

# Évaluation des performances de solutions GNSS Real Time Kinematic commerciales et open source pour la géolocalisation des arbres en forêt

Wilfried HEINTZ<sup>1</sup>  
Jérôme MOLINA<sup>1</sup>  
Sylvie LADET<sup>1</sup>  
Laurent LARRIEU<sup>1,2</sup>  
Fabien LAROCHE<sup>1</sup>

**Correspondance**  
[wilfried.heintz@inrae.fr](mailto:wilfried.heintz@inrae.fr)

## Résumé.

La géolocalisation précise et rapide des arbres en forêt est une demande émergente dans le domaine des sciences forestières et de l'interface science/pratiques. Les systèmes de positionnement par satellites (GNSS) avec correction différentielle permettent d'atteindre une précision de l'ordre du mètre avec un temps d'acquisition modéré, y compris sous couvert forestier. Ces corrections sont désormais accessibles en temps réel via la technologie RTK, et des solutions libres et ouvertes se développent. Nous montrons ici à l'aide de deux expériences que : (i) l'accès à ces corrections en temps réel (RTK) présente un intérêt fort pour les sciences et la gestion forestière, en permettant des retours aux points efficaces sur des arbres préalablement marqués; (ii) une solution open-source (Centipede RTK) permet d'obtenir une correction différentielle efficace au sein d'un peuplement forestier mature et d'atteindre une précision de l'ordre du mètre. Sous réserve que la couverture du signal de correction et que l'ergonomie d'utilisation progressent, l'ouverture des technologies RTK peut permettre une diffusion large de ces systèmes libres pour les applications forestières.

## Mots-clés

GNSS ; géolocalisation ; correction différentielle ; forêt ; arbre ; précision ; RTK ; temps réel ; Banios ; Grésigne

---

1. INRAE, UMR 1201 Dynafor, Univ Toulouse, INRAE, INPT, EI PURPAN, F-31326 Castanet-Tolosan, France.

2. CNPF - CRPF Occitanie et IDF, 7 chemin de la Lacade, F-31320 Auzeville-Tolosane, France.

# Evaluation of the performance of commercial and open source GNSS Real Time Kinematic solutions for geolocating trees in forests

Wilfried HEINTZ<sup>1</sup>  
Jérôme MOLINA<sup>1</sup>  
Sylvie LADET<sup>1</sup>  
Laurent LARRIEU<sup>1,2</sup>  
Fabien LAROCHE<sup>1</sup>

**Correspondence**  
[wilfried.heintz@inrae.fr](mailto:wilfried.heintz@inrae.fr)

## Abstract.

Accurate and rapid geolocation of trees in forest stands is an emerging demand in forestry science and at the science/practice interface. Satellite positioning systems (GNSS) with differential correction can rapidly achieve meter-level accuracy in a forest context. As open-source solutions for differential correction are becoming available, we performed two field experiments to show that: (i) real-time differential correction (RTK) is necessary to efficiently retrieve pre-identified trees of interest, which is important for many forest applications; (ii) differential correction can be successfully obtained from an open-source solution (Centipede RTK) within a mature forest stand, yielding meter-level accuracy. This augurs well for the widespread use of these low-cost, open-source systems in the future, provided that the accessibility of the correction signal and the ergonomics of mobile devices continues to improve.

## Keywords

GNSS; geolocation; differential correction; forest; tree; accuracy; RTK; real time; Banios; Grésigne

---

1. INRAE, UMR 1201 Dynafor, Univ Toulouse, INRAE, INPT, EI PURPAN, F-31326 Castanet-Tolosan, France.

2. CNPF - CRPF Occitanie et IDF, 7 chemin de la Lacade, F-31320 Auzeville-Tolosane, France.

## Introduction

La géolocalisation précise et rapide des arbres en forêt est une demande émergente dans le domaine des sciences forestières et de l'interface science/pratiques. On peut illustrer ce besoin par trois exemples.

Premièrement, les données spatiales de description d'arbres doivent être acquises sur de grandes surfaces (i.e., au moins un hectare d'un seul tenant) pour calibrer certains modèles de dynamique des peuplements (par ex. le modèle Samsara2 ; Courbaud et al., 2015). La prise en compte de la position des arbres dans ces modèles permet d'intégrer des processus fins tels que la compétition pour la lumière entre les arbres ; leurs résultats contribuent ainsi à éclairer le gestionnaire sur le degré d'adéquation des itinéraires sylvicoles envisagés par rapport à ses objectifs sur la structure et la composition des peuplements forestiers.

Deuxièmement, la compilation de données spatiales de description d'arbres est également centrale pour concevoir des outils de formation à destination des gestionnaires forestiers, comme les « martélescopes » du réseau européen Integrate+ (Kraus et al., 2018). Ce réseau de placettes, où chaque arbre est géolocalisé et décrit, permet à des opérateurs d'effectuer des exercices de désignation d'arbres à exploiter (un « martelage » fictif) dans une de ces placettes, et de placer ensuite aisément sur une carte les arbres identifiés sur le terrain pour une évaluation a posteriori.

Troisièmement, des études récentes montrent que les dendromicrohabitats, i.e., des singularités morphologiques portées par certains arbres du peuplement, vivants ou morts, telles que les cavités de tronc, (Larrieu et al., 2018) sont des éléments cruciaux pour un grand nombre d'espèces forestières. Il est probable qu'en forêt exploitée, une distribution spatiale inadéquate des arbres portant des dendromicrohabitats contribue à une baisse de la biodiversité en limitant les connexions fonctionnelles associées (Larrieu, 2014). Cette hypothèse ne peut être testée qu'à l'aide d'analyses sur de grands jeux de données spatiales de description d'arbres.

Les méthodes classiques de géolocalisation des arbres en forêt ont longtemps reposé sur des moyens optiques (Lejeune, 2001), en recourant par exemple à un théodolite, ou en utilisant simultanément une boussole et un télémètre. Ce moyen de recueil des données souffre cependant de plusieurs limites. D'une part, les méthodes optiques sont chronophages et donc difficiles à intégrer dans un plan d'échantillonnage comportant un grand nombre d'arbres. D'autre

part, ils fournissent une localisation relative à un point de référence dont il n'est pas toujours aisé, en contexte forestier, de connaître la position exacte. Ils ne permettent pas non plus d'estimer la précision de la localisation. Le système de positionnement par satellites (GNSS) offre certes la perspective de géolocaliser des arbres au sein d'un peuplement forestier plus rapidement et de quantifier l'erreur de positionnement. Toutefois, le couvert forestier perturbe la réception des signaux des satellites et ne permet pas, en général, d'obtenir une précision de géolocalisation inférieure à une dizaine de mètres avec un système conventionnel (Bossier, 2012 ; Lahaye et Ladet, 2014 a, b).

L'adjonction d'une correction différentielle au système de positionnement GNSS permet d'atteindre des précisions de l'ordre du mètre, voire du centimètre, y compris en contexte forestier. Par exemple, Piedallu et Gégout (2002) ont estimé que pour une acquisition de 60 secondes avec une fréquence d'une acquisition par seconde, la précision de localisation en contexte de futaie pouvait varier de 10,7 m d'erreur moyenne pour un Garmin type 12 MAP (sans correction différentielle, gamme grand public) à 2,4 m pour un Trimble Pro XR (v 1.10 ; avec correction différentielle, haut de gamme en 2000).

Intégrée dans un appareil mobilisant la technologie Real Time Kinematic (RTK), la hausse de précision du système GNSS induite par la correction différentielle est accessible en temps réel. Il existe aujourd'hui plusieurs solutions commerciales qui mobilisent la technologie RTK. Un obstacle majeur pour accéder à ces solutions demeure néanmoins le coût d'acquisition et d'abonnement pour accéder à un réseau d'antennes fixes permettant la correction. Toutefois, des initiatives libres et ouvertes se développent sur le même terrain. Par exemple, en France, on a observé une expansion rapide du réseau Centipede RTK, mis en place par des acteurs de la recherche publique, qui vise à fournir un maillage national d'antennes fixes délivrant un signal de correction ouvert (Ancelin et al., 2022, 2023). Ce réseau d'acteurs scientifiques et techniques fournit également des modes opératoires pour construire et mettre en œuvre des appareils RTK à bas coût, compte tenu de la disponibilité accrue à la vente des composants matériels.

Dans ce contexte de développement de la technologie RTK, notre travail poursuit deux objectifs. Tout d'abord, nous questionnons l'intérêt que la correction différentielle sur le positionnement des arbres ait lieu en temps réel. Nous faisons l'hypothèse que le fait d'avoir accès à cette correction en temps réel permet de retrouver plus efficacement des arbres pré-identifiés, un atout majeur pour effectuer des suivis ou des contrôles dans des peuplements gérés.

Ensuite, nous questionnons la capacité des technologies RTK open-source à atteindre des précisions de l'ordre ou inférieures au mètre. Nous faisons l'hypothèse qu'elles en sont capables, au même titre que les solutions commerciales existantes.

Après un rappel sur les principes généraux de la correction différentielle du positionnement GNSS et sa déclinaison en temps réel par la technologie RTK, nous présentons ici deux expériences, issues de projets de recherches distincts menés au sein de notre unité, qui apportent des éléments de réponse à nos deux questions précédentes.

## Principe de la correction différentielle

La correction différentielle, qu'elle s'opère en temps réel ou en post-traitement, repose sur un principe simple : la station de référence (cf. Figure 1) est fixe et sa position est connue avec une très grande précision, de l'ordre du millimètre. Ce calcul précis de la position de la station de référence passe par une acquisition d'un grand nombre de positions pendant un temps long (à minima 24 h), puis par une correction en s'appuyant sur les antennes du Réseau Géodésique Permanent (RGP) de l'IGN. Ainsi, la station de référence est capable d'apprécier à chaque instant l'erreur de positionnement du signal transmis par les satellites. Se basant sur ce suivi continu de l'erreur de positionnement, il est donc possible, en temps réel ou a posteriori, de corriger la position donnée par un appareil se situant dans un environnement équivalent (en terme de constellation des satellites) à celui de l'antenne de référence. Un appareil mobile se déplaçant dans la zone de correction de l'antenne référentielle est appelé Rover.

On parle de post-traitement lorsque la correction est réalisée après l'acquisition des positions, en exploitant l'historique des erreurs de positionnement enregistré par la station de référence. Si cette correction est réalisée en temps réel, on parle de Real Time Kinematic (RTK). Le post-traitement est parfois la seule option possible, quand on ne peut pas capter le signal de correction de la station de référence directement sur le site d'étude, du fait par exemple d'un manque de couverture réseau.

Dans les deux cas, il est nécessaire de disposer d'un appareil capable de traiter un signal supplémentaire correspondant à la trame corrigée émise par l'antenne référentielle (dont le format le plus courant est le RTCM3). C'est le cas, notamment, du Trimble Geo7x utilisé dans le comparatif suivant.

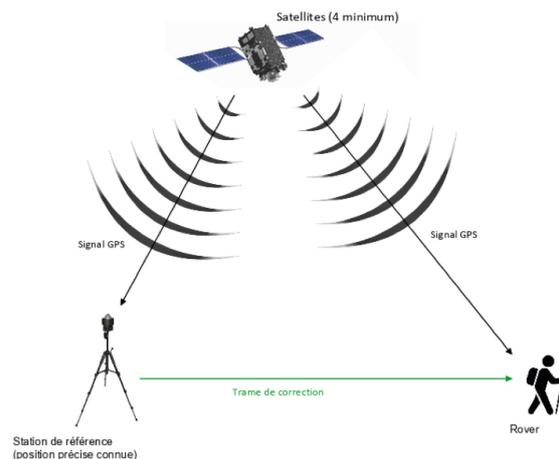


Figure 1. Principe de la correction différentielle

## Comparaison de l'efficacité de retour au point avec et sans correction différentielle en temps réel

Dans un premier projet de recherche, nous avons mené une expérience pour comparer la capacité de retour à un arbre pré-localisé par des opérateurs munis d'un appareil avec correction différentielle en temps réel (Trimble Geo7x) ou d'un appareil sans correction différentielle (Garmin 62ST). Pour l'appareil Trimble Geo7x, l'antenne fixe du réseau propriétaire adossé utilisée dans l'expérience est située à Lannemezan (CRAL sur la figure 2). On a par ailleurs considéré deux modes d'utilisation de cet appareil, avec et sans connexion d'une antenne déportée. Des liens vers les spécificités techniques de l'ensemble des appareils et des antennes considérés dans l'étude sont reportés en tableau 1. L'expérience (désignée comme expérience 1 dans le reste du texte) a eu lieu en forêt de Banios (département des Hautes-Pyrénées), dans le massif des Pyrénées (Figure 2). Les appareils ont été testés dans trois secteurs différents : le lieu-dit de la « Courrade », le lieu-dit de la « Cantère » et le lieu-dit de la « Coume Male ». On renseigne pente, ouverture de la canopée et essence dominante des différents secteurs en tableau 2.

Chaque appareil était confié à un opérateur unique et celui-ci devait retrouver une liste de 30 arbres préalablement géolocalisés avec le Trimble Geo7x. Les arbres étaient fournis à chacun des trois opérateurs dans un ordre aléatoire. L'opérateur arrêtait sa prospection quand l'appareil signalait que le point est atteint via l'utilisation de la fonctionnalité GO TO ou quand un temps maximum de deux minutes de prospection avait été atteint. La distance à la cible était alors mesurée avec un décimètre. Cette expérience de « retour à l'individu » a été menée le 22 septembre 2016. Pour

**Tableau 1 : Matériel utilisé dans le cadre des comparaisons de performance de cette étude**

Nom	Expérience	Lien vers la documentation technique	
Garmin 62 ST	1	<a href="https://www.garmin.com/fr-FR/p/63801">https://www.garmin.com/fr-FR/p/63801</a>	
Trimble Geo 7x	1 & 2	<a href="https://geospatial.trimble.com/sites/default/files/2019-03/Data-sheet%20-%20Geo%207X%20with%20Access%20Software%20-%20French%20-%20Screen.pdf">https://geospatial.trimble.com/sites/default/files/2019-03/Data-sheet%20-%20Geo%207X%20with%20Access%20Software%20-%20French%20-%20Screen.pdf</a>	
Antenne Trimble Zephyr 2 = antenne déportée (canne de 2m)	1 & 2	<a href="https://gpscope.dt.insu.cnrs.fr/spip/spip.php?article144">https://gpscope.dt.insu.cnrs.fr/spip/spip.php?article144</a>	
Matériels CentipedeRTK avec antenne déportée (canne de 2m)	2	<a href="https://docs.centipede.fr/">https://docs.centipede.fr/</a>	

**Tableau 2 : Caractéristiques des secteurs d'étude des deux expériences présentées dans l'étude**

Garmin 62 ST	Expérience 1 (Banios)			Expérience 2 (Grésigne)
<b>Secteur</b>	Courrade	La Cantère	Coume Male	Parcelle 66
<b>Pente</b>	<10 %	45 %	60 %	8 %
<b>Orientation</b>	Nord	Nord	Nord	Nord-Ouest
<b>Ouverture*</b>	40 %	10 %	20 %	23 %
<b>Description</b>	Profil sub-plat avec un couvert de feuillus divers, majoritairement des chênes	Futaie adulte monospécifique de hêtre sans sous-étage	Combe sur un versant nord fortement pentu, très confinée, sous barre rocheuse, avec un couvert dense et multi-strate, majoritairement de hêtre	Profil sub-plat avec un couvert de feuillus divers, majoritairement des chênes

\*Ouverture de la canopée évaluée à l'aide d'une tablette Samsung Galaxy Tab S3 équipée d'un fisheye à clipser de 235°. Prise de photos à env. 2m du sol via l'application LevelCamera pour caler la tablette à horizontale. Traitement des photos et détermination de l'ouverture de la canopée avec le logiciel GLAMA (Gap Light Analysis Mobile App). Tichý, 2014)

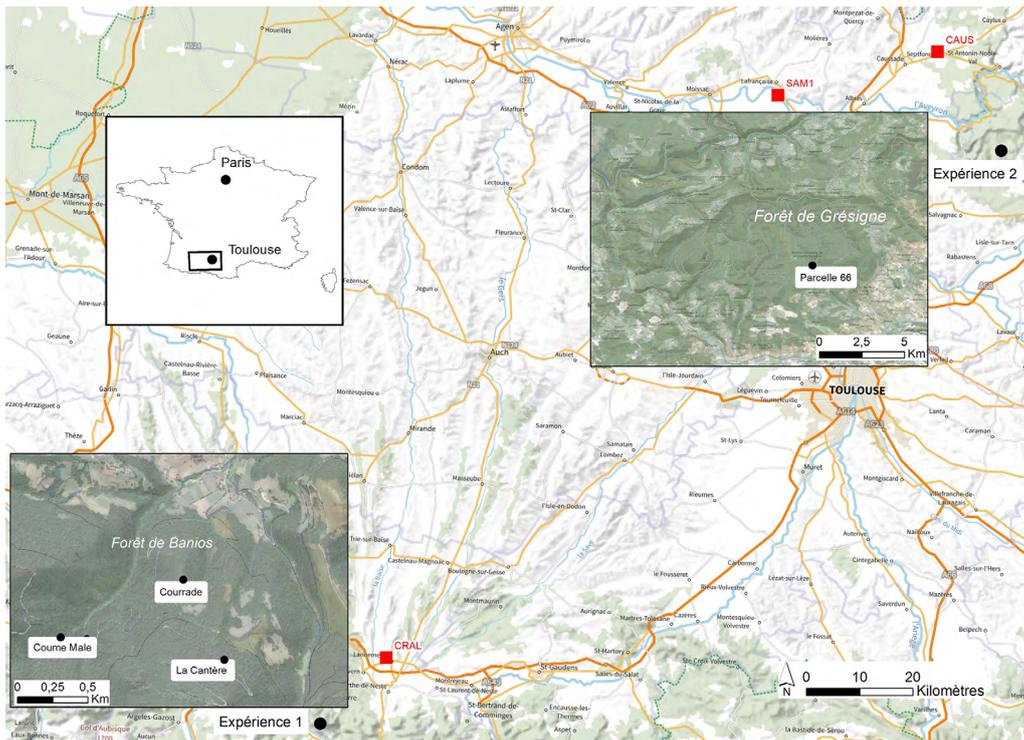


Figure 2 : Localisation des sites des deux expériences présentées dans l'étude. L'étude a lieu dans le Sud-Ouest de la France (cf. encart blanc). Sur la carte de fond, les points noirs indiquent les sites des deux expériences. Les positions des antennes de référence utilisées dans l'expérience 1 (CRAL) et dans l'expérience 2 (SAM1)

chaque arbre, on dispose, au terme de l'expérience, de trois mesures de distance à l'arbre cible, une par appareil (Garmin 62ST, Trimble Geo7x sans et avec antenne déportée).

L'ordination de l'erreur entre appareils est robuste et claire sur tous les secteurs (Figure 3 A) : le Trimble Geo7x avec antenne déportée induit des distances à la cible plus faibles que le Trimble Geo7x sans antennes déportées, qui induit des distances plus faibles que le Garmin 62ST. Ne pas utiliser l'antenne déportée du Trimble Geo7x dans l'expérience de retour à la cible induit une multiplication par 3,1 (intervalle de confiance [IC] 95 % : 2,5 - 3,8) de la distance à la cible par rapport au même appareil avec antenne déportée, et ce quel que soit le site d'étude. Utiliser le Garmin 62ST au lieu du Trimble Geo7x avec antenne déportée induit une multiplication par 7,3 (IC 95 % : 5,3 - 10,1), 10,7 (IC 95 % : 7,7 - 14,8) et 7,0 (IC 95 % : 4,3 - 11,5) de la distance à la cible dans les sites de Courrade, Cantère et Coume Male (Figure 3 B).

Une inspection visuelle des distances à la cible (figure 3 A) suggère que les distances obtenues avec le Trimble Geo7x tendent à être plus fortes dans le secteur de Coume Mâle et plus faibles dans le secteur de la Cantère. Ces différences sont statistiquement significatives (test de Kruskal-Wallis ;  $p= 4e-2$  sans antenne déportée,  $p= 7e-4$  avec antenne

déportée). Ces différences semblent liées aux variations de pente entre les secteurs (Tableau 2), un secteur plus pentu donnant lieu à des distances à la cible avec le Trimble Geo7x plus grandes. Le Garmin 62ST ne montre pas de différence entre les secteurs (test de Kruskal-Wallis ;  $p= 0.36$ ), probablement du fait que sa précision est déjà globalement faible.

## Quantification de la précision de positionnement atteinte avec une technologie libre et ouverte

Dans le cadre d'un second projet de recherche (projet Blo-BiForM, financé par l'Agence nationale pour la recherche ; <https://anr.fr/Projet-ANR-19-CE32-0002>), nous avons mené une expérience (désignée comme expérience 2 dans le texte) pour évaluer la précision de géolocalisation d'une solution GNSS avec correction différentielle libre et ouverte : un système smartphone-RTK Centipede composé d'un smartphone Android et d'un rover Centipede avec antenne déportée (cf. section 2 et Table 1).

L'étude se situe dans la forêt domaniale de Grésigne (département du Tarn ; cf. Figure 2), dans la parcelle 66,

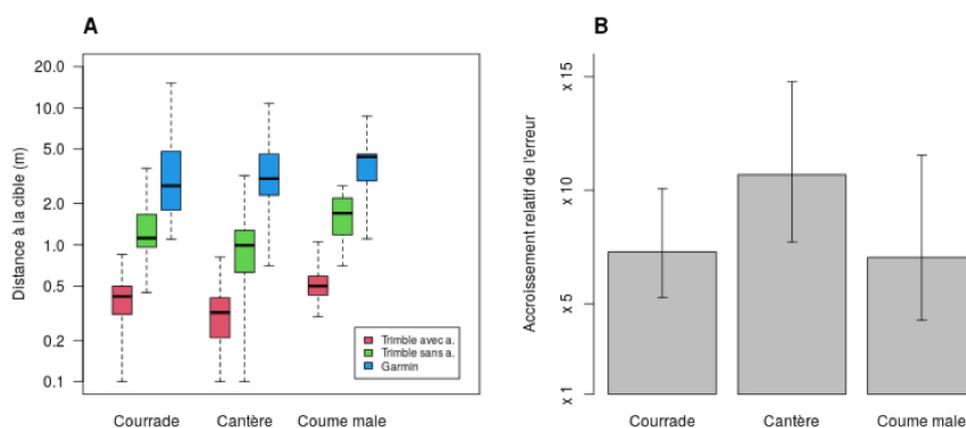


Figure 3 : Comparaison des distances à la cible selon les secteurs et les appareils dans l'expérience 1 (retour à la cible). Panneau A : distribution des distances à la cible obtenues pour chaque combinaison appareil X secteur. Noter l'échelle logarithmique (i.e. exprimée en ordres de grandeurs) en ordonnée. Panneau B : accroissement relatif de l'erreur entre le Trimble Geo7x avec antenne déportée et le Garmin 62ST. Les barres grises correspondent à l'estimation de l'accroissement relatif de l'erreur pour le Garmin. Les barres d'erreur montrent un intervalle de confiance à 95 % de l'accroissement estimé. et CAUS)

parcelle de forêt mature. Les caractéristiques du secteur d'étude sont reportées en table 2. Centipede s'adosse à un réseau d'antennes libre et ouvert, qui croît de manière permanente (Ancelin et al, 2023). Dans l'expérience ci-dessous, l'antenne fixe pourvoyeuse du signal pour la correction différentielle associée à ce système est située à Castelnau-Montratier (45 km de la zone d'étude ; SAM1 sur la figure 2). L'expérience a été menée le 22 juillet 2021.

À titre de contrôle dans notre expérience, nous avons également eu recours à une solution commerciale, le Trimble Geo7x déjà utilisé avec antenne déportée dans l'expérience précédente, dont l'antenne fixe pourvoyeuse du signal pour la correction différentielle est à Septfonds (25 km de la zone d'étude ; CAUS sur la figure 2). La différence d'antenne fixe avec Centipede provient du fait que l'appareil Trimble est adossé à un réseau d'antennes différent (réseau propriétaire). Ce contrôle nous permet de nous assurer que les conditions du jour permettent une géolocalisation avec une solution commerciale, si bien qu'une mauvaise performance du dispositif Centipede serait sans ambiguïté attribuable à l'une de ses composantes.

Dix arbres ont été préalablement marqués dans la parcelle d'étude et un repère a été placé au pied de chacun d'eux (un jalon plastique coloré d'environ 20 cm). Chaque arbre était placé à au moins 10 m des autres. On a défini un circuit de parcours reliant les 10 arbres. À chaque fois qu'un arbre était visité, on effectuait une acquisition en continu pendant 60 secondes, avec l'antenne déportée placée à 2 m du sol, à l'aplomb du repère visuel placé au pied de l'arbre. Les positions obtenues sur la plage de 60 secondes ont été corri-

gées, soit en temps réel (smartphone RTK Centipede), soit a posteriori (Trimble Geo7x, faute de couverture 3G suffisante pour du temps réel), puis moyennées pour obtenir une position finale. Le Trimble Geo7x inclut un algorithme de pondération sur la qualité des positions, tandis que toutes les positions sont utilisées sans pondération par le dispositif smartphone-RTK. Le parcours du circuit a été répété 7 fois. On obtient donc à la fin de l'expérience 2 dispositifs x 10 arbres x 7 passages = 140 positions corrigées (Figure 4). Le niveau d'imprécision d'un dispositif est évalué en considérant l'inertie des nuages de 7 points associée au même arbre (plus l'inertie est grande, moins le dispositif est précis sur cet arbre). Une imprécision globale du dispositif est quantifiée via la moyenne géométrique des valeurs d'inertie obtenue sur les différents arbres. On considère la racine carrée de cette inertie moyenne (exprimée en mètre), qu'on appelle le « erreur-type » du dispositif. On lui adjoint un intervalle de confiance (le détail des analyses statistiques est fourni dans un appendice technique accessible en ligne ; DOI : 10.5281/zenodo.7657054). Du fait de l'impossibilité d'obtenir une correction en temps réel pour notre appareil de contrôle (Trimble Geo 7x), nous n'avons pas mené d'expérience de quantification de la distance à la cible dans le cadre d'un retour au point similaire à l'expérience 1.

Avec le système « contrôle » Trimble Geo7x, nous avons obtenu une erreur-type de 1,43 m. La précision obtenue est bien supérieure à celle d'un dispositif sans correction différentielle en contexte forestier : on dispose bien d'un signal d'antennes fixes au sol permettant une hausse de la précision, et la solution libre mise à l'épreuve ici devrait per-

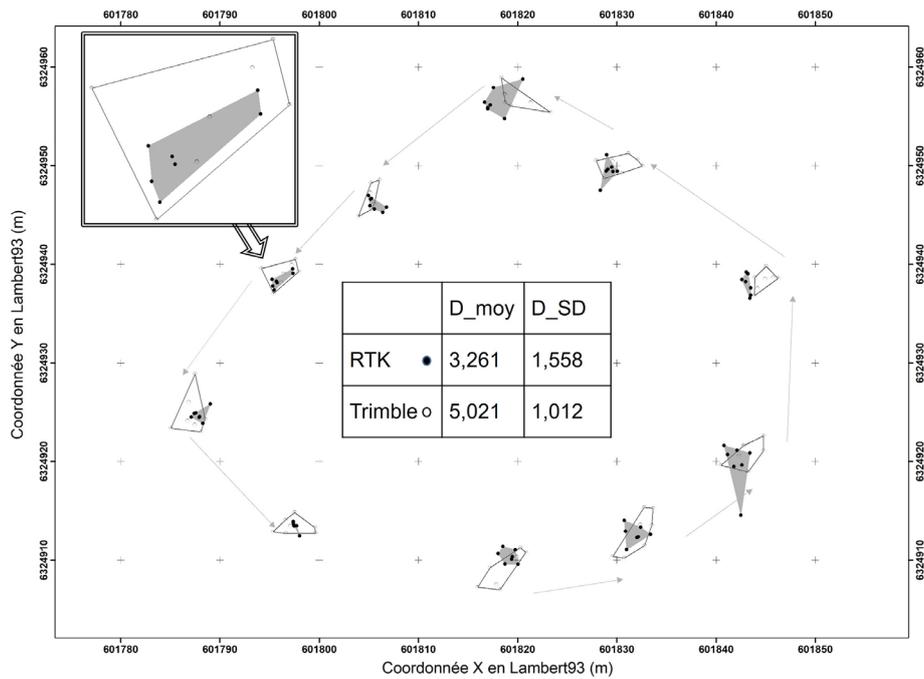


Figure 4 : Visualisation des coordonnées corrigées acquises dans l'expérience 2 : par le Trimble Geo 7x (cercles blancs) et par Centipede RTK (cercles noirs). Chaque amas de points correspond à un arbre, collecté lors de passages successifs le long du parcours. Les enveloppes englobantes des 2 nuages de points par arbre ont été obtenues par SIG (en gris sur les acquisitions Centipede RTK 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).

mettre de l'exploiter. L'erreur-type de l'appareil smartphone RTK Centipede est de 0,85 m, et cette valeur est significativement inférieure à un mètre (Figure 5). Le dispositif tire donc pleinement profit de la correction différentielle et atteint un très bon niveau de précision, supérieur au dispositif de contrôle. Il convient cependant d'être prudent dans la comparaison de cette performance avec celle du Trimble Geo7x car les réglages diffèrent. Par exemple, la meilleure

performance du dispositif Smartphone-RTK Centipede pourrait provenir du fait que la fréquence d'acquisition des points lors d'une phase de géolocalisation de 60 secondes tend à être plus élevée pour Smartphone-RTK Centipede (2-3 points par seconde) que pour le Trimble Geo7x (1 point par seconde). Piedallu et Gégout (2002) ont montré que pour un intervalle de temps de 1 à 10 secondes entre 2 enregistrements, la précision des appareils à correction

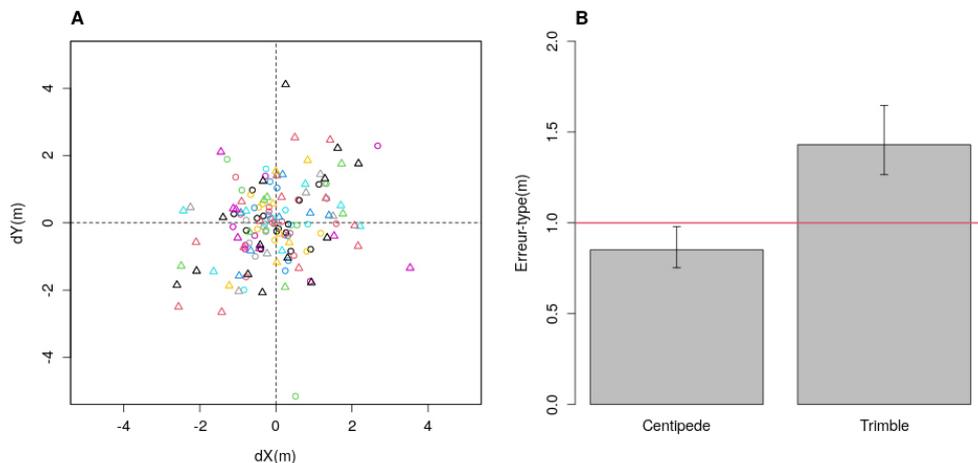


Figure 5 : Visualisation, quantification et comparaison statistiques des erreurs-types associées aux deux appareils GNSS. Panneau A : visualisation de l'écart de chaque acquisition d'un GPS sur un arbre (en abscisse : l'écart sur la coordonnée X ; en ordonnée : l'écart sur la coordonnée Y) par rapport aux centroïdes des sept acquisitions de ce GPS pour cet arbre (placé systématiquement au centre du graphique à l'intersection des axes en pointillés). Les symboles indiquent l'appareil (cercle pour Centipede, triangle pour Trimble) et les couleurs indiquent les arbres. Panneau B : quantification de l'erreur-type moyenne de chaque appareil.

différentielle testés dans leur étude ne dépendait que de la durée d'enregistrement (ici 60 secondes pour les deux appareils) et peu de la fréquence d'acquisition mais ici, on est en dehors de la gamme de fréquence explorée dans leur étude (de 0,33 à 1 seconde entre 2 enregistrements) si bien qu'on ne peut pas complètement écarter l'hypothèse que ce paramètre de fréquence pourrait potentiellement jouer.

## Conclusion

Ce travail avait un double objectif : 1/ Évaluer l'efficacité de la technologie RTK pour le retour à des arbres pré-localisés, et 2/ Vérifier si l'utilisation des outils libres et ouverts a un effet sur la capacité de cette technologie à atteindre une précision de l'ordre du mètre.

**Expérience 1 : distance à la cible en forêt de Banios avec ou sans correction différentielle en temps réel.** Grâce à cette expérience, nous avons pu montrer que la correction différentielle en temps réel permet une hausse de précision significative pour effectuer des retours à la cible, comparé à des outils standards ne permettant pas cette correction, tels que le Garmin 62ST. Il s'ensuit un gain de temps important sur le terrain, notamment dans un contexte de peuplement dense, sous réserve que la couverture réseau permette de corriger en temps réel la position acquise. Cette expérience permet également de montrer que la qualité du dispositif de réception, par exemple le recours à une antenne déportée, joue également un rôle important dans la réduction des erreurs de géolocalisation. Il serait intéressant de confronter le matériel RTK à la nouvelle génération d'appareils grand public de type Garmin 66SR, qui annonce une précision accrue par l'utilisation d'une constellation de satellites plus large et l'exploitation de nouvelles bandes de fréquences d'émission. On peut néanmoins s'attendre à ce que l'utilisation d'une technologie différentielle RTK induise toujours un gain de précision significatif.

**Expérience 2 : évaluation de précision d'un dispositif différentiel open source en forêt de Grésigne.** Avec cette expérience, nous avons pu montrer que la solution libre et open-source Smartphone/CentipedeRTK avec antenne déportée atteint un niveau d'erreur-type inférieur au mètre (0,85 m). Nous jugeons cette précision suffisante pour un retour au point efficace (mais cela resterait à démontrer, en dupliquant par exemple l'expérience 1 avec du matériel Centipede) ou pour des usages en modélisation évoqués en introduction. Dans un contexte de développement des réseaux d'antennes collaboratifs et des modules RTK abordables, cette très bonne performance du dispositif Smartphone/CentipedeRTK permet d'envisager que les suivis écologiques à l'échelle de l'arbre soient bientôt moins contraints par les coûts de mise en œuvre de la géolocalisation haute précision. Les principaux verrous à une diffusion plus large de la correction différentielle en temps réel par des technologies open-source RTK sont désormais d'ordre ergonomique : disposer d'interfaces de terrain standardisées et efficaces pour acquérir les positions, effectuer des moyennes pondérées de séquences d'acquisition et accéder au réseau d'antennes.

Au-delà de la question de l'open source, le besoin de correction différentielle en temps réel implique de capter en continu le signal des antennes fixes, condition qui n'a par exemple pas été remplie dans le cadre de notre deuxième expérience, nous obligeant à pratiquer le post-traitement. Le signal de correction transite aujourd'hui par des canaux de téléphonie (3G, 4G) dont la couverture peut être instable en terrain difficile, incomplète sur le territoire français et dépendante de l'opérateur (cf. carte de couverture mobile fournie par l'ARCEP : <https://monreseaumobile.arcep.fr/>). On peut espérer que cette limite soit surmontée par le développement de technologies fondées sur un signal radio, qui ne demanderaient que le déploiement d'un émetteur sur la zone d'étude 24-48 h en amont de la campagne d'acquisition et s'affranchiraient intégralement du réseau de téléphonie. ■

# Références

- Ancelin, J., Poulain S. et Peneau S. (2022). Centipede: 1.0 computer program. Version 1\_0. <https://zenodo.org/record/5814960>.
- Ancelin, J., Ladet, S. et Heintz, W. (2023-06). Centipede RTK, Le Real Time Kinematic collaboratif, low-cost et open source. Presented at : Conférence SAGEO 2023, Montréal, Canada (2023-06). <https://hal.inrae.fr/hal-04144737>
- Bosser, P. (2012). GNSS : Systèmes globaux de positionnement par satellite. École Nationale des Sciences Géographiques <http://cours-fad-public.ensg.eu/course/view.php?id=69>.
- Courbaud, B., Lafond, V., Lagarrigues G., Vieilledent G., Cordonnier T., Jabot F. et de Coligny F. (2015). Applying Ecological Model Evaluation: Lessons Learned with the Forest Dynamics Model Samsara2. *Ecological Modelling* (314), 1-14.
- Kraus, D., Schuck A., Krumm F., Büttler R., Olf H., Courbaud B., Larrieu L., Mergner U., Pyttel P., Varis S., Wilhelm G., Witz M., Zenner E. et Zudin S. (2018). Seeing is building better understanding – the Integrate+ Martelloscopes. Integrate + Network. <https://hal.science/hal-02790373/>
- Lahaye, R. et Ladet, S. (2014a). Les principes du positionnement par satellite : GNSS. Cahier des Techniques de l'INRA, 9-18.
- Lahaye, R. et Ladet, S. (2014b). Les réseaux de correction différentielle. Cahier des Techniques de l'INRA, 36-43.
- Larrieu L., 2014. Les dendro-microhabitats : facteurs clés de leur occurrence dans les peuplements forestiers, impact de la gestion et relations avec la biodiversité taxonomique, thèse de doctorat, spécialité Agrosystèmes, Écosystèmes et Environnement, Institut National Polytechnique de Toulouse, 333 p.
- Lejeune P. (2001) La saisie et le traitement des données pour la mise à jour de cartes de peuplements forestiers. Gembloux Agro-BioTech. [https://www.gembloux.ulg.ac.be/gestion-des-ressources-forestieres/upload/Notes%20techniques/ntfg\\_04.pdf](https://www.gembloux.ulg.ac.be/gestion-des-ressources-forestieres/upload/Notes%20techniques/ntfg_04.pdf)
- Piedallu, C. et Gégout, J. C. (2002). Étude de la précision du système GPS en milieu forestier. *Revue Forestière Française*, 54 (5), 429-442.
- Tichý, L. (2014). Gap Light Analysis Mobile App (GLAMA). <https://www.sci.muni.cz/botany/glama/>



Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-SA). <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>.

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue « NOV'AE », la date de sa publication et son URL.