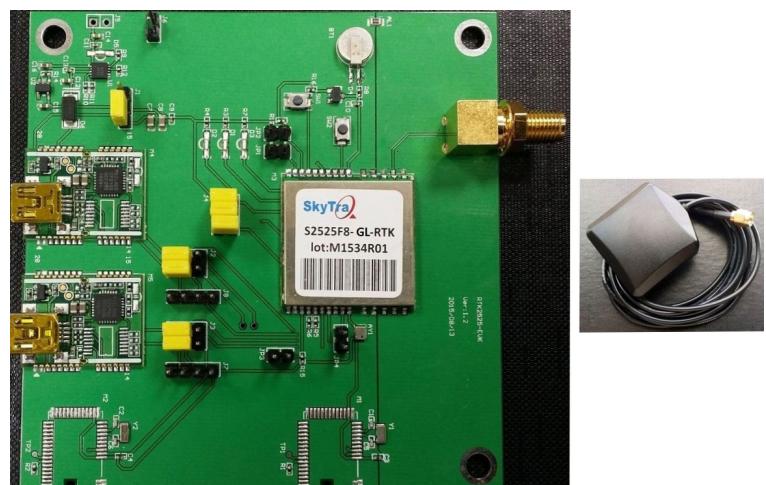


Figure 5. Le modem radio XBee, son antenne et le convertisseur d'alimentation.

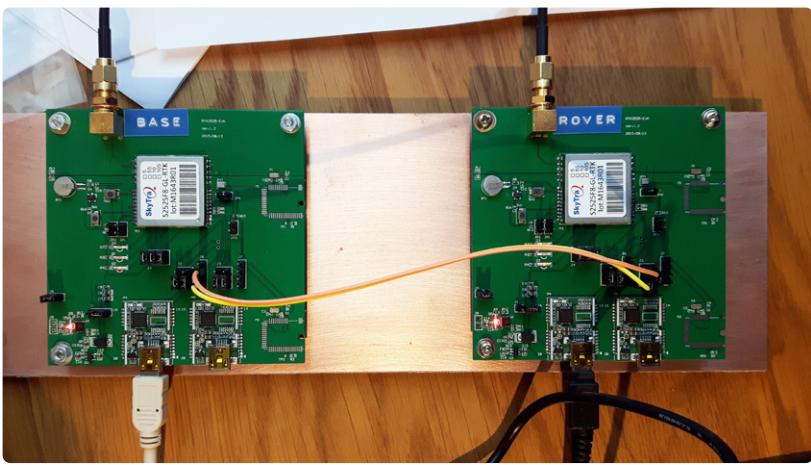


Figure 6. Test de la ligne de base courte.

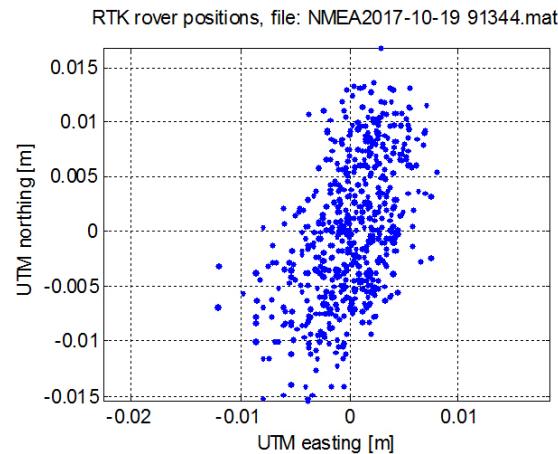


Figure 7.
Test en position fixe.
Coordonnées UTM
en mètres (Universal
Transverse Mercator).

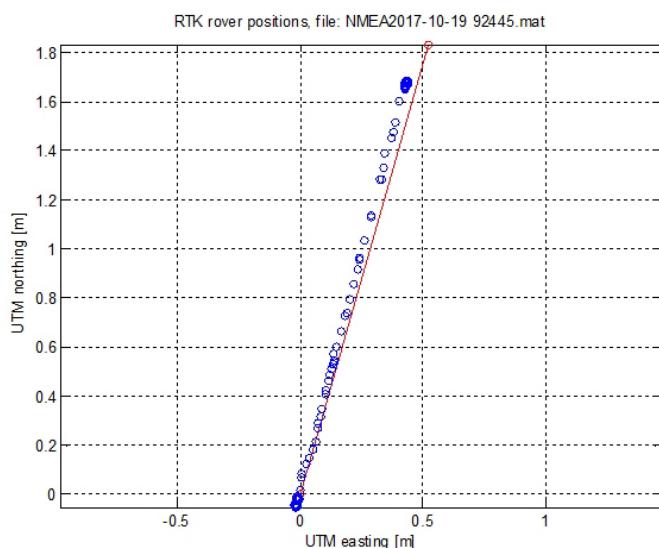


Figure 8. Test en déplacement rectiligne. Coordonnées UTM en mètres (Universal Transverse Mercator).

sitifs XBee était prévue pour ce système, et elle a été testée avec succès jusqu'à une distance d'environ 800 m dans des conditions sous-optimales. Avec des antennes à gain plus élevé et en l'absence d'obstacles, il serait possible d'atteindre une plus grande portée.

Modems radio et limites imposées par la réglementation en vigueur

Avec ces limites, il est possible de transmettre un signal à faible largeur de bande, limité à quelques kHz et avec des portées en visibilité directe de quelques kilomètres. Les règles sur la bande des 2,4 GHz sont moins restrictives, puisqu'il est possible d'utiliser jusqu'à 100 mW sans aucune autorisation pour des réseaux locaux dans une zone privée. C'est pourquoi le choix s'est porté sur un système XBee Pro S1 de 2,4 GHz de Digi International. Il s'agit d'un émetteur-récepteur de données sérialisées pouvant atteindre 250 kb/s, avec une puissance de sortie maximale de 18 dBm (63 mW) et une sensibilité de réception de -100 dBm. Il est alimenté à 3,3 V et possède un connecteur d'antenne SMA inversé (RP-SMA). Pour compléter chaque appareil, il faut une antenne omnidirectionnelle avec un connecteur femelle RP-SMA et un adaptateur orientable à 90°, ainsi qu'un convertisseur d'alimentation LDO (Low DropOut) à faibles pertes de 5 V à 3,3 V. La figure 5 montre les différents éléments des deux appareils qui constituent la liaison radio. Pour le module XBee de la station de base, la puissance est réglée sur 3 (High) et non sur 4 (Highest), de sorte que la puissance de sortie est au niveau 3, ce qui correspond à 16 dBm (40 mW).

Programmes de configuration du récepteur RTK

Le fichier *GNSS_Viewer.zip* doit être téléchargé [6]. Ce programme est utilisé pour configurer les récepteurs et afficher les mesures RTK du rover. Il y a un autre fichier *GNSS_Viewer-NmeaPlayer.zip* contenant un programme qui ne configure pas le récepteur, mais qui affiche les mesures RTK et les données précédemment enregistrées au format NMEA.

Les manuels de ces programmes sont également disponibles au format PDF. Un document essentiel à lire pour configurer ces cartes est le fichier *Getting_Started_with_S2525F8-BD-RTK-EVB.pdf*.

La sortie est au format NMEA standard, sauf que la latitude et la longitude sont affichées avec 7 chiffres décimaux, contre 4 chiffres pour un récepteur normal, qui n'aurait pas permis pas d'obtenir la résolution subcentimétrique mesurée sur la phase porteuse.

Tableau 3. Bandes de réception et fréquences des différents systèmes satellitaires.

GPS	GLONASS	Galileo	BeiDou
L1C/A (1 575,42 MHz)	L1OF (1 602 MHz + k * 562,5 kHz, k = -7, ..., 5, 6)	E1-B/C (1 575,42 MHz)	B1I (1 561,098 MHz)
L2C (1 227,60 MHz)	L2OF (1 246 MHz + k * 437,5 kHz, k = -7, ..., 5, 6)	E5b (1 207,140 MHz)	B2I (1 207,140 MHz)

Tests statiques et dynamiques avec une ligne de base très courte

Lors des essais préliminaires, une ligne de base très courte a été utilisée : Outre l'interconnexion au sol, le port 1 de la base (Tx1 sur J8) a été connecté au port 2 du rover (Rx2 sur J3), comme le montre la **figure 6**.

Les deux récepteurs ont été alimentés par deux câbles USB connectés à un seul PC. Le système s'est rapidement mis en mode solution RTK. L'enregistrement du point fixe a donné de très bons résultats, probablement en raison de la bonne configuration géométrique et d'un nombre approprié de satellites. La solution RTK obtenue sur l'ensemble du test est de type FIX ($Q = 4$), soit très bonne, comme le montre la **figure 7**.

Les résultats sont également confirmés par le CEP95 (rayon du cercle contenant 95% des mesures) qui n'est que de 12 mm. Le nuage de points est plus écrasé sur l'axe horizontal car il était impossible, depuis ma maison, de voir certains satellites (qui étaient bas sur l'horizon) au nord.

Pour l'analyse NMEA et l'élaboration des données, j'ai écrit plusieurs programmes en MATLAB. Pour convertir la latitude et la longitude en coordonnées UTM, la fonction `wgs2utm.m` d'Alexandre Schimel a été utilisée. Pour un premier test cinématique, un rail avec un profil en aluminium a été fabriqué, et l'antenne du rover, fixée à un traîneau en bois, a été amenée à suivre le rail à l'aide de deux patins latéraux. Le traîneau a été déplacé à l'aide d'une corde, en maintenant une vitesse aussi régulière que possible.

La **figure 8** montre la trajectoire rectiligne du sud vers le nord. La ligne a été tracée entre les deux points moyens calculés à partir des mesures du point fixe. Pour des raisons mécaniques, le point le plus au sud n'a pas été atteint pendant le test. Les points ne sont pas équidistants car la corde a été tirée manuellement. Les résultats des tests sont très bons, même si l'on tient compte du fait que le site n'était pas optimal pour la visibilité des satellites.

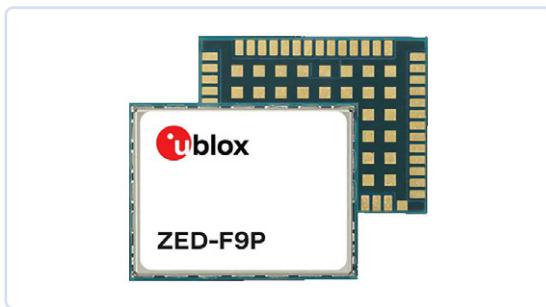
Le module Ublox ZED-F9P

Le module ZED-F9P [7] (**figure 9**) peut recevoir et suivre plusieurs constellations GNSS : GPS, GLONASS, Galileo et BeiDou, ainsi que les satellites SBAS et QZSS, comme le montre le **tableau 3**.

Tous les satellites en vue peuvent être traités pour fournir une solution de navigation RTK lorsqu'ils sont utilisés avec des données de correction. En mode RTK, la précision de la position du ZED-F9P est de l'ordre du centimètre, comme le confirment de nombreux tests réalisés dans différentes conditions. Il dispose d'une interface USB, de deux ports UART, d'une interface I²C et d'une interface SPI.

La carte RTK2B-V3

La carte ArduSimple RTK2B [8] est une carte très compacte et polyvalente. En plus du module ZED-F9P, elle dispose d'un connecteur de type Xbee, d'un



*Figure 9.
Le module ZED-F9P.
(Source : U-blox)*

adaptateur USB/TTL et d'un second port USB pour la programmation.

Le fabricant d'ArduSimple fournit une série de modules à monter sur cette interface pour la communication radio, tels que Bluetooth, G4, Wi-Fi, Lora, etc. La **figure 10** montre la carte, dont les dimensions sont similaires à celles de l'Arduino UNO/Zero, avec lequel elle est parfaitement compatible. Les signaux E/S sont compatibles 1,8 V, 3,3 V et 5 V, adaptés automatiquement par la tension IOREF.

Cette carte peut être alimentée directement par les connecteurs Arduino ou par un connecteur micro USB, et elle est protégée contre les sources d'alimentation simultanées (via les connecteurs et l'USB). La consommation d'énergie, sans les modules XBee, est de 204 mW. La carte est équipée d'un régulateur LDO (low-dropout) de haute puissance et à faible bruit. Avec seulement 390 mV de perte, il est possible d'alimenter la carte avec une seule pile au lithium. De nombreuses LED permettent de vérifier le fonctionnement de la carte, qui dispose de divers connecteurs pour l'interfaçage avec des systèmes de type ArduPilot, pour des applications de contrôle de position de haute précision.

Tests RTK avec NTRIP

Les premiers tests ont été effectués avec la correction envoyée par une station de référence du réseau régional de Ligurie via NTRI, en utilisant d'abord le PC avec le logiciel U-Blox U-Center, puis un module G4 (voir ci-dessous) sur le slot ArduSimple XBee. La connexion à l'inter-

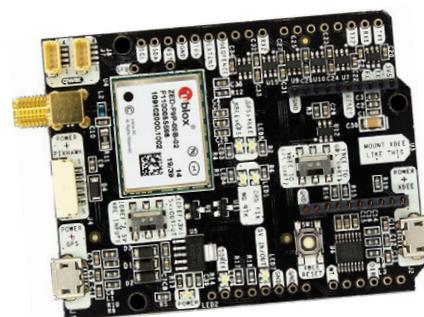


Figure 10.
La carte ArduSimple
simpleRTK2B V3.
(Source : U-blox).



*Figure 11.
Le module 4G LTE.
(Source : Telit)*

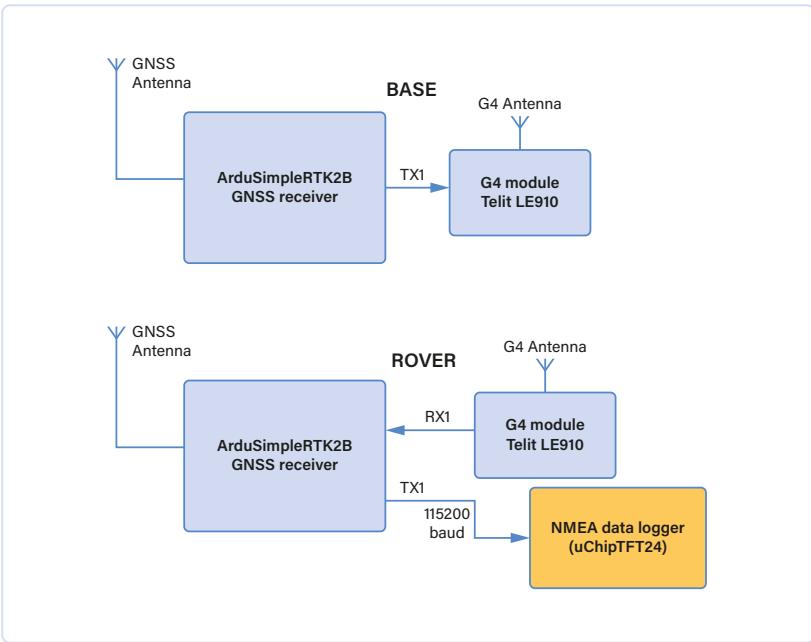


Figure 12.
Schéma du système.



Figure 13.
Le microcontrôleur.

Figure 14. Test du point fixe.

net via le PC a permis de mieux choisir la configuration NTRIP. NTRIP (Networked Transport of RTCM via Internet Protocol) est un protocole développé par l'Agence fédérale allemande pour la cartographie et la géodésie (BKG) à la fin de l'année 2004, qui permet de diffuser des données de correction DGPS ou RTK via Internet. Avec un ordinateur personnel ou un téléphone portable supportant TCP/IP, NTRIP est le meilleur moyen d'envoyer des messages RTCM au récepteur RTK du rover sans avoir à utiliser un système radio local coûteux, qui, pour se conformer aux lois sur les communications radio, doit-être de faible puissance et donc de courte portée.

Module 4G LTE

Le module 4G utilisé est un Telit modèle LE910 V2. Ses bandes, pour l'Europe, le Moyen-Orient et l'Asie, sont les suivantes :

- Bandes 4G (MHz) : B1 (2 100), B3 (1 800), B7 (2 600), B8 (900), B20 (800)
- Bandes 3G (MHz) : B2 (2 100), B8 (900)
- Bandes 2G (MHz) : B3 (1 800), B8 (900)

Ce module est monté par ArduSimple sur une carte compatible XBee, dont l'aspect est illustré à la **figure 11**. Il nécessite une puissance élevée (HP) et doit être monté sur des cartes de type RTK2-V3.

Pour sa configuration, j'ai suivi les instructions du guide d'installation de la RTK2B-V3, auquel je renvoie le lecteur. Le schéma fonctionnel est illustré à la **figure 12**. Un système basé sur un microcontrôleur 32 bits SAMD21 avec un écran TFT de 2,4 pouces a également été utilisé pour certains tests, sur lequel j'ai développé un logiciel pour calculer les coordonnées cartésiennes en mètres (UTM : *Universal Transverse Mercator*). La **figure 13** montre ce système, qui sert également d'enregistreur. Pour obtenir une résolution élevée, le mode haute précision doit être configuré. Dans cette configuration, la latitude et la longitude ont sept chiffres après la virgule

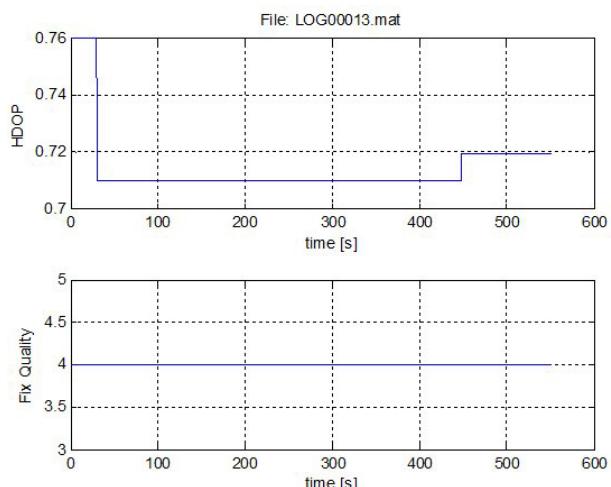
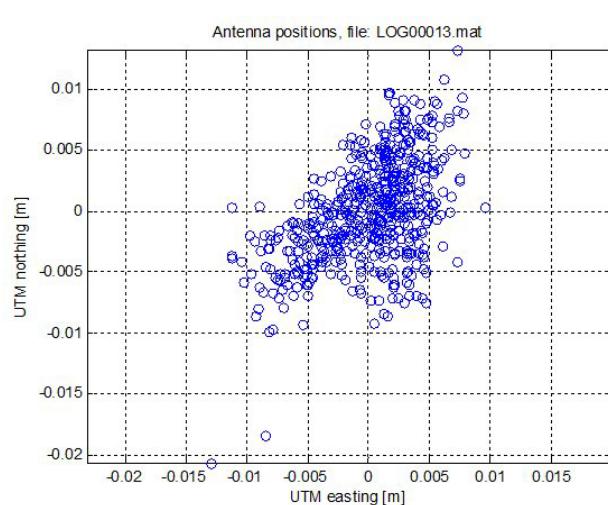




Figure 15. Le banc d'essai à vitesse constante, réalisé par l'auteur.



Figure 16. Gros plan du moteur d'entrainement du chariot.

et l'altitude en a trois. Connectez le Rover au PC et démarrez l'application U-Center, puis dans le menu Configurer, sélectionnez le protocole NMEA et cliquez sur Mode Haute Précision et sauvegardez la configuration.

Mesure du point fixe (NTRIP)

Voici les résultats de mes programmes Matlab :

```
File name = LOG00013.mat
Values averaged on 551 epochs, from point =
1, to point = 551
Initial GPS time = 32779 and final = 33329
CEP R95 = 0.010 m
```

Bien que la station de référence soit située à 16 km et que la visibilité du ciel ne soit pas totale, les résultats sont excellents (**figure 14**).

Mouvement rectiligne à vitesse constante

Pour réaliser ce test, un dispositif spécial a été fabriqué. Un rail a été créé à partir d'un profilé d'aluminium, sur lequel un sabot de bois pouvait glisser, tiré par une corde et une poulie actionnée par un motoréducteur électrique. La **figure 15** montre le rail avec l'antenne montée sur le chariot entraîné par le moteur, et le gros plan de la **figure 16** montre le motoréducteur et la poulie. Les photos ne le montrent peut-être pas, mais le rail a été soigneusement mis à niveau et son orientation a été mesurée à l'aide d'une boussole.

Voici les résultats de mes programmes Matlab :

```
File name = 30082107.mat
Values averaged on 29 epochs, from point =
309, to point = 337
```

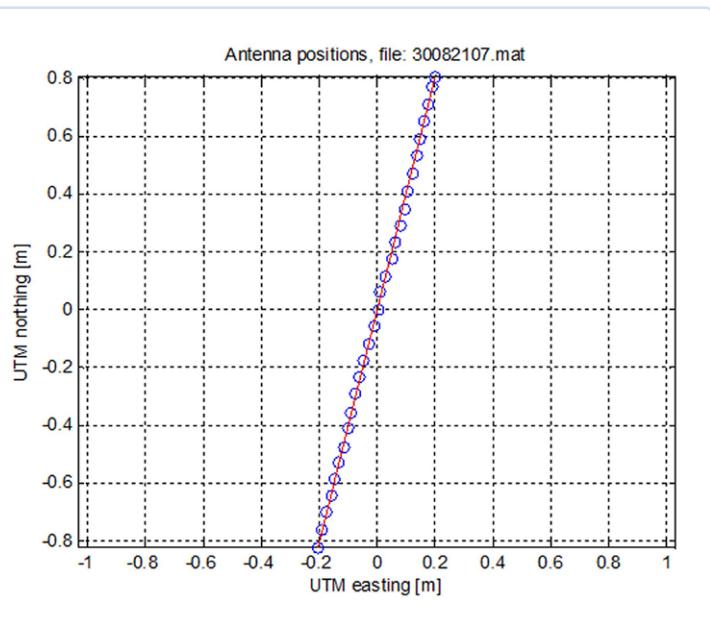


Figure 17 : Test du mouvement rectiligne, avec déplacement du chariot à vitesse constante par un motoréducteur.

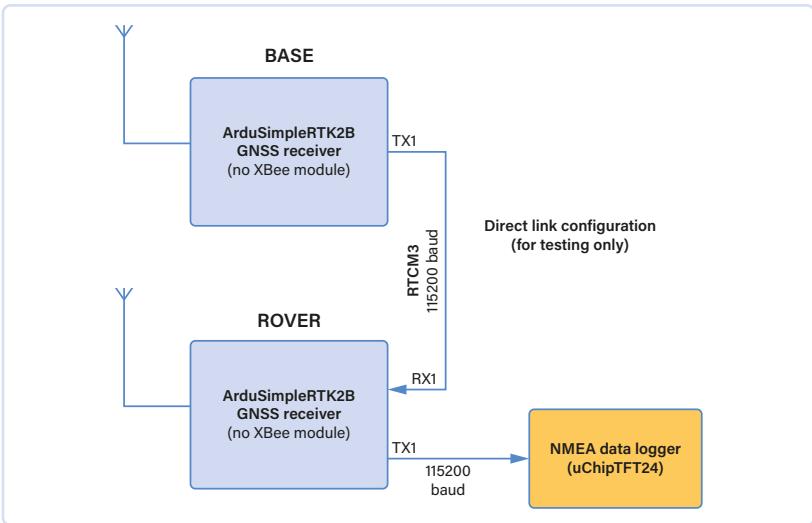


Figure 18. Configuration en liaison filaire directe.

Initial GPS time = 26030 and final = 26058
Path traveled = 1.678 m
Mean speed = 0.0599 m/s

Comme le montre la **figure 17**, cette mesure a été très bonne, grâce au fait que le site présentait moins d'obstacles, ce qui a même permis de voir les satellites les plus bas au nord. La trajectoire est pratiquement rectiligne. La course a duré 28 secondes avec une vitesse moyenne d'environ 60 mm/s ou 2,16 km/h. Les essais au point fixe, effectués aux extrémités de la course, ont donné des résultats exceptionnels avec un CEP R95 (*Circular Error Probable* Erreur circulaire probable pour 95% des mesures) de seulement 6 mm.

Mesure du point fixe (Short Base Line et Direct Link)

Ce test de récepteur exclut le système de transmission de la base pour les données de correction et le remplace par un simple fil, comme le montre la **figure 18**.

Bien sûr, c'est le système qui devrait donner la plus grande précision, simplement parce que les deux antennes sont à quelques mètres l'une de l'autre et qu'il n'y a pas de perturbations de la liaison radio.

Le rover doit être configuré pour une sortie des données NMEA à 115 200 bauds. L'enregistreur de données (ArduLog) sauvegarde les phrases NMEA sur une carte SD. La sortie Tx1 du rover doit être configurée pour le protocole NMEA en mode haute précision (coordonnées avec 7 chiffres après la décimale). L'enregistreur de données utilisé pour ce test est un système de type OpenLog.

Des câbles connecteurs pour Arduino sont utilisés pour le câblage, et un port USB est connecté au rover pour l'alimentation et la surveillance du système depuis le PC. Les résultats de cet essai sont présentés ci-dessous :

```
File name = LOG00014.mat
Values averaged on 578 epochs, from point = 1, to point = 578
Initial GPS time = 42023 and final = 42600
Elevation = 685.24 m
CEP R95 = 0.007 m
```

VF : Jean Boyer — 220307-04

Questions ou commentaires ?

Contactez Elektor (redaction@elektor.fr).



À propos de l'auteur

Giovanni Carrera est titulaire d'un diplôme en ingénierie électronique. En tant que professeur d'université à la faculté d'ingénierie navale de Gênes, en Italie, il a enseigné de nombreux cours, tels que l'automatisation navale et la simulation des systèmes de propulsion des navires. M. Carrera a commencé à travailler à la fin des années 1970 avec un microprocesseur 6502, avant de passer à d'autres processeurs. Aujourd'hui, il se consacre à la conception et au développement de circuits électroniques analogiques et numériques, dont il a présenté un grand nombre sur ses blogs (ArduPicLab et GnssRtkLab) et dans divers magazines.



Produits

➤ Antenne GNSS multi bande à montage magnétique - 5 m (SMA)
<https://elektor.fr/19649>

➤ Cartes GPS chez Elektor
<https://elektor.fr/catalogsearch/result/?q=gps>

LIENS

- [1] RTKLIB: An Open Source Program Package for GNSS Positioning : <https://rtklib.com>
- [2] Introduction au GNSS : <https://novatel.com/an-introduction-to-gnss>
- [3] Understanding GPS, Principles and Applications, E. D. Kaplan, C. J. Hegarty, Artech House, 2006 : <https://us.artechhouse.com>
- [4] Euref-ip.net GNSS Streaming Server : <https://euref-ip.net/home>
- [5] Getting Started with S2525F8-BD-RTK EVB or S2525F8-GL-RTK EVB, NavSpark : <https://bit.ly/3Wqe1c7>
- [6] GNSS Viewer: https://navspark.mybigcommerce.com/content/GNSS_Viewer-CustomerRelease.zip
- [7] ZED-F9P Fiche technique du module GNSS de haute précision U-blox F9, UBX-17051259-R08 : <https://bit.ly/3oiKpk>
- [8] SimpleRTK2B V3 Hookup Guide : <https://ardusimple.com/simplertk2b-v3-hookup-guide>

VOUS AVEZ DE LA CHANCE !



TÉLÉCHARGEZ
GRATUITEMENT

Un abonné à l'e-zine ne manque jamais
le mensuel «reverse project»

Vous n'êtes pas encore abonné ? Inscrivez-vous à
notre e-zine gratuit à elektormagazine.fr/ezine-24

