



HAL
open science

Le Real Time Kinematic collaboratif, lowcost et open source. Positionnement GNSS temps réel, cinématique, collaboratif et en accès libre et à faible coût

Julien Ancelin, Sylvie Ladet, Wilfried Heintz

► To cite this version:

Julien Ancelin, Sylvie Ladet, Wilfried Heintz. Le Real Time Kinematic collaboratif, lowcost et open source. Positionnement GNSS temps réel, cinématique, collaboratif et en accès libre et à faible coût. Spatial Analysis and GEomatics 2023, GDR MAGIS Méthodes et Applications pour la Géomatique et l'Information Spatiale; Centre de Recherche en Données et Intelligence Géospatiales de l'Université Laval (Québec), Jun 2023, Québec, Canada. pp.184-197. hal-04144737

HAL Id: hal-04144737

<https://hal.inrae.fr/hal-04144737>

Submitted on 28 Jun 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

CentipedeRTK

Le Real Time Kinematic collaboratif, low-cost et open source

Positionnement GNSS temps réel, cinématique, collaboratif et en accès libre et à faible coût

Ancelin Julien¹, Ladet Sylvie², Heintz Wilfried²

1. INRAE, UE 0057 DSLP

Domaine expérimental de Saint-Laurent-de-la-Prée, France

Julien.Ancelin@inrae.fr

2. INRAE, Université de Toulouse, UMR 1201 DYNAFOR

Castanet-Tolosan, France

Sylvie.Ladet@inrae.fr; Wilfried.Heintz@inrae.fr

Le système GNSS (Géolocalisation et Navigation par un Système de Satellites) avec correction différentielle temps réel offerte par le RTK fournit une précision sub-métrique ou centimétrique, même dans des environnements difficiles, grâce à l'augmentation du nombre de satellites et à l'accès facilité à des technologies et matériels dédiés. Cependant, l'accès à ces technologies de géolocalisation précises a longtemps été limité par les coûts élevés des équipements. Avec l'émergence de solutions libres et ouvertes, ce frein est désormais levé. Le réseau CentipedeRTK, créé par des agents issus d'organismes français de recherche publique, vise à fournir un maillage national d'antennes fixes qui fournissent un signal de correction ouvert. Ce réseau d'acteurs scientifiques et techniques offre également des modes opératoires en libre accès pour construire et utiliser des appareils RTK à bas coût. En conséquence, les utilisations de CentipedeRTK se sont multipliées dans divers domaines tels que l'agriculture de précision, la recherche forestière ou océanique.

The GNSS (global navigation satellite systems) system with real-time differential correction offered by RTK provides sub-meter or centimeter precision, even in challenging environments, due to the increasing number of satellites and easier access to dedicated technologies and equipment. However, access to these precise geolocation technologies has long been limited by the high cost of equipment. With the emergence of free and open solutions, this barrier has now been lifted. The CentipedeRTK network, created by agents from the Public Research sector, aims to provide a nationwide network of fixed antennas that provide an open correction signal. This network of scientific and technical actors also provides open access to operational modes for building and using low-cost RTK devices. As a result, uses of CentipedeRTK have multiplied in various fields such as precision agriculture, forest or oceanic research.

MOTS-CLES : CentipedeRTK, GNSS, géolocalisation, collaboratif, RTK, correction différentielle, précision, satellites, technologies, matériels, réseau, techniques, modes opératoires, libre accès, code ouvert, matériel libre, usages.

KEYWORDS: CentipedeRTK, GNSS, geolocation, collaborative, RTK, Differential Correction, Precision, Satellites, Technologies, Equipment, Network, Technical, Operational Modes, Open-Access, Open-Source, Open-Hardware, uses cases.

1. Introduction

La géolocalisation est un processus qui permet de déterminer la position géographique d'un objet fixe ou mobile sur la Terre. Le système de localisation par satellite utilise la trilatération, où la position de l'objet est déterminée à partir des signaux échangés entre le récepteur de l'objet et au moins quatre satellites d'une constellation. La mesure du temps de parcours de ces signaux permet de déterminer la longitude, la latitude et l'élévation de l'objet, avec une précision qui varie en fonction de la technologie utilisée, allant de quelques dizaines de mètres avec un système de positionnement par satellite (GNSS) conventionnel (Bossier, 2012 ; Bossier, 2014 ; Duquenne *et al.*, 2005 ; Lahaye et Ladet, 2014a) à des résultats centimétriques avec une correction différentielle temps réel (RTK) ou différé (DGSS).

La correction différentielle est une technique utilisée pour améliorer la précision de géolocalisation. Elle consiste en l'obtention en temps réel d'un signal de correction spécifique pour rectifier les déviations de position XYZ causées par les couches atmosphériques (Lahaye et Ladet, 2014b). La cinématique temps réel (Real Time Kinematic ou RTK en anglais) en est une forme spécifique qui utilise des informations sur les différences de phase des signaux GPS, GLONASS ou Galileo entre autres pour fournir des corrections en temps réel à l'aide d'une station de référence au sol. Cette utilisation de la correction différentielle permet d'atteindre une précision de géolocalisation de l'ordre du centimètre pour l'utilisateur.

La technologie RTK est conçue pour des applications telles que la surveillance, la mesure et le guidage de précision. La station de base est située à un emplacement connu et fonctionne comme point de référence pour les récepteurs mobiles. Ceux-ci peuvent alors fournir des positionnements précis en mesurant leur position relative à ce point de référence. La qualité des résultats dépend de la densité et des capacités du réseau de stations de référence, qui doit être accessible et proche du lieu de collecte. Cependant, l'utilisation de RTK nécessite du matériel coûteux, généralement propriétaire, ainsi que des abonnements à un service de diffusion de correction pour chaque machine connectée.

Les objectifs du projet CentipedeRTK sont (1) de développer une chaîne de traitement innovante reposant sur des logiciels et des composants matériels en libre accès pour créer des solutions fiables, légères, peu coûteuses et faciles d'utilisation et (2) d'offrir une couverture complète du territoire (en commençant par la France métropolitaine). Cet article présente CentipedeRTK en tant que réseau collaboratif

de bases GNSS ouvertes et disponibles pour toute personne se trouvant dans la zone de couverture du système. Un effort important a été fourni pour partager en ligne un ensemble de ressources documentaires (mode opératoire, code source, tutoriels), tout en répondant à l'enjeu de FAIRisation des objets de la Recherche (<https://doi.org/10.5281/zenodo.5814772>). Depuis son déploiement en France en 2019, le réseau s'est considérablement étendu avec plus de 400 stations opérationnelles et une variété de domaines d'application, notamment dans le secteur public (17%) et privé (66%), en particulier du monde agricole.

2. Description du réseau et de ses différents segments

L'origine du nom et du logo du réseau CentipedeRTK provient du nom des mille-pattes, une classe d'arthropodes appelée chilopodes ou centipèdes (Fig. 1a). Cette désignation s'inspire de la pratique courante dans le monde de l'open-source de choisir des logos basés sur des animaux. L'analogie entre un mille-pattes et CentipedeRTK peut être établie ainsi : tout comme les nombreuses pattes d'un mille-pattes coopèrent pour atteindre un objectif commun, CentipedeRTK utilise plusieurs stations de références GNSS pour augmenter sa disponibilité par rapport à ce qui serait possible avec une seule référence.

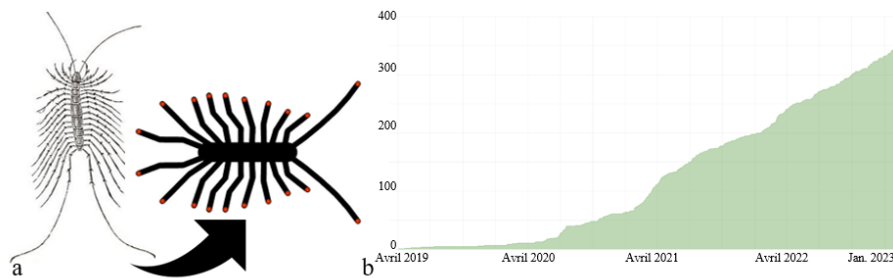


FIGURE 1. Logo CentipedeRTK (a) et évolution des contributeurs au réseau (b).

En outre, les pattes d'un mille-pattes peuvent s'adapter à différents terrains et obstacles, tout comme CentipedeRTK peut s'ajuster à différentes conditions environnementales pour maintenir une précision de positionnement maximale. Enfin, la coopération entre les pattes d'un mille-pattes assure une mobilité rapide et efficace, de même CentipedeRTK assure une fiabilité grâce à son réseau de contributeur : de 2 à 350 stations de référence installées en 4 ans (Fig. 1b).

CentipedeRTK, déployé à partir de 2019, peut être utilisé avec des composants matériels (récepteurs et/ antennes) spécifiquement conçus pour les besoins d'utilisation ou des composants matériels propriétaires. Il vise à éliminer les obstacles financiers au déploiement du GNSS RTK pour un grand nombre d'utilisateurs finaux, sans dépendre de systèmes propriétaires ou de l'abonnement à

un réseau de bases GNSS (Real Time Network - RTN). Il s'appuie sur des moyens mutualisés entre des agriculteurs, des instituts de recherche, des organismes publics et des entreprises privées pour l'installation de stations de référence. INRAE (en particulier l'équipe projet du CATI GEDEOP¹) assure la maintenance du serveur central CentipedeRTK, une partie de la production de la documentation et la formation des utilisateurs. La force de ce projet réside dans le fait que chacun peut devenir acteur du réseau en contribuant à l'installation autofinancée d'une station de référence grâce au projet RTKbase² ou en participant à la mise à jour de la documentation et à l'assistance aux utilisateurs. L'obtention d'une géolocalisation haute précision nécessite une combinaison de plusieurs composants ou segments dans le système. (Fig. 2) :

- une base GNSS de référence, fixe (Fig. 2.1);
- un rover GNSS, mobile (Fig. 2.2);
- un caster (Fig. 2.3), système de centralisation/diffusion des différentes corrections disponibles et de communication entre une base et un rover *via* le protocole NTRIP (Network Transport of RTCM *via* Internet Protocol).

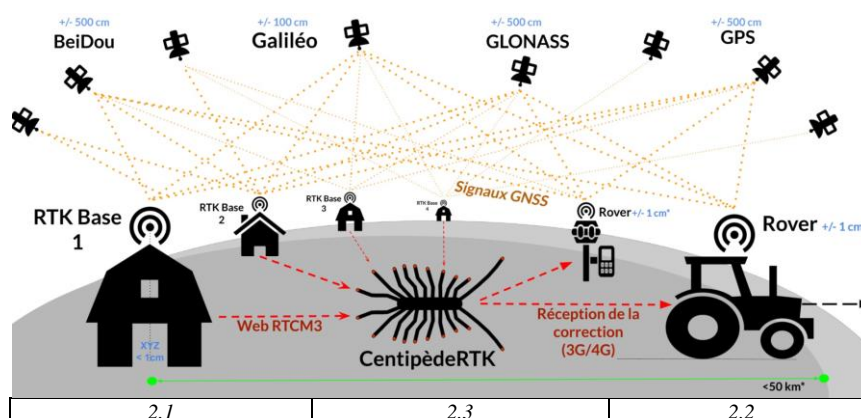


FIGURE 2. CentipedeRTK en 3 segments : 2.1 base ; 2.2 rover et 2.3 caster.

2.1. Le segment « base RTK »

Pour obtenir une géolocalisation de haute précision, il est nécessaire d'installer (ou d'utiliser) une base au sol que l'on fabrique simplement grâce au projet RTKbase. La position de l'antenne est connue avec une grande précision en trois dimensions (coordonnées X, Y et Z). Le calcul de cette position est réalisé par post-

¹ Cati Gedeop : Centre Automatisé de traitement de l'Information « GEstion des Données d'Expérimentations, d'Observations et de Pratiques sur les agro-socio-éco-systèmes », réseau d'informaticiens Inrae : <https://gedeop.cati.inrae.fr/>

² <https://github.com/Stefal/rtkbase>

traitement des données des satellites observables sur 24 heures et est effectué par rapport aux antennes de référence du réseau GNSS permanent de l'IGN³ en France, et par le service en ligne NRCAN qui utilise la méthode PPP (Precise Point Positioning) pour le reste du monde⁴. Une fois cette position définie, la station de base reçoit en continu les signaux des différentes constellations de satellites de positionnement et génère des trames de correction entre sa position réelle et sa position calculée pour chaque satellite. Le résultat obtenu est un flux de données RTCM⁵ (Radio Technical Commission for Maritime Services), qui est utilisé par tout autre récepteur GNSS se déplaçant à proximité de la base, appelé « rover », pour corriger sa position.

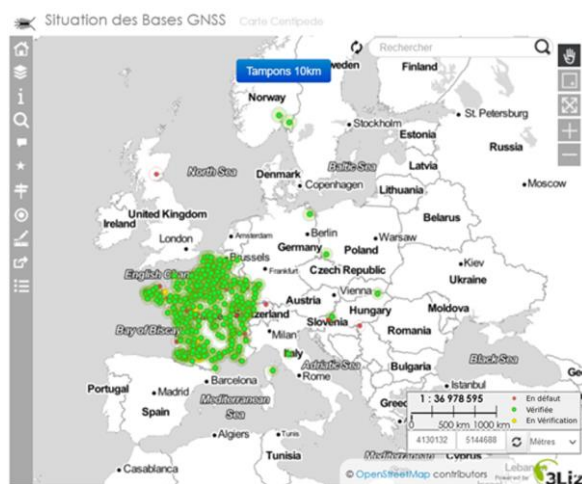
Selon les recommandations de CentipedeRTK, l'antenne de la station de référence devra être installée sur un support stable avec une vue dégagée vers le ciel (Fig. 3a), sans obstruer la vue en dessous de 10 degrés par rapport à l'antenne. Depuis 5 ans de mise en œuvre de CentipedeRTK, ce sont plus de 400 bases déployées en Europe avec la majorité sur le territoire français (Fig. 3b). Il est donc possible pour un nouvel utilisateur de CentipedeRTK d'utiliser une base existante active en recherchant celle la plus proche de sa zone d'étude *via* la consultation de la carte web des bases (Fig. 3c).



a



c



b

Lien à la carte consultable en ligne:

<https://centipede.fr/index.php/view/map/?repository=cent&project=centipede>

³ <https://rgp.ign.fr/STATIONS/antennes.php>

⁴ pour le Canada : Le service Positionnement ponctuel précis du Système canadien de référence spatiale (SCRS-PPP) a été lancé en 2003. Il permet aux utilisateurs de systèmes mondiaux de navigation par satellite (GNSS) de recueillir des données sur le terrain et de téléverser ces données dans des serveurs de Ressources naturelles Canada (RNC) https://webapp.csrscs-scrcs.nrcan-rncan.gc.ca/geod/tools-outils/sample_doc_filesV3/NRCan%20SCRS-PPP-v3_Tutorial%20FR.pdf

⁵ https://en.wikipedia.org/wiki/RTCM_SC-1041.

FIGURE 3. Schéma de montage d'une base CentipedeRTK (a) et carte web de localisation des bases RTK en Europe à la date du 25/01/2023, symbolisées en fonction de leur état de fonctionnement rouge, vert, orange (b) et identification et calcul de proximité des bases voisines du siège Inrae à Castanet avec les tampons concentriques de rayons à tous les 10km (c).

2.2. Le segment « rover »

Un rover RTK, appareil électronique mobile consacré à une variété d'utilisations GNSS, doit être facile à configurer pour l'utilisateur de terrain (Fig. 4a). Ce rover peut équiper un arpenteur, un tracteur ou un drone volant et permettre de le localiser avec une précision centimétrique ou proche du centimètre grâce aux trames de correction envoyées par la station de référence choisie et *via* l'algorithme présent dans la puce GNSS RTK. Il est important de noter que plus la distance à la base RTK choisie est grande, plus la précision sera affectée. On estime que l'on ajoute 1 mm d'incertitude en planimétrie pour chaque kilomètre supplémentaire dans l'éloignement de la base RTK. Il est possible de construire soi-même son propre « rover » RTK. La documentation en ligne fournit les instructions étape par étape pour le faire⁶. Par exemple, ce rover peut être composé d'une antenne GNSS mobile montée sur une canne d'arpentage, connectée à un module GNSS alimenté par une batterie et relié à une puce Bluetooth. Il est ensuite possible de connecter un smartphone et une application NTRIP Client au rover *via* Bluetooth pour traiter les trames de correction de la base la plus proche et récupérer la position géographique corrigée. Ainsi, toutes les applications utilisant la géolocalisation sur le smartphone bénéficieront d'une précision de localisation proche du centimètre. Il existe également des rovers RTK prêts à l'emploi et disponibles à un coût raisonnable (Fig. 4b).



FIGURE 4. Différents types de rover en fonction des cas d'utilisations (a) et rover Sparkfun équipant une canne (b).

⁶ https://docs.centipede.fr/docs/make_rover/

CentipedeRTK propose également, *via* sa carte en ligne des positionnements des bases du réseau, d'aider l'utilisateur à se localiser et à identifier la ou les bases les plus proches en utilisant l'outil « Tampons 10km ». Ce dernier trace à l'écran des cercles concentriques de rayon 10 km centrés sur la position de l'utilisateur (Fig. 3c). Il est à noter que certains clients NTRIP disposent également de la recherche de la station de référence la plus proche en fonction de sa position.

2.3. Le segment « caster »

Le système CentipedeRTK est conçu pour la diffusion en temps réel de corrections GNSS différentielles. Cette diffusion se fait par l'intermédiaire d'un serveur central appelé NTRIP Caster, qui utilise le protocole NTRIP pour diffuser les trames RTCM des stations de référence sur Internet *via* des réseaux cellulaires 3G ou 4G.

L'architecture logicielle de CentipedeRTK est basée sur des logiciels open source tels que BKG Caster, PostgreSQL/PostGIS, Lizmap et Grafana. BKG Caster est un serveur de diffusion de données RTK qui permet de transmettre en temps réel les corrections GNSS différentielles *via* Internet, jouant le rôle de passerelle entre les bases et les rovers. PostgreSQL/PostGIS est une plateforme de gestion de bases de données spatiales qui enregistre les informations des stations GNSS de références, mises à jour en continu. Lizmap est un outil de cartographie open source qui permet de visualiser les données géographiques et les métadonnées des stations, tandis que Grafana aide à comprendre graphiquement les performances et la qualité des données diffusées par les stations RTK. Ces différents logiciels open source permettent d'assurer la reproductibilité du projet, de gérer l'ensemble des données géographiques et de visualiser les performances du réseau CentipedeRTK. Ensemble, ils forment une architecture efficace pour la diffusion optimale des données RTK *via* Internet en connectant les stations RTK de manière cohérente.

L'infrastructure de CentipedeRTK est gérée par une équipe composée d'une dizaine d'administrateurs privés et publics. La communauté d'utilisateurs peut accéder à une documentation complète, ainsi qu'un forum et un fil de discussion sur Telegram regroupant actuellement 670 membres⁷. Les utilisateurs peuvent ainsi bénéficier de l'aide de la communauté et participer aux débats sur les développements futurs.

3. Résultats au travers de quelques cas d'utilisation

3.1. L'autoguidage d'un tracteur pour une agriculture de précision

CentipedeRTK a été largement adopté pour l'agriculture de précision en France, avec de nombreux agriculteurs ayant installés des bases RTK (65 % du réseau) chez eux afin de gagner en autonomie tout en réduisant leur budget dédié à la

⁷ https://t.me/Centipede_RTK

géolocalisation. Les agriculteurs ainsi que les conseillers en agriculture (coopératives, chambres d'agriculture) considèrent que le CentipedeRTK a deux avantages clés par rapport aux corrections satellitaires standards telles que EGNOS ou RTX de Trimble : une précision extrême de 1 à 2 cm à l'antenne, idéale pour les travaux les plus exigeants en combinaison avec un autoguidage, et une meilleure répétabilité de la position, permettant de revenir exactement au même endroit même après plusieurs mois d'intervalle (par exemple pour les semis et le binage)⁸.

La chambre d'agriculture de la Somme⁹ a par exemple installé en juin 2020 quatre bases de référence (Amiens, Abbeville, Villers Bocage et Estrées Mons) qui couvrent ce département. En 2021, elle a publié un rapport technique, accessible en ligne, sur l'évaluation de la qualité du RTK libre Centipede comparée au signal RTK du commerce Orphéon. La qualité du signal RTK a été définie par trois composantes: la précision, la répétabilité et la stabilité (Dupont, 2021) et l'autrice conclut en 2020 « Centipede est un signal RTK libre (accessible gratuitement) équivalent à un signal RTK du commerce comme Orphéon, leader du marché de corrections RTK, en terme de précision et répétabilité. La position donnée est à +/- 2cm de la position d'un RTK de référence (Orphéon) jusqu'à 20km autour de la base. Jusqu'à 30km on a une différence de +/- 3cm entre Orphéon et Centipede (...). La répétabilité d'Orphéon est d'en moyenne +/-5cm d'un mois sur l'autre et celle de Centipede (sur les bases situées à moins de 30km) en moyenne de +/-5.2cm soit équivalente à celle d'Orphéon. Les bases Centipede présentent également une bonne stabilité de connexion, les coupures sont rares et courtes. Les résultats sur la qualité du signal Centipede sont très encourageants ».

3.2. Une Balise Open Source pour le monitoring des océans : le cas du projet de recherche Physalia (UMR LIENSs¹⁰ CNRS La Rochelle et UE SLP Inrae, Saint-Laurent de la Préé)

La surveillance du niveau de la mer et des marais est un enjeu majeur dans la compréhension des dynamiques côtières et hydrologiques. Plusieurs études ont montré l'efficacité des bouées GNSS appliquées à la mesure du niveau de la mer. Toutefois, leur usage est généralement limité par le coût élevé d'un tel dispositif.

Trois prototypes de bouées GNSS-RTK ont été développés pour répondre à des problématiques liées à la surveillance temps réel des variations du niveau de la mer et des marais littoraux. La réalisation des bouées avec des composants semblables aux bases CentipedeRTK permet une réduction importante des coûts et s'élève à près de 600€ pièce (contre 8000€ pour un modèle propriétaire). Les bouées ont été construites autour d'une structure centrale imprimée en 3D et sont équipées de trois flotteurs montés sur des bras en acier inoxydable (Fig. 5a.). La réception des signaux

⁸ <https://centre-valdeloire.chambres-agriculture.fr/produire-innover/machinisme/dossier-technique-machinisme/le-rtk-centipede/> et multitudes de vidéos You Tube comme celle-ci: <https://www.youtube.com/watch?v=WhL2JaARfVk>

⁹ <https://hautsdefrance.chambre-agriculture.fr/chambre-agriculture-somme/>

¹⁰ <https://lienss.univ-larochelle.fr/> et <https://physalia.centipede.fr/>

GNSS est assurée par un récepteur bi-fréquences Ublox-F9P, utilisable avec les principales constellations GPS, GLONASS, Galileo et Beidou. Les corrections RTK sont obtenues par le réseau de bases CentipedeRTK, et traitées en temps réel par un processeur Raspberry-Pi. La liaison est assurée par un module 4G et deux antennes externes

Des essais réalisés sur l'île d'Aix (France) ont permis d'évaluer la précision des bouées en comparant les données obtenues avec celles d'un marégraphe radar. La comparaison est réalisée avec les données corrigées en temps réel et celles corrigées en post-traitement. Les résultats altimétriques obtenus montrent une erreur quadratique moyenne (RMSE) comprise entre 1,93 et 3,03cm validant ainsi l'utilisation des bouées GNSS-RTK low-cost pour un usage marégraphique (Pira *et al.*, 2022).

En 2022, deux nouvelles missions ont été menées pour estimer les pentes du géoïde terrestre pour la validation des missions de mesures altimétriques. Cette expérience a validé la méthodologie et la précision des bouées GNSS Physalia tout en offrant des résultats probants dans le domaine de la géophysique (Tranchant *et al.*, 2023 ; Fig. 5b.)

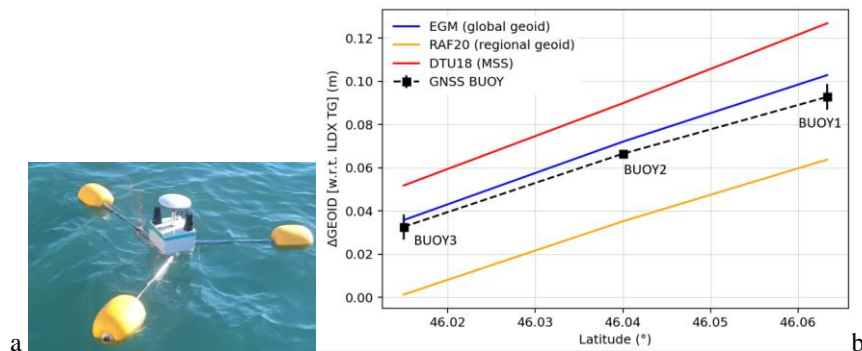


FIGURE 5. Bouée Physalia (a) et levés GNSS pour la cartographie du géoïde dans une mer macrotidale impliquant un USV marin, des bouées et modélisation hydrodynamique. EGM et DTU18 sont des modèles de géoïde global d'emprise mondiale alors que RAF20 est régional avec un pixel d'1km². Les bouées BUOY ont été placées à 3km les unes des autres validant la mesure haute précision de la pente de géoïde. (b) (Pertuis Charentais, France).

3.3. Localiser précisément les cavités basses des arbres pour y étudier la biodiversité hébergée : cas du projet de recherche BloBiForM (UMR Dynafor, INRAE)

La géolocalisation précise d'arbres en peuplement forestier est une demande récurrente en sciences forestières. Le projet BloBiForM débuté en 2020 vise à développer une palette d'outils pour évaluer les effets des choix d'aménagement d'un massif forestier sur la biodiversité. Il s'intéresse aux organismes inféodés aux

"dendro-microhabitats", des structures singulières des arbres telles que les cavités de tronc (Larrieu *et al.*, 2019 ; Fig. 6). Suivre et gérer la distribution spatiale des dendro-microhabitats à l'échelle du massif pourrait permettre de comprendre l'effet fort sur la biodiversité des espèces associées, et constituer un levier pour atteindre des objectifs de conservation. Cette hypothèse ne peut être testée qu'à l'aide d'analyses de grands jeux de données spatialisées à échelle fine.

Le recueil de telles données spatialisées est chronophage, et donc coûteux, quand il est mis en œuvre avec des moyens optiques : par exemple avec un théodolite ou en utilisant simultanément une station totale avec une boussole et un télémètre. Il est difficile d'intégrer de telles mesures dans un plan d'échantillonnage avec un grand nombre de placettes. De plus, ces moyens optiques fournissent une localisation relative à un point de référence dont il n'est pas aisé, en contexte forestier, de connaître la position exacte. Ils ne permettent pas non plus d'estimer la précision de la localisation.

L'enjeu est donc de géolocaliser des arbres au sein d'un peuplement forestier en disposant d'un système de positionnement des arbres plus rapide et préservant néanmoins des erreurs-types idéalement de l'ordre ou inférieures au mètre. Le système de positionnement par satellites (GNSS) apporte des réponses potentielles à ce besoin. Cependant le couvert forestier nuit fortement à la précision de la géolocalisation et ne permet pas en général d'obtenir une précision inférieure à une dizaine de mètres avec un système de positionnement par satellites conventionnel (Gaudin *et al.*, 2006 ; Lahaye et Ladet, 2014b). Nous avons donc utilisé la solution CentipedeRTK pour géolocaliser précisément ces arbres. Nous avons également montré que cette solution montre une performance au moins égale sinon supérieure à une solution standard sous licence propriétaire (Fig. 6).

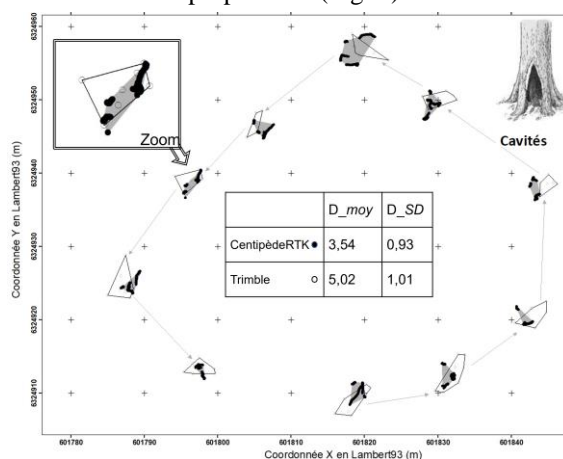


FIGURE 6. Visualisation des données de position d'arbres par le Trimble Geo 7x (cercle blanc) et par CentipedeRTK (cercle noir). Chaque amas de points correspond à un arbre, collectés lors de passages successifs le long du parcours. Les enveloppes englobantes des 2 nuages de points par arbre ont été obtenues par SIG (en noir sur les acquisitions CentipedeRTK et en blanc sur celles du Trimble). Les caractéristiques géométriques des enveloppes ont été calculées à savoir la

distance la plus longue entre deux sommets de l'enveloppe convexe notée D (moyenne et écart-type en mètres) pour caractériser la dispersion des points (Forêt de Grésigne, France).

4. Discussion et perspectives

Nous avons souhaité présenter dans cet article de manière synthétique l'intérêt du réseau CentipedeRTK (Fig. 7) et les détails matériels de son fonctionnement, et de montrer un éventail d'applications pour lesquelles ce réseau a fourni des performances satisfaisantes, en comparaison un système de positionnement par satellite (GNSS) conventionnel ou un système propriétaire avec correction différentielle temps réel (RTK) ou différé (DGSS).

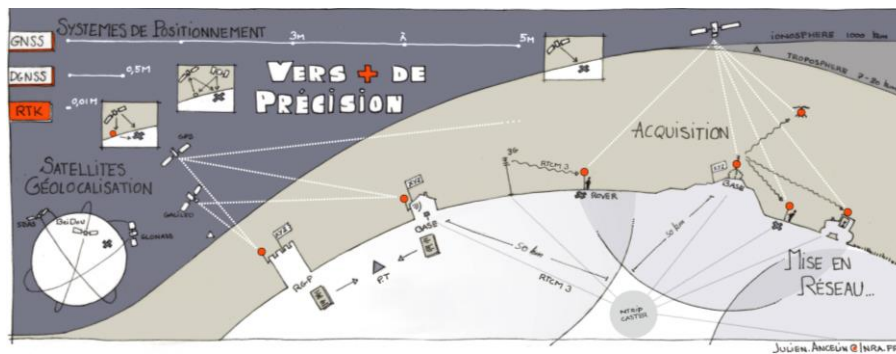


FIGURE 7. Fonctionnement du système de positionnement par satellite et comparaison des précisions de mesure entre GNSS, DGSS et RTK (famille à laquelle Centipede appartient).

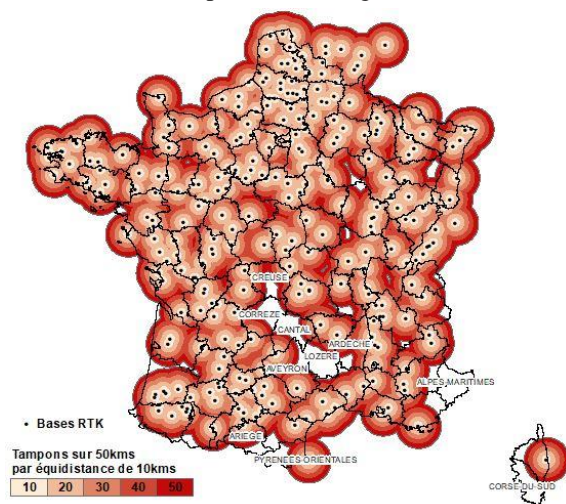
En complément nous avons produit une analyse spatiale de la couverture en France métropolitaine des bases existantes du réseau CentipedeRTK début 2023, en considérant deux tampons, celui à 30 kilomètres (signal peu dégradé du fait du rayon court) et celui à 50 kilomètres (signal éligible sur rayon maximal de réception) pour mieux évaluer le taux de couverture des départements français hors DROM-COM (départements et régions d'outre-mer et collectivités d'outre-mer) (Fig. 8). Depuis le réseau s'est déployé aussi dans l'Océan Indien et s'est densifié en France avec de nouvelles antennes récemment installées.

Ceci nous a permis :

- de repérer les départements français avec un faible taux de couverture en bases RTK (inférieur à 20% de la surface du département) comme les Alpes-Maritimes, la Corse du Sud où l'effort d'installation de nouvelles bases pourra être intensifié à court terme ;

– de repérer les départements français presque intégralement couverts par les bases existantes (supérieur à 80% de la surface du département) si l'on veut plutôt achever la couverture intégrale des départements ;

– d'identifier les départements français intégralement couverts par les bases existantes (100% de la surface du département) (Fig. 8).



Nombre de départements	taux_couverture<20%	taux_couverture>80%	taux_couverture=100%
tampon30kms	6	6	34
tampon50kms	2	35	52

FIGURE 8. Carte de la couverture France (hors Drom-Com) en bases RTK jusqu'à 50 kilomètres (d'après les positions des 303 bases actives le 30/01/2023 : <http://caster.centipede.fr:2101/>)

Selon nous, vu ce taux de couverture actuel en constante progression, CentipedeRTK peut ainsi être vu en tant que géocommun. Nous proposons ici l'idée de considérer CentipedeRTK comme un bien commun, en raison de son caractère fondamentalement coproduit. Les géocommuns sont des ressources produites collectivement par une communauté d'acteurs hétérogènes, tels que des secteurs publics et privés, des clients et fournisseurs, des individus et des organisations, aussi bien partenaires que concurrents. En moins de 5 ans, CentipedeRTK a rassemblé une communauté dédiée à l'amélioration du géopositionnement dont la mise en œuvre technique a été entièrement collaborative. La gouvernance de la communauté, un aspect fondamental des géocommuns, est claire et transparente, et elle inclut des règles inclusives de gouvernance et d'utilisation, ainsi que des chartes, des licences ouvertes et des accords de contribution. Ses caractéristiques sont bien celles discutées et listées collectivement en mai 2022¹¹, à savoir bien définir le périmètre du géocommun, ses règles de contribution et ses règles d'utilisation. CentipedeRTK

¹¹ <https://forum.geocommuns.fr/t/une-definition-partagee-dun-geo-commun/57/>

a d'ailleurs depuis peu un forum dédié sur la plateforme des géocommuns : <https://forum.geocommuns.fr/t/a-propos-de-la-categorie-rtk-centipede/544>

Les perspectives stratégiques de CentipedeRTK incluent l'optimisation de la performance technique autant que l'expansion de la communauté de contributeurs et d'utilisateurs. Elle vise également la mise en place de mécanismes de contrôle de qualité plus rigoureux, la promotion de technologies ouvertes reposant sur des logiciels et des composants matériels en libre accès, ainsi que le partage du savoir et la vulgarisation auprès des utilisateurs. Les objectifs clés sont la robustesse et la résilience du système, l'internationalisation, l'essaimage de collectifs de contributeurs et d'utilisateurs. Il s'agit également de renforcer le contrôle qualité et la supervision pour garantir une qualité de service optimale et la fiabilité des informations produites. Enfin, les développeurs de CentipedeRTK veillent, au travers d'une grande panoplie de supports de communication, à faciliter et accompagner l'utilisation de ces technologies complexes pour offrir des solutions accessibles à tous.

Remerciements

Nous remercions l'ensemble des collaborateurs et contributeurs pour leur engagement au profit de l'amélioration du réseau CentipedeRTK. Grâce à leur dévouement, le système a atteint des niveaux inespérés de performance et de fiabilité. Leur contribution a permis de démocratiser l'accès à la géolocalisation centimétrique, tout en renforçant la capacité du réseau à fournir des solutions GNSS fiables, pour une multitude d'applications scientifiques et industrielles. Nous souhaitons aussi remercier ici certains de nos soutiens financiers qui se sont mobilisés pour nous permettre d'aller présenter ce travail à la conférence francophone SAGEO édition 2023 à Québec : à INRAE, nos unités de recherche SLP et Dynafor, la direction pour la Science Ouverte DIPSO, le département de recherche Ecologie et biodiversité des milieux forestiers, prairiaux et aquatiques ECODIV.

Bibliographie

- Bosser P. (2012). *GNSS : Systèmes globaux de positionnement par satellite*, Support de cours en ligne, Bibliothèque de ressources pédagogiques de l'ENSG, École Nationale des Sciences Géographiques <http://cours-fad-public.ensg.eu/course/view.php?id=69>
- Bosser P. (2014), RTKlib, est une librairie open-source proposant un ensemble de programmes pour le positionnement standard et précis par GNSS, École Nationale des Sciences Géographiques, <http://cours-fad-public.ensg.eu/course/view.php?id=85#section-1>
- Dupont A. (2021) Evaluation de la qualité du RTK libre Centipede. Rapport de la Chambre d'agriculture de la Somme, Rapport Casdar : https://hautsdefrance.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/Hauts-de-France/171_Inst-Hauts-de-France/10-Actualites/2021/Rapport_qualite_Centipede_CA80.pdf

- Duquenne F., Botton S., Peyret F., Bétaille D., Willis P. (2005). *GPS. Localisation et navigation par satellites*, éd. Hermès, Paris.
- Gaudin S., Pont S., Gantillon M. (2006) Le GPS : un outil efficace pour se diriger en forêt. *Revue forestière française*, 58 (2), pp.141-154. <https://hal.science/hal-03449284>
- Lahaye R., Ladet S. (2014)a. Les principes du positionnement par satellite : GNSS. *Les Cahiers des Techniques de l'INRA*, p. 9-18. <https://www6.inrae.fr/novae/Les-articles-parus/Les-n-Speciaux/GPS-SIG/chap1-ns-GPS-SIG-2014/Art01-ns-GPS-SIG-2014>
- Lahaye R., Ladet S. (2014)b. Les réseaux de correction différentielle. *Les Cahiers des Techniques de l'INRA*, p. 36-43. <https://www6.inrae.fr/novae/Les-articles-parus/Les-n-Speciaux/GPS-SIG/chap1-ns-GPS-SIG-2014/Art04-ns-GPS-SIG-2014>
- Larrieu L., Gosselin F., Archaux F., Chevalier R., Corriol G., Dauffy-Richard E., Deconchat M., Gosselin M., Ladet S., Savoie J. M., Tillon L., Bouget C. (2019). Assessing the potential of routine stand variables from multi-taxon data as habitat surrogates in European temperate forests. *Ecological Indicators* 104:116-26. doi: 10.1016/j.ecolind.2019.04.085.
- Pira A., Ancelin J., Coulombier T., Dausse D., Ballu V., Testut L., Mzali L., Gaugue A. (2022) Physalia : Plateforme HYdrographique pour la Surveillance Altimétrique du Littoral. *Lettre d'information Résif*, pp.13-14. <https://hal.inrae.fr/hal-03508116v2>
- Tranchant Y.T., Ballu V., Testut L., Ancelin J., Coulombier T., Dausse D., Kerebel V., Chupin C. (2023) GNSS Survey for Geoid Mapping in a Macrotidal Sea Involving Marine USV, Buoy and Hydrodynamic Modeling (Pertuis Charentais, France) 13th Coastal Altimetry Workshop, Coastal Altimetry Training, 6-10 February 2023, Universidad de Cádiz, Spain.