



JOURNAL OF INTERDISCIPLINARY METHODOLOGIES AND ISSUES IN SCIENCE

CentipedeRTK, un réseau pour la géolocalisation haute précision au service de l'environnement

Julien ANCELIN¹, Sylvie LADET^{*2}, Wilfried HEINTZ²

¹ INRAE, UE 0057 DSLP

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

² INRAE, Université de Toulouse, UMR 1201 DYNAFOR
Castanet-Tolosan, France

*Correspondance : Sylvie.Ladet@inrae.fr

DOI : [10.46298/jimis.14252](https://doi.org/10.46298/jimis.14252)

Soumis le 13 septembre 2024 – Accepté le 12 décembre 2024

Volume : 12 – Année : 2024

Titre du numéro : **Sciences de l'information géographique & mesures environnementales**

Éditeurs : *Thierry Badard (Université Laval, Québec), Jacynthe Pouliot (Université Laval, Québec),
Matthieu Noucher (CNRS, Bordeaux), Marlène Villanova (Université Alpes Grenoble).*

Résumé

Le positionnement RTK ou Cinématique Temps réel est une technologie éprouvée qui permet d'améliorer le positionnement fourni par un récepteur mobile GNSS, en se basant sur un réseau de récepteurs à antenne, fixes, servant de référence, positionnés précisément sur le territoire. Bien que très efficace, cette solution reste encore très coûteuse et n'est donc pas à la portée de tous les utilisateurs. L'émergence des produits électroniques *low-cost* a permis au réseau CentipedeRTK de voir le jour. Celui-ci se base sur l'ouverture et le partage d'une méthodologie de construction d'antennes RTK mises en réseau pour un usage libre et collaboratif, quelle que soit la finalité de son utilisation. Depuis son démarrage en 2019, le réseau ne cesse de croître et ses usages se multiplient dans différents domaines, allant de la recherche forestière jusqu'au suivi des mesures environnementales.

Mots-clés

CentipedeRTK ; GNSS ; géolocalisation ; collaboratif ; participatif ; RTK ; précision ; mesures environnementales ; géocommuns.

1 INTRODUCTION

Les sciences de l'information géographique (SIG en français et GIScience en anglais ; Goodchild 1992) peuvent être définies comme la branche des sciences de l'information qui traite du domaine géographique, ou comme l'ensemble des questions scientifiques fondamentales soulevées par l'information géographique et les technologies qui la collectent, la manipulent et la communiquent. L'information géographique peut aider à mettre en évidence des modèles intéressants qui, dans certains cas, indiquent des mécanismes de causalité (Goodchild, 2011). De ce fait, cet objectif comporte plusieurs enjeux méthodologiques à relever tout au long du cycle de vie de la donnée géographique centrale ici : de la collecte en passant par les techniques de spatialisation, de modélisation et simulation, jusqu'aux étapes d'analyse, visualisation et communication des résultats. Cela nécessite une attention particulière à chaque étape du processus. Dans cet article nous nous concentrons prioritairement sur la première étape à savoir la collecte de données de qualité. Ces données peuvent être acquises par divers capteurs, comme des récepteurs GNSS, des stations totales, des caméras couleurs ou multispectrales, ou thermiques, etc., des scanners LiDAR, SONAR multifaisceaux embarqués sur des plateformes terrestres, marines, aériennes et satellitaires. Chaque source peut avoir des spécifications matérielles qui jouent sur les résolutions spatiales et temporelles différentes des données observées. De plus, la qualité des données est importante à considérer. Des erreurs de mesure grossières, systématiques et accidentelles peuvent affecter la fiabilité des données et celles des cartes produites qui en sont issues.

Dans notre cas, la spatialisation des mesures environnementales est une démarche essentielle pour comprendre la distribution géographique des phénomènes environnementaux et pour prendre des décisions rapides et éclairées en matière de gestion des ressources naturelles. Ces mesures environnementales reposent entre autres sur l'acquisition et l'utilisation de données géographiques dites territoriales de qualité, de plus en plus précises. Les données territoriales renvoient ici à des données numériques produites et/ou utilisées dans le cadre de processus de gestion et de planification des territoires (Mericskay, 2021).

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 satellites utilise la trilatération, où la position de l'objet est déterminée à partir des signaux reçus par le récepteur GNSS d'au moins quatre satellites. 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 méthodologie utilisée, allant de quelques dizaines de mètres avec une méthode de positionnement par satellite (GNSS) absolue conventionnelle (Bossier, 2012 ; Bossier, 2014 ; Duquenne *et al.*, 2005 ; Lahaye et Ladet, 2014a) à des résultats centimétriques avec une méthode post-traitée (PPGPS). 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 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. CentipedeRTK est le nom du réseau de géolocalisation haute précision, développé dans le cadre de travaux de recherche initiés en 2019 en France. Il est basé sur une chaîne de traitement innovante reposant sur des logiciels et des composants matériels en libre accès pour créer une solution fiable, légère, peu coûteuse et facile d'utilisation (Ancelin *et*

al., 2023). Après 5 ans de déploiement, le réseau offre une couverture quasi complète du territoire français et s'étend maintenant hors des frontières françaises.

Cet article présente d'abord une description du réseau et de ses différentes composantes. Puis il détaille les principaux avantages de CentipedeRTK pour la prise en compte des mesures environnementales ainsi que certaines limites.

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 (cf. Figure 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.

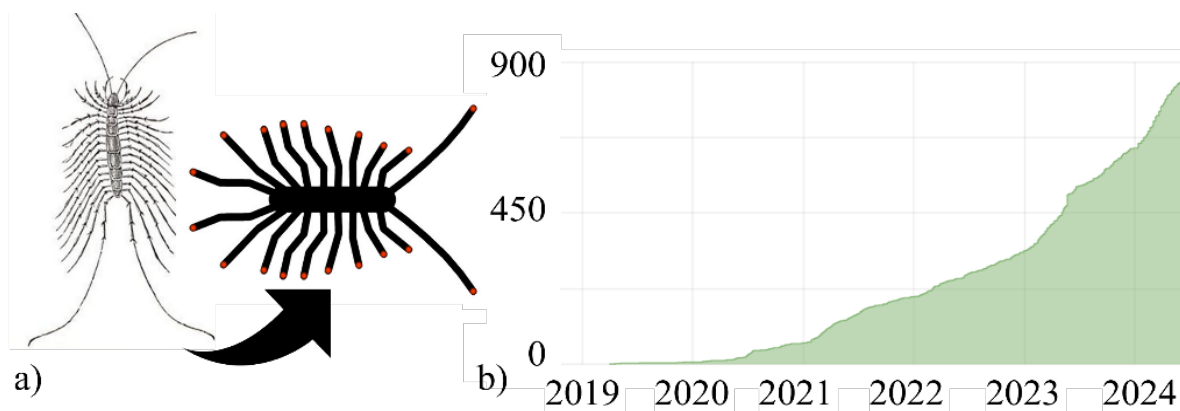


FIGURE 1 – Logo CentipedeRTK (a) et évolution des contributeurs au réseau en nombre de stations de bases installées (b).

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 contributeurs : 836 stations de référence installées en 5 ans dans 28 pays, dont 74 % en France (cf. Figure 1b et Tableau 1).

P	BEL	BEN	CAN	CHZ	DEU	DNK	ECU	ENG	FRA	HUN	IRL	ISR	ITA	MDG	MUS	NCL	NLD	NOR	POL	PYF	ROU	SEN	SER	SRB	SVK	SVN	UKR	ZAF	T
N	1	1	1	2	1	2	1	7	6	1	2	2	1	1	1	1	1	5	1	1	4	2	2	9	1	3	1	1	8
	4			0					5	6							1											3	
																												6	

TABLEAU 1 – N : nombre de bases CentipedeRTK installées. P : pays par ordre alphabétique ; T : total de 836 stations de base GNSS (source : <http://caster.centipede.fr:2101> au 09/12/2024).

CentipedeRTK, déployé à partir de 2019, peut être utilisé avec des composants matériels (récepteurs et/ou 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 (cf. Figure 2, Ancelin *et al.*, 2023) :

- une base GNSS de référence, fixe (cf. Figure 2.1) ;
- un rover GNSS, mobile (cf. Figure 2.2) ;
- un caster (cf. Figure 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).

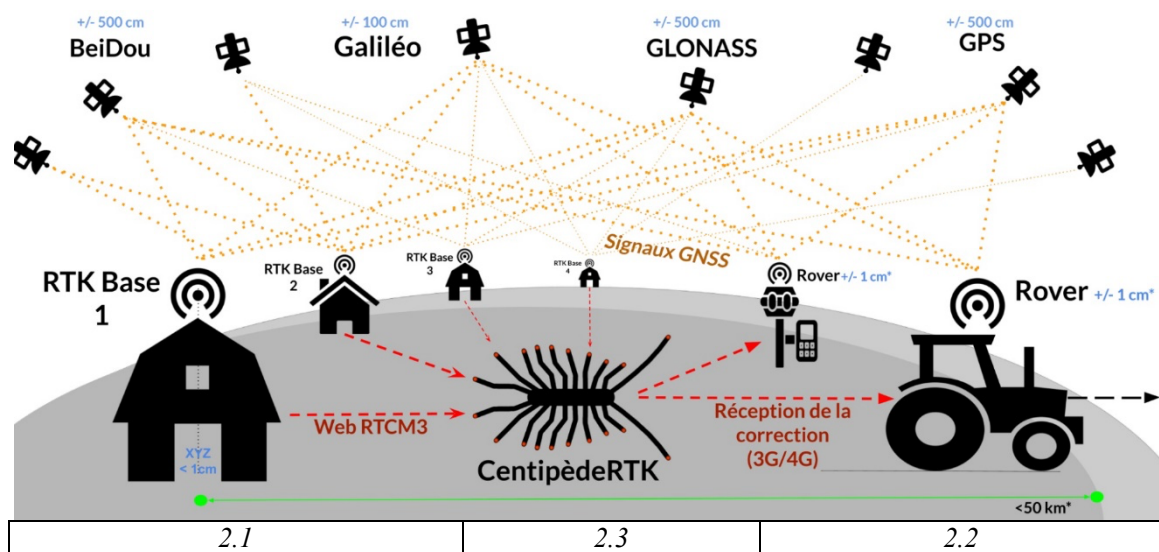


FIGURE 2 – CentipedeRTK en 3 segments : 2.1 base ; 2.2 rover et 2.3 caster.

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-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 RNCAN 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

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/>

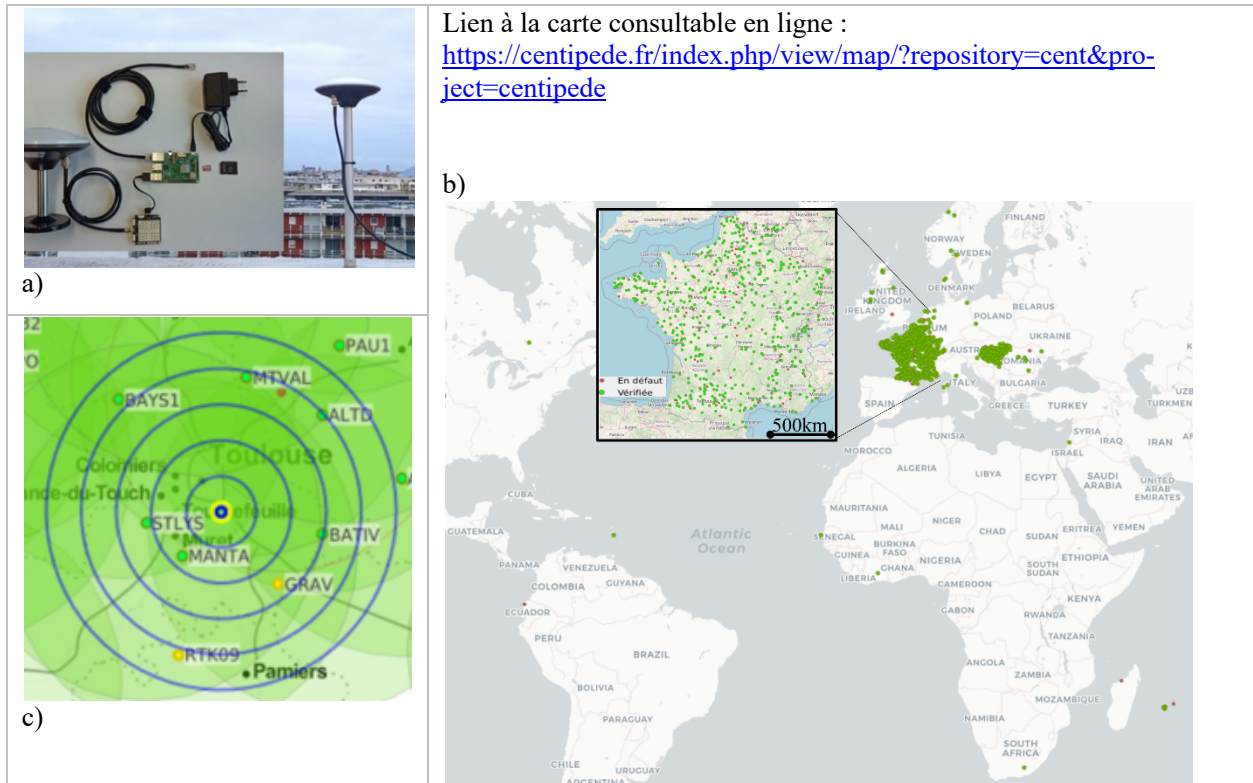
² <https://github.com/Stefal/rtkbase>

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 télécharger ces données dans des serveurs de Ressources naturelles Canada (RNCAN https://webapp.csrscs-rcan-rncan.gc.ca/geod/tools-outils/sample_doc_filesV3/NRCAN%20CSRS-PPP-v3_Tutorial%20FR.pdf)

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 (cf. Figure 3a), sans obstruer la vue en dessous de 10 degrés par rapport à l'antenne. Depuis 5 ans de mise en œuvre de CentipedeRTK, plus de 830 bases ont été déployées dans le monde, dont la majorité sur le territoire français (cf. Figure 3b). Il est donc possible pour un nouvel utilisateur de CentipedeRTK d'utiliser une base existante active en recherchant la plus proche de sa zone d'étude via la consultation de la carte web des bases (cf. Figure 3c).



Lien à la carte consultable en ligne : <https://centipede.fr/index.php/view/map/?repository=cent&project=centipede>

FIGURE 3 – Schéma de montage d'une base CentipedeRTK (a) et carte web de localisation des bases RTK dans le monde et encart de zoom sur les 615 en France à la date du 09/12/2024, symbolisées en fonction de leur état de fonctionnement rouge -non fonctionnel ou inactif, vert fonctionnel ou actif (b) et identification et calcul de proximité des bases voisines du siège Inrae à Castanet avec les tampons concentriques de rayons à tous les 10 km (c).

2.2 Le segment « rover »

Un rover RTK, appareil électronique mobile consacré à une grande variété d'utilisations GNSS, doit être facile à configurer sur différentes plateformes mobiles. (cf. Figure 4a). Ce rover peut équiper un arpenteur, un tracteur ou un drone et permettre de le localiser avec une précision centimétrique 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

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

d'incertitude en planimétrie pour chaque kilomètre supplémentaire en s'éloignant de la base RTK (Seepersad *et al.*, 2015).

Il est possible de construire son propre « rover » RTK soi-même. 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 (cf. Figure 4a). Ainsi, toutes les applications utilisant la géolocalisation sur le smartphone bénéficieront d'une précision de localisation centimétrique. Il existe également des rovers RTK prêts à l'emploi et disponibles à un coût raisonnable (cf. Figure 4b).



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

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 d'une fonction de recherche de la station de référence la plus proche en fonction de sa position.

2.3 Le segment « caster »

Par définition, le caster est un composant logiciel chargé de relayer des messages temps-réel au protocole NTRIP. Ces messages contiennent en général les mesures des stations, les éphémérides ou les corrections d'orbites et d'horloge. 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 un système de

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

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'à un forum et un fil de discussion sur Telegram regroupant actuellement 1071 membres. 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 DANS LE CHAMP D'ÉTUDES DES MESURES ENVIRONNEMENTALES

En améliorant l'offre d'accès, pour un plus grand nombre d'utilisateurs, à une précision centimétrique dans la géolocalisation des objets, CentipedeRTK contribue à notre sens à mieux capter, analyser, visualiser diverses composantes de notre milieu. Nous nous plaçons ainsi dans le cadre de la première loi de Tobler sur la géographie (Tobler, 1970) dans laquelle les phénomènes observés sur la surface de la Terre sont liés, mais les choses proches géographiquement sont plus liées que les choses éloignées : c'est la loi de l'autocorrélation spatiale (Goodchild, 2011).

La pluralisation des modalités (in situ ou à distance) et des vecteurs (aériens, terrestres, maritimes) embarquant la technologie CentipedeRTK et permettant ainsi de collecter de l'information environnementale de haute précision laisse entrevoir un renouvellement des méthodes de traitement et d'analyse dans des perspectives interdisciplinaires pour « faire parler » les données autrement. Nous revenons ici sur 3 exemples de résultats variés ayant mobilisé CentipedeRTK dans des études en recherche interdisciplinaire.

3.1 Surveillance de paramètres atmosphériques pour de meilleures prévisions météorologiques

Les prévisions des événements météorologiques extrêmes, comme les fortes précipitations constituent un véritable défi, surtout aux latitudes tempérées, qui incluent de vastes régions d'Amérique du Nord, d'Europe et d'Asie. L'objectif est de réaliser des mesures quantifiées du cycle de l'eau atmosphérique, fiables et précises. Utiliser le positionnement GNSS à haute précision est donc vu comme un outil de recherche essentiel. La partie humide des délais troposphériques GNSS peut alors servir d'intrant pour initialiser les modèles de prévision numérique du temps et ainsi faire de meilleures prévisions météorologiques.

Le signal GNSS mesuré par l'antenne d'une station est perturbé entre autres par la présence de vapeur d'eau dans l'atmosphère. Avec les outils d'analyse mis au point par Bosser *et al.* (2023), il est possible de déduire l'humidité atmosphérique à la verticale de l'antenne et de partager cette analyse en continu dans un délai suffisamment court pour alimenter les modèles de prévision météorologique (Bosser et Bock, 2021). Depuis juillet 2022, les données brutes GNSS acquises par les stations du réseau CentipedeRTK sont archivées par le centre de données du réseau scientifique national GNSS (RENAG ; <http://renag.resif.fr/fr/>). Bosser *et al.* en 2023 ont ainsi pu récupérer et analyser un jeu de données plus large comprenant les stations habituelles de trois réseaux GNSS de référence (RGP, RENAG, Orphéon) entourant 267 stations CentipedeRTK dans un rayon inférieur à 20 kilomètres et une différence de hauteur inférieure à 100 mètres (cf. Figure 5). Ils ont présenté une première évaluation de l'utilisation de ce jeu de données pour l'extraction du contenu intégré en vapeur d'eau noté IWV (Integrated Water Vapor) sur cinq mois en 2022. Les retards dans

la troposphère sont estimés à partir d'une analyse PPP (Precise Point Positioning, cf. page 4) et sont convertis en IWV à l'aide d'une procédure standard. Ensuite, les IWV sont comparées à celles obtenues pour les stations GNSS des réseaux GNSS permanents français conventionnels. Les résultats de ces comparaisons sont concluants, avec des différences quadratiques moyennes de l'ordre de 0,5 à 2 kg/m² et des corrélations élevées des séries temporelles enregistrées par des récepteurs à faible coût et de classe géodésique. Le développement du réseau CentipedeRTK collaboratif en accès libre et à faible coût est une réelle opportunité pour les applications géoscientifiques, en particulier dans les zones peu instrumentées (Bossier *et al.*, 2023 ; Bossier *et al.*, 2024).

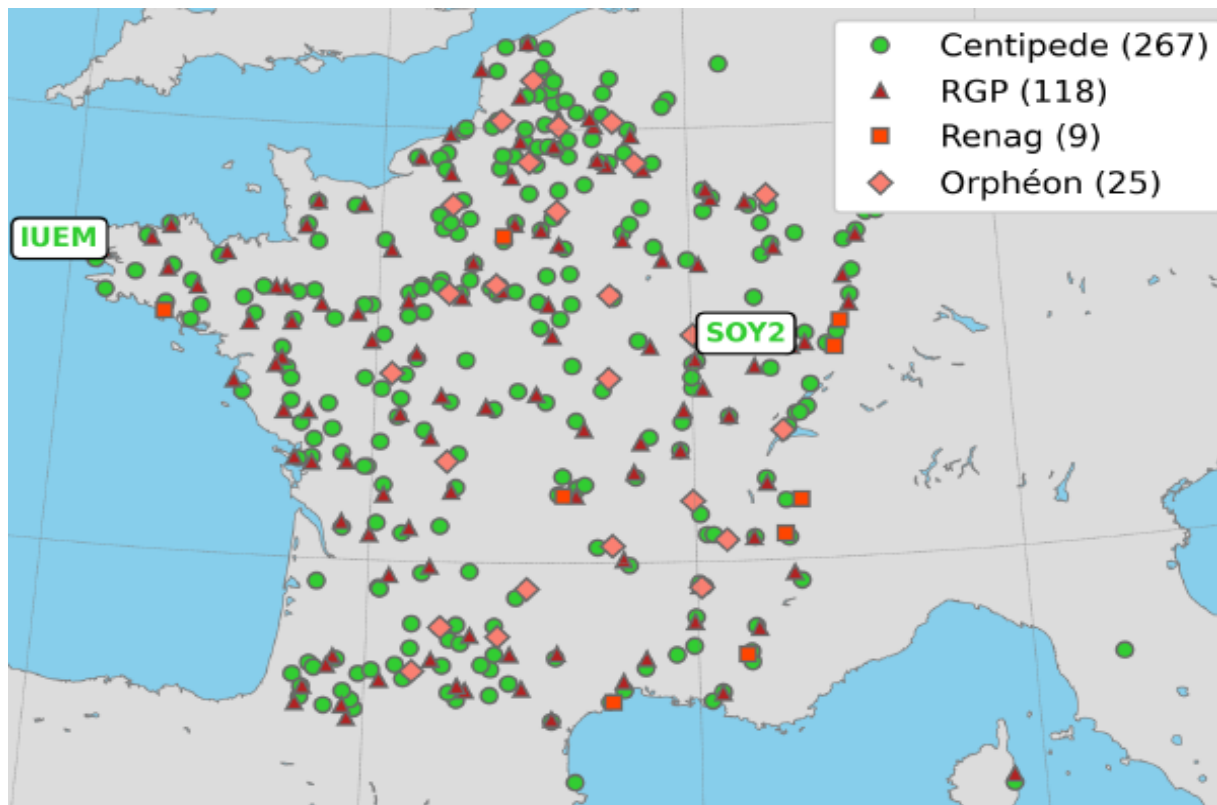


FIGURE 5 – Carte des stations GNSS des 4 réseaux étudiés et nombre de stations considérées dans Bossier *et al.* (2024).

Dabove et Bagheri en 2024 ont comparé les performances du réseau CentipedeRTK à bas coût avec le réseau EUREF Permanent Network (EPN) pour l'estimation du délai troposphérique zénithal (ZTD). L'objectif est de déterminer si les réseaux GNSS à bas coût peuvent offrir une alternative viable sans compromettre la qualité ou la précision des données, cruciales pour la modélisation climatique et la prévision météorologique. L'étude utilise deux logiciels différents, RTKLIB et CSRS-PPP, pour traiter les données des réseaux GNSS. Cinq stations du réseau CentipedeRTK et leurs homologues les plus proches du réseau EUREF ont été sélectionnées pour une comparaison approfondie sur une période de cinq semaines. Les données ZTD ont été collectées et analysées pour évaluer la variabilité temporelle et spatiale des estimations de ZTD. Les résultats montrent que les estimations de ZTD des deux réseaux sont presque identiques lorsqu'elles sont traitées par le logiciel CSRS-PPP, avec une différence moyenne maximale de moins de 3,5 cm. Cela confirme

que les réseaux GNSS à bas coût, comme CentipedeRTK, peuvent être une option fiable pour une surveillance atmosphérique précise et dense.

3.2 Bouées *low cost* et *open source* : un outil précieux pour la gestion concertée de l'eau en marais littoraux

En Nouvelle-Aquitaine, les 100 000 hectares de marais littoraux atlantiques représentent des zones humides emblématiques pour la conservation de la biodiversité. Ces territoires, sous la double dépendance de la gestion collective de l'eau et des pratiques agropastorales, fournissent de nombreux services écosystémiques. C'est dans ce contexte que le projet de recherche MaVi⁷, cofinancé par INRAE, la région Nouvelle-Aquitaine et l'Agence de l'eau Adour-Garonne, a été lancé. Ce projet réunit une dizaine d'acteurs et gestionnaires locaux, avec pour ambition de mieux comprendre la réponse de la biodiversité et de la dynamique du carbone aux différentes modalités de gestion de l'eau dans les casiers hydrauliques des marais.

La clé de cette recherche repose sur la capacité à suivre avec précision les niveaux d'eau sur un réseau dense de points de mesure et de partager ces données en temps réel avec les acteurs concernés. L'innovation apportée par l'utilisation de la technologie GNSS-RTK *low cost* et *open source*, s'appuie sur le réseau collaboratif CentipedeRTK. Cette technologie, appliquée à des bouées de suivi des niveaux d'eau, permet d'obtenir une précision centimétrique indispensable dans un environnement marqué par une microtopographie complexe.

Ces bouées GNSS-RTK (cf. Figure 6a) issues du projet Physalia (Pira *et al.*, 2022), conçues pour être à la fois fiables et économiques, facilitent le suivi précis des niveaux d'eau dans les canaux. Leur conception légère et mobile permet une mise en œuvre rapide et flexible sans nécessiter d'infrastructures complexes. Elles sont également capables de transmettre des données en temps réel, accessibles aux scientifiques et gestionnaires via des plateformes web, garantissant ainsi une prise de décision collaborative et éclairée.

Les résultats initiaux du projet MaVi, avec des bouées déployées dans les marais charentais et poitevins, montrent une variabilité spatiale marquée des niveaux d'eau, avec des écarts atteignant jusqu'à 30 cm entre deux casiers hydrauliques adjacents (Mzali et Ancelin, 2023 ; cf. Figure 6b). Ces données, couplées à des modèles numériques de surface, permettent de simuler les zones inondées en fonction des variations hydriques (cf. Figure 6c). Ces informations sont cruciales pour adapter la gestion de l'eau aux besoins de la biodiversité et des activités agropastorales, dans le cadre d'une gestion concertée et durable des marais.

Ainsi, cette technologie, en intégrant la précision du GNSS-RTK, représente une avancée majeure pour la compréhension et la gestion des zones humides. Elle permet d'équiper à moindre coût des territoires souvent sous-instrumentés, tout en offrant une surveillance fine et en temps réel des régimes hydrologiques. Ce dispositif offre un soutien essentiel aux gestionnaires locaux, en leur fournissant des données critiques pour améliorer la gestion des marais, particulièrement dans le contexte des changements climatiques et des pressions accrues sur les écosystèmes.

⁷ MaVi : Maintenir des marais vivants face au changement climatique, programme "Transition en territoires de l'agriculture, l'alimentation et l'environnement" (TETRAE) 2023-2027.

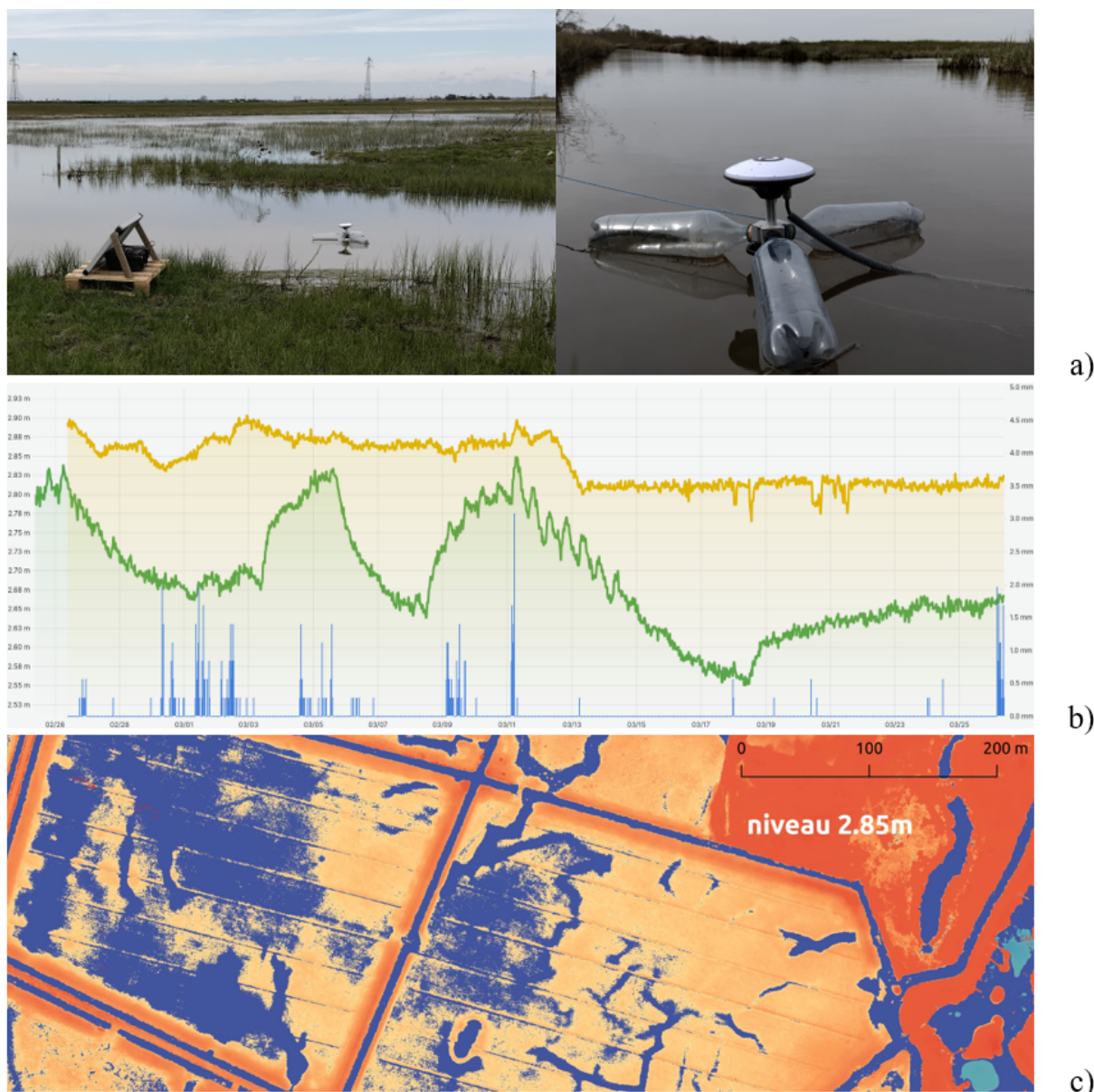


FIGURE 6 – Bouées Physalia (a) déployées dans les marais littoraux atlantiques dans le projet MaVi. Les données des niveaux hydrauliques sont disponibles en temps réel sur une interface web accessible par les gestionnaires (b) et permettent la modélisation informatique des surfaces ou volumes d’eau dans les canaux et sur les parcelles (c).

3.3 Localiser précisément les cavités basses des arbres pour y étudier la biodiversité hébergée

La géolocalisation précise d’arbres en peuplement forestier est une demande récurrente en sciences forestières. Le projet BloBiForM⁸ 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 dendromicrohabitats (DMH) qui sont des structures singulières des arbres telles que les cavités de tronc (Larrieu *et al.*, 2019 ; cf. Figure 7). L’arbre-habitat est alors défini comme étant un « arbre sur pied, vivant ou mort, portant au moins un dendromicrohabitat » (Bütler *et al.*, 2013 ; Bütler *et al.*, 2020). Ces derniers concluent qu’il est nécessaire de mettre en place des stratégies efficaces, afin de conserver ces éléments forestiers cités, essentiels pour la préservation de la biodiversité au sein de forêts exploitées. Les arbres habitats sont vulnérables face

⁸ BloBiForM : Approches neutres par blocs pour prédire l’effet de la gestion forestière sur la biodiversité au sein des dendromicrohabitats, programme ANR JCJC (2020-2024)

aux politiques de production de biomasse forestière face à l'augmentation de la demande en bois. Ainsi, pour concilier des enjeux économiques et écologiques, il est nécessaire de mettre en place des stratégies efficaces et effectives de conservation de ces arbres-habitats, « telle que la géolocalisation pour identifier ces arbres et les conserver » (Bütler *et al.*, 2013). Ainsi, ils voient la géolocalisation des arbres-habitats comme essentielle dans la garantie de la conservation de ces derniers chez les gestionnaires forestiers au travers de la mise en place de cadrages par les organismes forestiers privés ou publics, par exemple l'instruction biodiversité de l'Office National des Forêts (ONF, 2018).

Suivre et gérer la distribution spatiale des dendromicrohabitats 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 une station totale qui génère simultanément des mesures de distances (inclinées et horizontales) et d'angles (zénithaux et horizontaux). 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. Il est relativement facile d'estimer la précision de la localisation de points à partir d'observations faites avec une station totale.

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 conventionnelle sous licence propriétaire (Heintz *et al.*, 2024 ; cf. Figure 7).

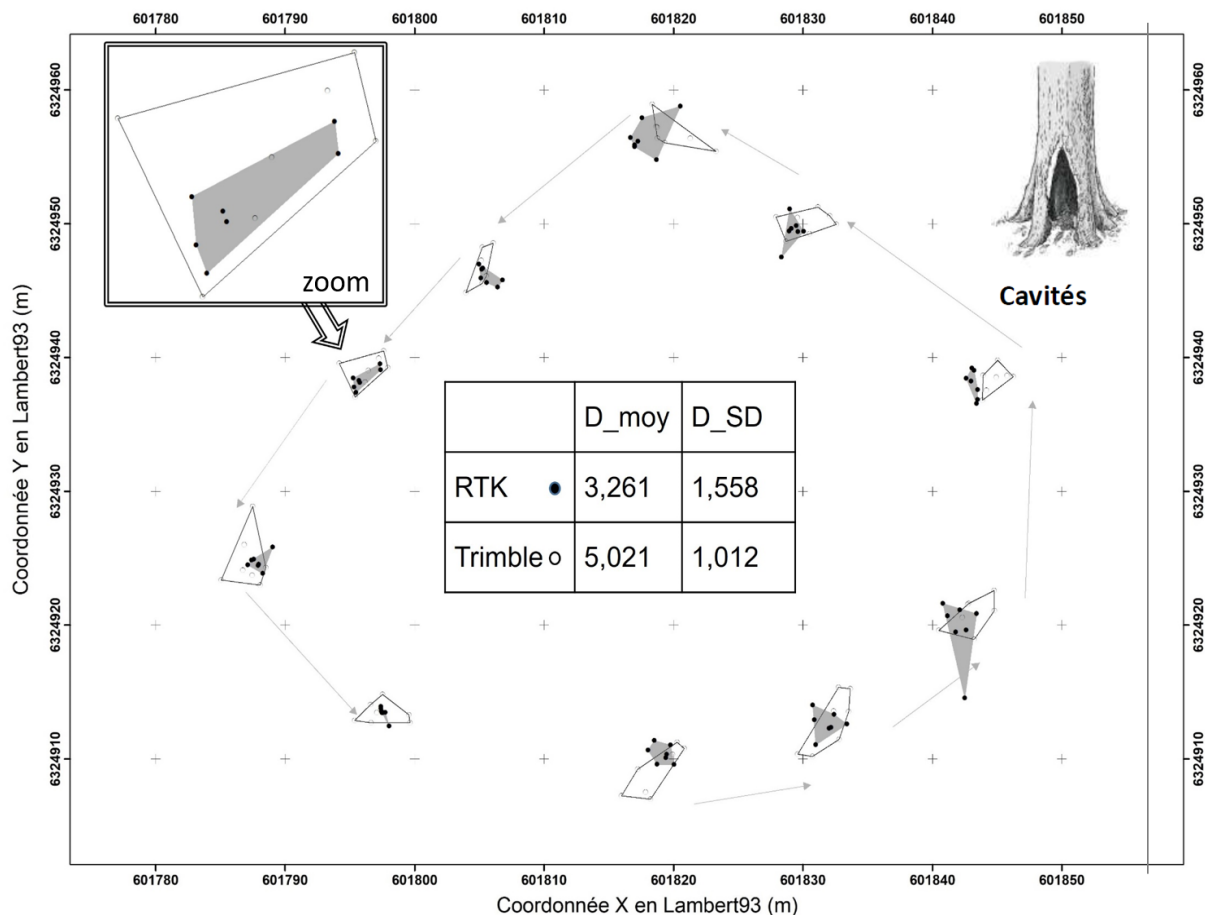


FIGURE 7 – Visualisation des données de position d’arbres par le récepteur GNSS de poche Trimble Geo 7x (cercle blanc) et par CentipedeRTK (cercle noir). Chaque amas de points correspond à un arbre, collectés lors de passages successifs le long du parcours. Les enveloppes englobantes des 2 nuages de 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 (D_moy : moyenne et D_SD : écart-type en mètres) pour caractériser la dispersion des points (Forêt de Grésigne, France).

On observe dans le secteur forestier une intégration croissante de la géolocalisation haute précision de manière routinière pour favoriser une gestion multifonctionnelle des forêts, notamment au sein de l’Office National des Forêts (ONF) (cf. Figure 8 qui met en évidence un nombre croissant d’arbres-habitats désignés et géolocalisés en forêt domaniale de Grésigne depuis 2020). CentipedeRTK pourrait accélérer cette tendance en rendant la géolocalisation haute précision plus accessible, en particulier aux petits propriétaires forestiers.

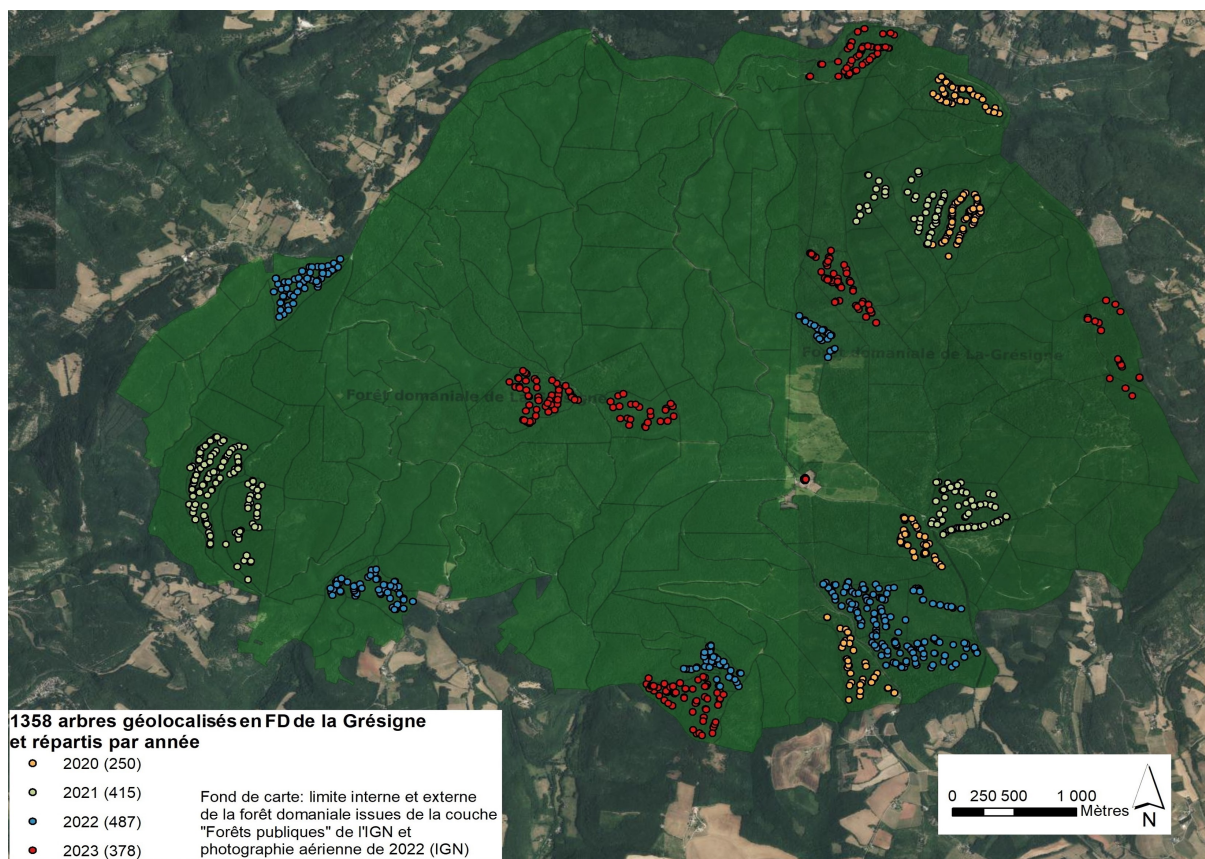


FIGURE 8 – Suivi annuel (de 2020 à juin 2023) du nombre croissant des arbres-habitats géolocalisés en forêt domaniale (FD) de la Grésigne (source : base de données de l’ONF).

Cependant, la mise en œuvre et les effets de cette pratique sont influencés par le réseau sociotechnique dans lequel elle s’insère. Une étude complémentaire en géographie sociale a été menée au sein du projet de recherche BloBiForM pour analyser les représentations, intérêts et changements induits par la pratique de la géolocalisation au sein du réseau sociotechnique des gestionnaires forestiers dans trois contextes différents : la gestion des forêts publiques au sein de l’Office National des Forêts (ONF) et, de manière moins approfondie, dans le cadre de la certification FSC et des contrats Natura 2000 (Robert *et al.*, 2023). Mobilisant des approches et concepts des science et *technology studies* (Callon, 1986, Akrich *et al.*, 2006) de la *political ecology* (Nost et Goldstein, 2022) et de la cartographie critique (Gautreau et Noucher, 2022), les auteurs montrent que la géolocalisation sert avant tout à faciliter le suivi et le contrôle du respect des règles liées à la conservation des arbres-habitats, en particulier dans le cas de la certification FSC et des contrats Natura 2000. L’étude montre que la collecte de ces données contribue peu in fine à faciliter la mise en place de corridors écologiques, à cause des contraintes institutionnelles et techniques qui encadrent la pratique de la géolocalisation et de l’hétérogénéité de ces pratiques. Elle met également en évidence des résistances fortes à lever ces contraintes pour que la géolocalisation haute précision remplisse ses promesses.

4 DISCUSSION ET PERSPECTIVES

Nous avons souhaité présenter dans cet article de manière synthétique l’intérêt du réseau CentipedeRTK (cf. Figure 9) et les détails matériels de son fonctionnement, en montrant quelques cas d’applications pour lesquelles ce réseau a fourni des performances satisfaisantes, en comparaison d’un système de positionnement par satellite (GNSS) conventionnel et d’un système propriétaire avec correction différentielle temps réel (RTK) ou différé (DGNSS). Le taux de

couverture actuel en bases CentipedeRTK installées en France en constante progression est un témoignage du succès de ce réseau collaboratif lancé en 2019.

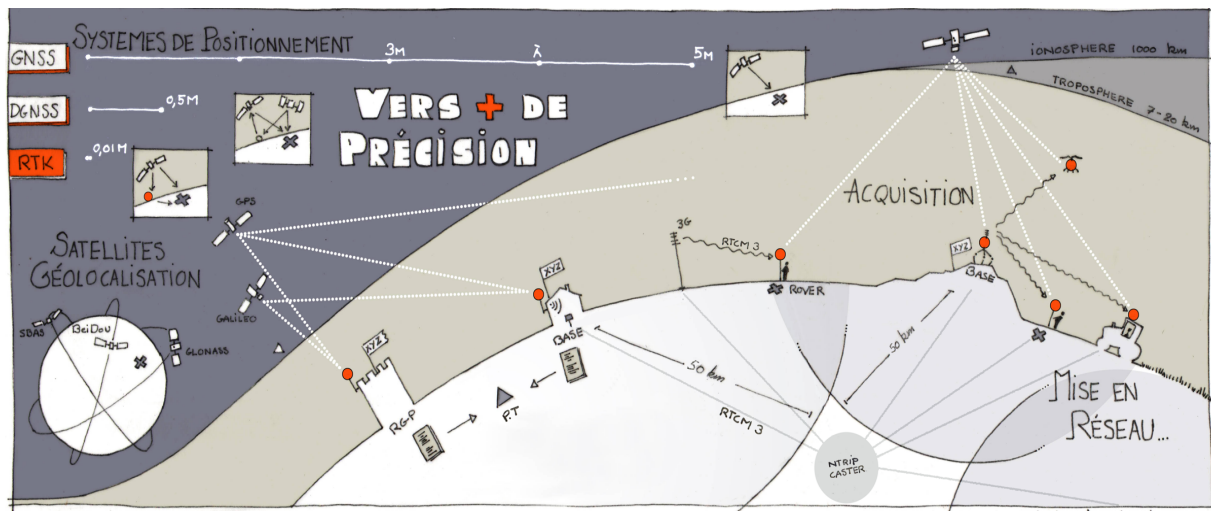


FIGURE 9 – Fonctionnement du système de positionnement par satellite et comparaison des précisions de mesure entre GNSS, DGNSS et RTK (famille à laquelle CentipedeRTK appartient).

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.

Néanmoins, nous pouvons nous interroger sur les enjeux sociétaux et environnementaux que CentipedeRTK doit prendre en compte. D'un point de vue sociétal, comme nous l'avons montré dans le milieu forestier, il faut que ces technologies soient comprises, explicitées et soutenues par les organisations pour lever les verrous à leur utilisation par tous. De plus Goodchild en 2011 pointait déjà dans les défis des sciences géospatiales des GIScience pour cette troisième décennie du XXI^e siècle, la nécessité de stimuler la pensée spatiale critique de tout utilisateur, expert, initié ou débutant, sur la mobilisation de ces technologies à l'ère de la démocratisation des outils et des usages des SIG (en particulier avec l'essor du crowdsourcing). Nous sommes à une époque où tout un chacun peut connaître l'emplacement de tout, de manière de plus en plus précise, à tout moment. Cela présente une valeur extrêmement positive dans des domaines tels que les interventions d'urgence, mais constitue également une menace pour les libertés civiles. D'un point de vue environnemental, CentipedeRTK repose sur le système de localisation par satellite. C'est un secteur à la croissance exponentielle compte tenu de la multitude d'applications liées à la gestion des ressources qui en est dépendante. Par exemple, la moitié des 54 variables climatiques essentielles définies par le GIEC sont mesurées depuis l'espace. Mais les émissions de ces satellites, de gaz à effet de serre et de particules en haute atmosphère sont mal mesurées et leur impact environnemental est encore incertain avec une hypothèse forte de risque d'accélération de ces effets néfastes vu le nombre croissant de satellites mis en orbite. Il faut donc se poser la question de la part du secteur spatial dans la lutte contre le changement climatique ainsi que la maîtrise de l'ensemble des enjeux environnementaux et écologiques. Il faut également évaluer la légitimité à rechercher toujours plus de précision de géolocalisation et questionner les utilités sociétales (Rapport 2024, *Le secteur*

spatial face à la transition : rapport sectoriel du collectif PRÉ [Pour un réveil écologique] : <https://pour-un-reveil-ecologique.org/fr/articles/rapport-secteur-spatial/>). Notons positivement par exemple l'existence de la charte *Net Zero Space3*, issue d'un accord international de nombreux acteurs du secteur spatial, destinée à réduire les débris spatiaux d'ici 2030 et à favoriser une utilisation plus durable de l'Espace pour l'Humanité.

Selon nous, CentipedeRTK est légitime pour être vu comme un géocommun. Les géocommuns sont des ressources produites collectivement par une communauté d'acteurs hétérogènes provenant des secteurs publics et privés, des clients et fournisseurs, des individus et des organisations, aussi bien partenaires que concurrents. La ressource est alors partagée et gérée par une communauté unie par un intérêt (commun) qui établit des règles collaboratives et démocratiques de gouvernance. 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 2022⁹ par les administrateurs de l'espace ouvert de discussion autour des géocommuns « Forum Géocommuns », à savoir bien définir le périmètre du géocommun, ses règles de contribution et ses règles d'utilisation. CentipedeRTK a d'ailleurs depuis 2023 un forum dédié sur cette plateforme des géocommuns : <https://forum.geocommuns.fr/t/a-propos-de-la-categorie-rtk-centipede/544> et les sujets d'échanges y sont très nombreux. L'arrivée en septembre 2024 de l'association loi 1901 Centipede-RTK (numéro : W173010740) marque une étape cruciale dans la démocratisation des technologies GNSS RTK. Initialement porté par des institutions publiques, le projet s'ouvre désormais à la société civile, favorisant une collaboration plus large et inclusive. Cette transition permet une diffusion plus étendue des solutions *open source* et *open data*, renforçant l'innovation participative et l'accessibilité mondiale à des outils de géolocalisation de haute précision.

CentipedeRTK coche donc tous les critères d'engagement sur la route des communs rappelés entre autres par l'IGN dans le guide des communs publié par Zachariou *et al.* en 2023 et résumé tel que :

- un fort potentiel d'adoption : le projet répond à un problème qui touche beaucoup de monde, il est plébiscité. Le projet résout un problème mieux, ou au moins aussi bien, qu'une alternative propriétaire ou ouverte (Heintz *et al.*, 2024) ;
- ainsi qu'un fort potentiel de contribution : le projet est suffisamment complexe et vaste pour que d'autres personnes continuent à étendre, améliorer et personnaliser ses fonctionnalités. Le projet a besoin de beaucoup de soutien de la part des membres, et la communauté peut aider en répondant et triant les tickets ouverts ou en examinant les propositions de contributions externes. Tout est fait pour favoriser la contribution : la documentation est de bonne qualité, les responsables sont réactifs, les interactions sociales sont bienveillantes, et les outils et compétences préexistantes sont largement étendus dans l'écosystème. Le projet a le potentiel d'être largement adopté sachant que plus un projet aura d'utilisateurs, plus nous pouvons nous attendre à ce qu'il ait de contributeurs.

RÉFÉRENCES

- Akrich M., Callon M., et Latour B. (Eds.) (2006). *Sociologie de la traduction : Textes fondateurs*. Paris : Presses des Mines, 303 pages, hal-03597436
- Ancelin J., Ladet S., Heintz, W (2023, juin 5-9) *Le Real Time Kinematic collaboratif, lowcost et open source. Positionnement GNSS temps réel, cinématique, collaboratif et en accès libre et à faible coût*. In Actes de la conférence Spatial Analysis and GEOmatics (SAGEO). ISBN : 978-2-9822061-0-6, pp.184-197. hal-04144737

⁹ <https://forum.geocommuns.fr/t/une-definition-partagee-dun-geo-commun/57/>

- 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>
- Bosser P., Bock, O. (2021). IWV retrieval from ground GNSS receivers during NAWDEX. *Advances in Geosciences* 55, pp. 13–22. DOI: 10.5194/adgeo-55-13-2021.
- Bosser P., Ancelin A., Métois M., Rolland L., Vidal M. (2023, April 23–28) Water vapour monitoring over France using the low-cost GNSS collaborative network Centipede. EGU General Assembly 2023, Vienna, Austria., (10.5194/egusphere-egu23-9059)
- Bosser P., Ancelin A., Métois M., Rolland L., Vidal M. (2024) Evaluation of tropospheric estimates from CentipedeRTK, a collaborative network of low-cost GNSS stations. *GPS Solutions* 28, 158. <https://doi.org/10.1007/s10291-024-01699-3>
- Bütler R., Lachat T., Larrieu L. et Paillet Y. (2013). Arbres-habitats, éléments clés de la biodiversité forestière. Dans Kraus D., Krumm F. Les approches intégratives en tant qu'opportunités de conservation de la biodiversité. Institut européen des forêts, 308 p.
- Bütler R., Lachat T., Krumm F., Kraus D., Larrieu L. (2020). Connaître, conserver et promouvoir les arbres habitats. Not. prat, WSL.
- Callon, M. (1986). La domestication des coquilles Saint-Jacques et des marins-pêcheurs dans la baie de Saint-Brieuc. *L'Année sociologique*, 36, 169-207.
- Dabove, P. ; Bagheri, M. (2024) Enhancing Atmospheric Monitoring Capabilities: A Comparison of Low- and High-Cost GNSS Networks for Tropospheric Estimations. *Remote Sensing*, 16, 2223. <https://doi.org/10.3390/rs16122223>
- 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>
- Gautreau, P. et Noucher, M. (2022). L'adieu aux cartes. Refaire de la cartographie politique au temps du numérique. Bernard Debarbieux ; Irène Hirt. Politiques de la carte, ISTE-Wiley, (halshs-03789737)
- Goodchild M. F. (1992) Geographical information science. *Int. J. Geogr. Info. Syst.* 6, 31-45 doi:10.1080/02693799208901893
- Goodchild M. F. (2011) Challenges in geographical information science. *Proc. R. Soc. A.* 4672431–2443 <https://doi.org/10.1098/rspa.2011.0114>
- Heintz W., Molina J., Ladet S., Larrieu L., Laroche F. (2024) Évaluation des performances de solutions GNSS Real Time Kinematic commerciales et *open source* pour la géolocalisation des arbres en forêt. *NOV'AE*, Numéro Régulier #01, 10 p. <https://dx.doi.org/10.17180/novae-2024-NO-art01>
- Lahaye R., Ladet S. (2014a). 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. (2014b). 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.
- Mzali L., Ancelin J. (2023, novembre 13-14) Géolocalisation collaborative low coast et *open source* : un outil précieux pour la gestion concertée de l'eau en marais littoraux. FORUM INNOVATION 2023 - Innover pour une gestion concertée et durable de l'eau Quelles contributions des sciences sociales ? Réseau de Recherche sur l'Innovation, Nov 2023, Montpellier, France. (hal-04563176)
- Mericskay B (2021) Les effets de l'*opendata* et du *Big Data* dans la fabrique des cartes de l'action publique : entre repositionnement des acteurs et démonopolisation de l'expertise autour des données territoriales. Les cartes de l'action publique : Pouvoirs, territoires, résistances, pp.107-130. halshs-03464763
- Nost E., et Goldstein J. E. (2022). A political ecology of data. *Environment and Planning E: Nature and Space*, 5(1), 3-17. <https://doi.org/10.1177/25148486211043503>

ONF (2018) Instruction biodiversité INS-18-T-97: document interne en téléchargement

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>

Robert L., Clement F., Laroche F. (2023) Interroger la géolocalisation des “arbres habitats” comme pratique de conservation de la biodiversité forestière : étude de cas sur l'Office National des Forêts, le dispositif Natura 2000 et la certification FSC. Master 2 Gestion des Territoires et Développement Local, mention MARGES « Altérités, réflexivité, géographie sociale », Université Lyon III Jean Moulin. hal-04236702

Seepersad, G., Aggrey, J., Gill, M., Bisnath, S., Kim, D., Tang, H. (2015, September 14 - 18) Relative Positioning Using RTK Measurement Filtering and PPP. In Proceedings of the 28th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2015), Tampa, Florida, September 2015, pp. 2537-2547.

Tobler W.R., (1970) A Computer Movie Simulating Urban Growth in the Detroit Region, *Economic Geography*, Vol.46, No.2, 234-240, (The first law of geography is at the bottom of page 236)

Zachariou, R., Arredondo, J., Barrallon, R., Cara A (2023) Guide des communs : une expédition ouishare au cœur de l'IGN. Magazine IGN/DIRCOM - octobre 2023, sous licence CC BY-SA 4.0 : https://www.ign.fr/files/default/2023-10/guide_communs_ouishare.pdf

A 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 remercions aussi les scientifiques Bossner et collaborateurs ; Mzali et coll. ; Faroche et Clément et coll., tous porteurs scientifiques des projets de recherches dont certains résultats ont été repris dans la partie n°3 de cet article.

B BIOGRAPHIE

Julien Ancelin : <https://cv.hal.science/julien-ancelin>

Co-premier auteur

Sylvie Ladet : <https://cv.hal.science/sylvie-ladet>

Co-premier auteur

Wilfried Heintz : <https://cv.hal.science/wilfried-heintz>