

Analyse métrologique d'un algorithme modulaire et itératif d'agrégation de trajectoires GNSS:

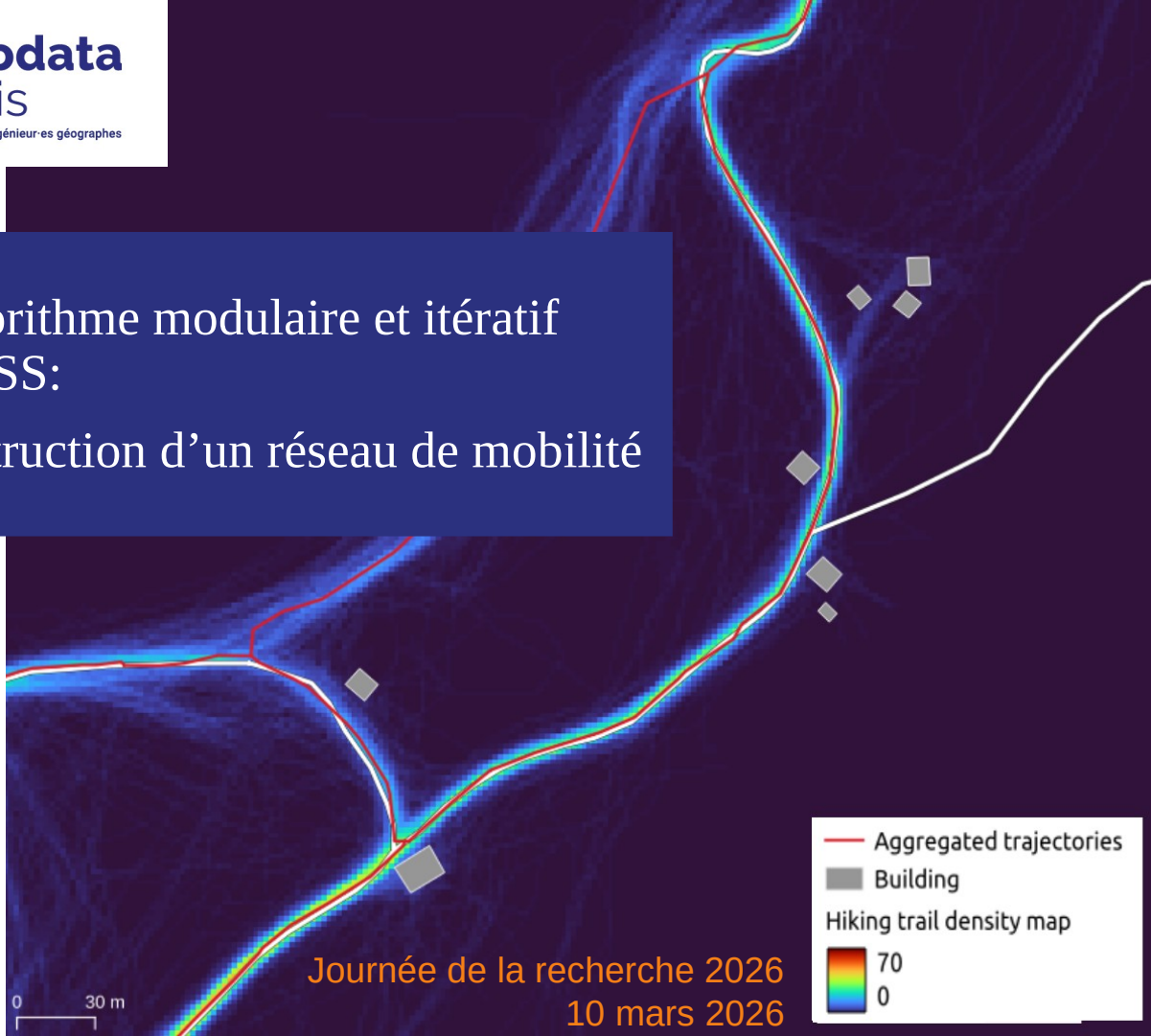
Application à la construction d'un réseau de mobilité

Marie-Dominique Van Damme,
Yann Méneroux,
Ana-Maria Raimond,

Équipe LASTIG-MEIG,
Univ Gustave Eiffel, IGN-ENSG



Lab on Geographic Information Science for
sustainable development and smart cities



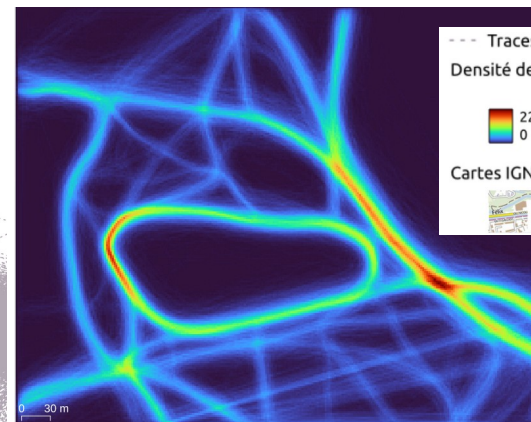
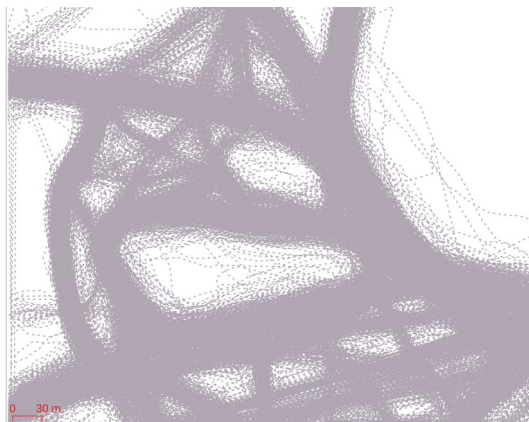
Journée de la recherche 2026
10 mars 2026

Contexte et objectifs

IntForOut : Intégration de données spatiales multisources pour la surveillance des écosystèmes sous la pression des activités de loisir extérieures.

Objectifs : - Quantifier la présence humaine dans les espaces extérieurs en utilisant des trajectoires GNSS issues d'activités de plein air (par ex. randonnée, course à pied, cyclisme)
- Définir un réseau d'itinéraires agrégé précis et enrichi avec des attributs de fréquentation, paysage, faune, flore, etc..

1ère étape : on se concentre sur l'agrégation des trajectoires



Formalisation du problème

Soit X un ensemble de trajectoires, où chaque trajectoire est définie comme un ensemble de n points ordonnés.

On définit une **trace agrégée**, notée AX , comme la meilleure représentation géométrique d'un jeu de trajectoires X suivant exactement la même route partant d'une origine vers une destination :

Une **trace agrégée précise**, notée AAX , est une trace agrégée qui optimise (en moyenne) un critère de qualité Q , par rapport à une vérité terrain G .

i.e. AAX optimise $E[Q]$, l'espérance statistique de la quantité Q .

⇒ Définir Q et le calculer de manière approximative et satisfaisante

Algorithme de la trajectoire médiane

[1] Trajectoires médianes. 2014.

Laurent Étienne et Thomas Devogele.

14ème conférence Extraction et Gestion des Connaissances, Ateliers fouille de données spatiales et temporelles & construction, enrichissement et exploitation de ressources géographiques pour l'analyse de données. Rennes, France.

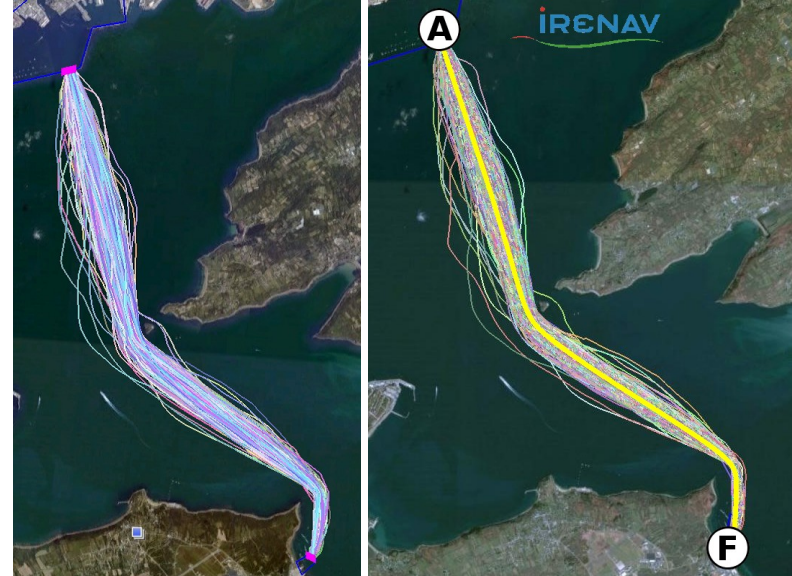
<https://hal.science/hal-02110086/file/cn6.pdf>

Algorithme prometteur

- ✓ méthode itérative,
- ✓ s'appuie sur l'appariement des points,
- ✓ robuste aux valeurs aberrantes,
- ✓ grande précision pour les points agrégés dans la trajectoire agrégée finale.

Cependant :

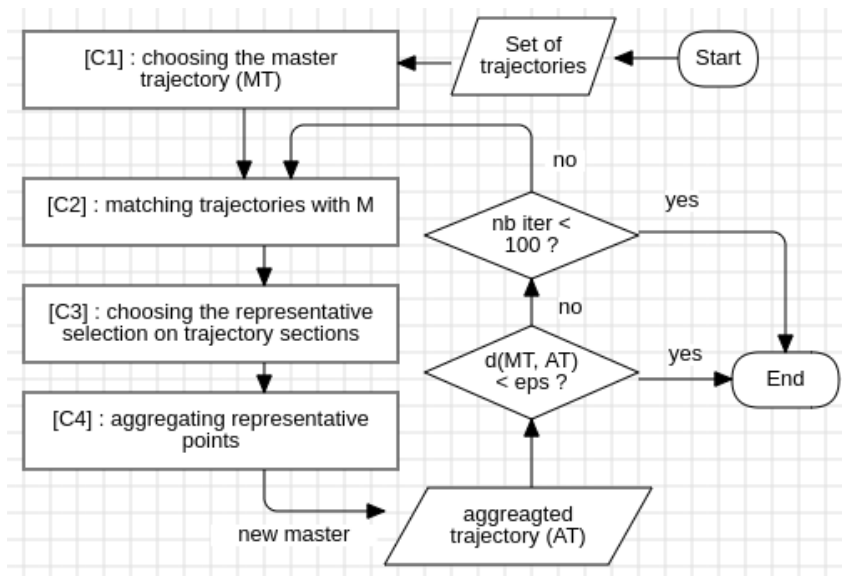
- ✗ convergence de l'algorithme ?
- ✗ pas de qualification métrologique (convergence vers une solution unique ? convergence vers la vérité terrain ? quelle vitesse de convergence ?
- ✗ paramétrage pas forcément adapté (cartographique)



Source [1]

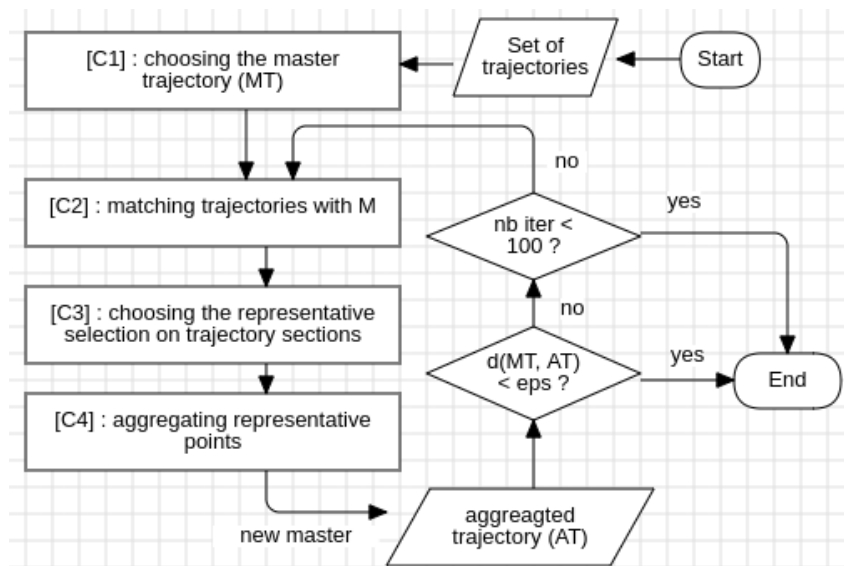
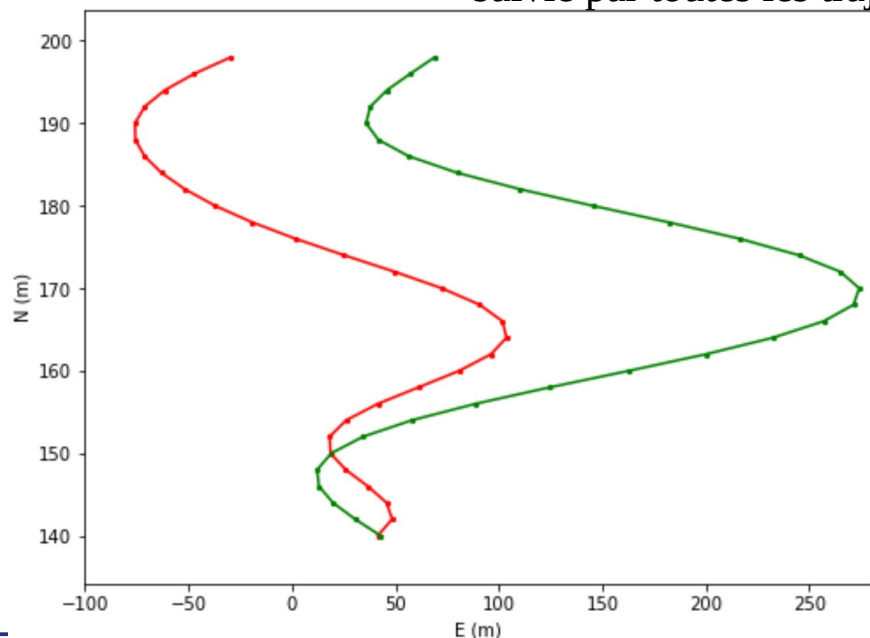
Un algorithme modulaire et itératif d'agrégation de trajectoires GNSS : MIAA

- Notre approche :**
- ~ Proposer un algorithme modulaire afin de calculer la trace agrégée
 - ~ Étudier les performances métrologiques de l'algorithme :
c'est-à-dire sa capacité à reconstruire avec précision la trajectoire commune suivie par toutes les trajectoires de l'échantillon



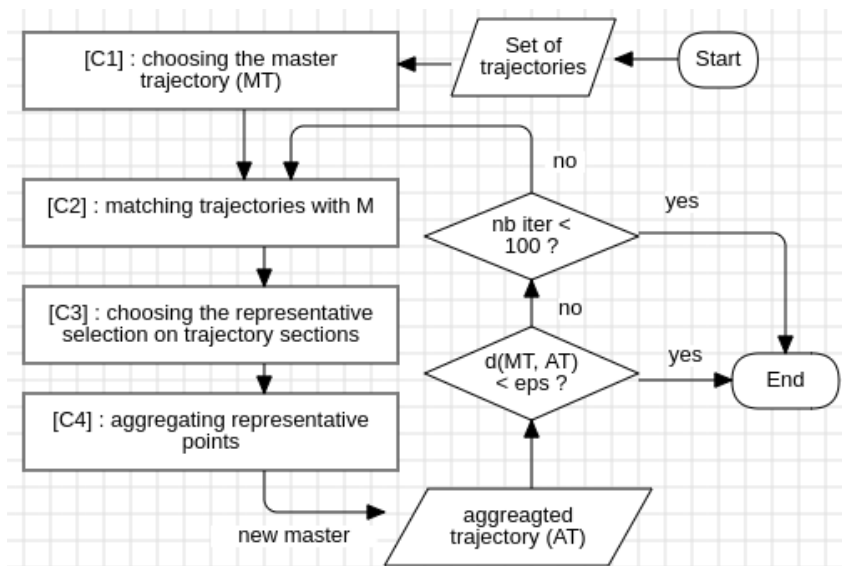
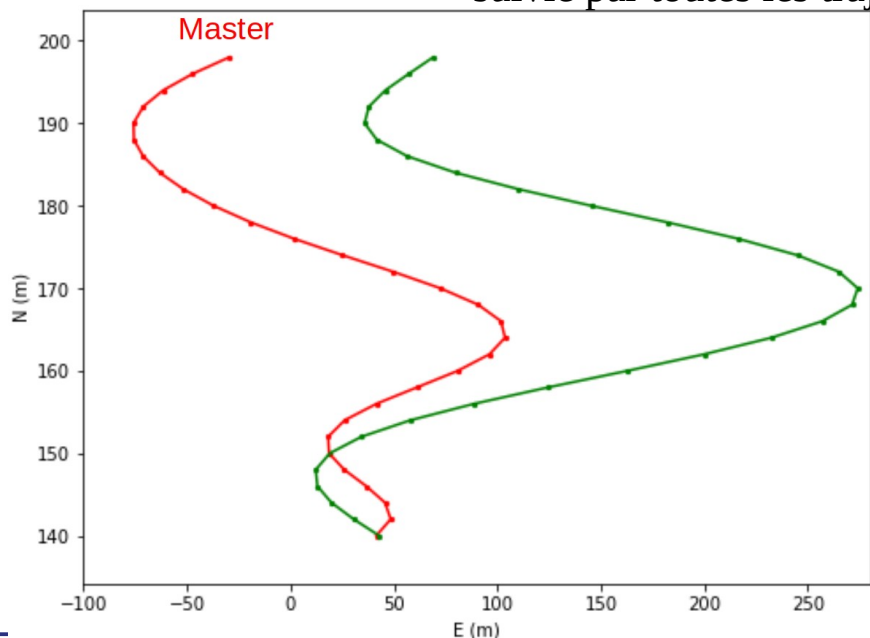
Un algorithme modulaire et itératif d'agrégation de trajectoires GNSS : MIAA

- Notre approche :**
- ~ Proposer un algorithme modulaire afin de calculer la trace agrégée
 - ~ Étudier les performances métrologiques de l'algorithme :
c'est-à-dire sa capacité à reconstruire avec précision la trajectoire commune suivie par toutes les trajectoires de l'échantillon



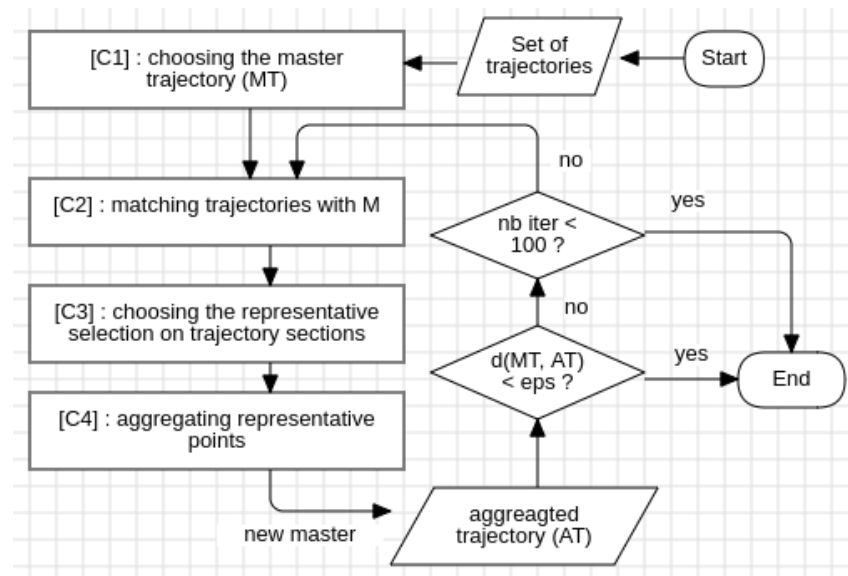
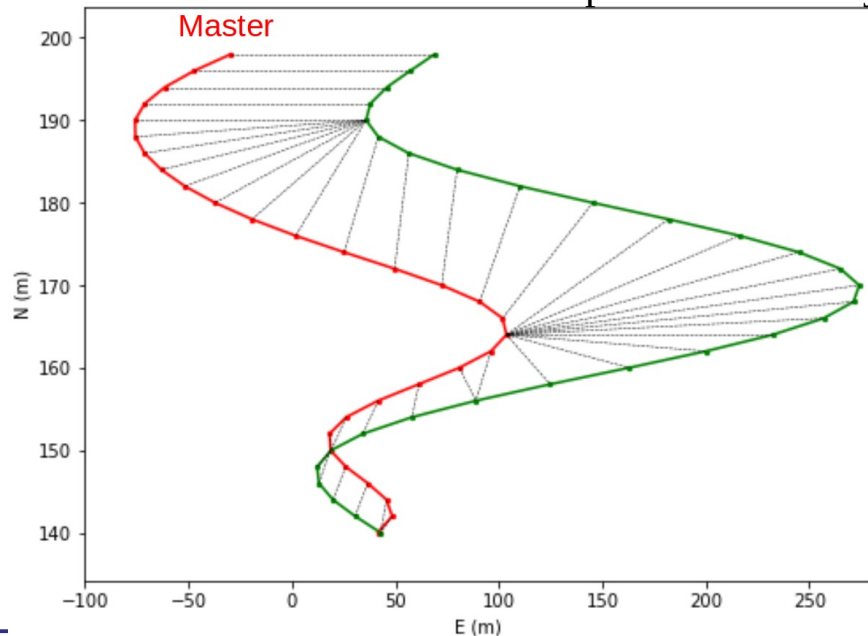
Un algorithme modulaire et itératif d'agrégation de trajectoires GNSS : MIAA

- Notre approche :**
- ~ Proposer un algorithme modulaire afin de calculer la trace agrégée
 - ~ Étudier les performances métrologiques de l'algorithme :
c'est-à-dire sa capacité à reconstruire avec précision la trajectoire commune suivie par toutes les trajectoires de l'échantillon



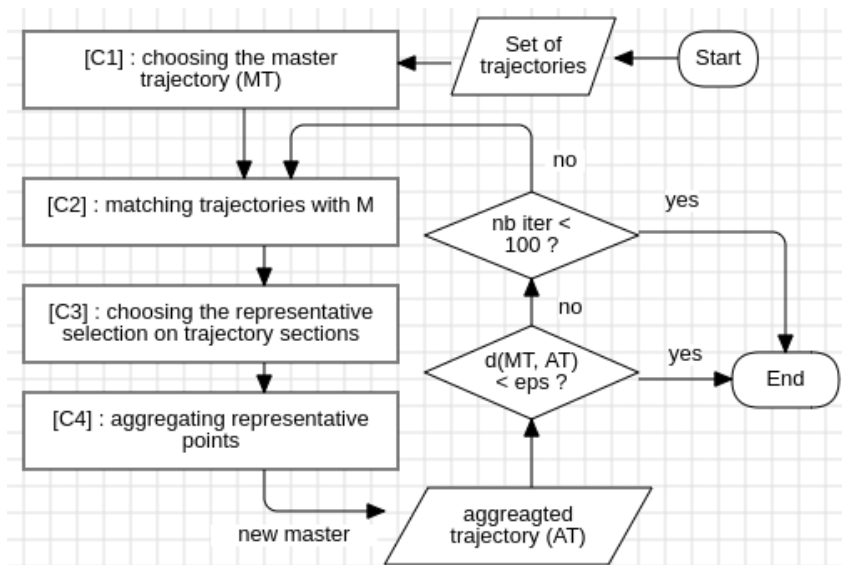
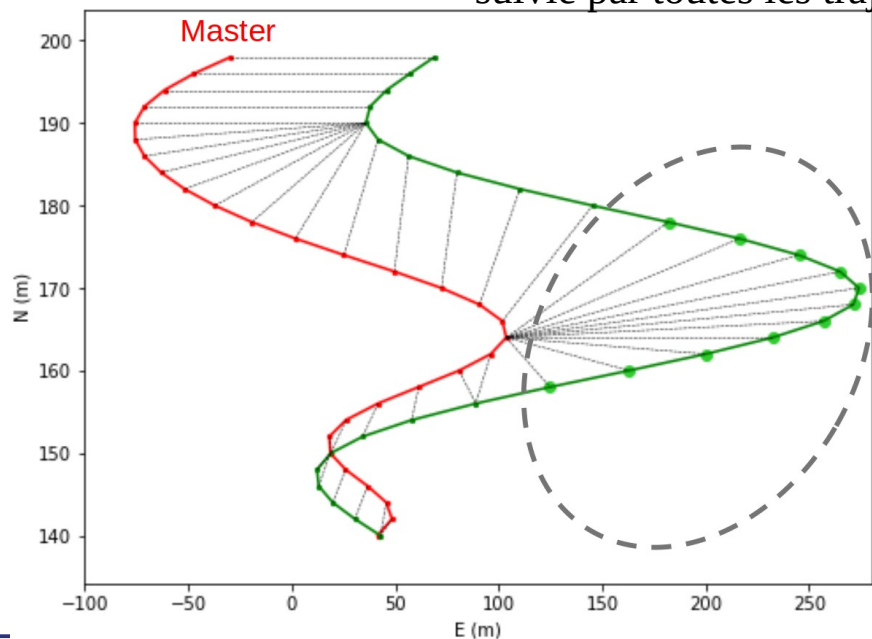
Un algorithme modulaire et itératif d'agrégation de trajectoires GNSS : MIAA

- Notre approche :**
- ~ Proposer un algorithme modulaire afin de calculer la trace agrégée
 - ~ Étudier les performances métrologiques de l'algorithme :
c'est-à-dire sa capacité à reconstruire avec précision la trajectoire commune suivie par toutes les trajectoires de l'échantillon



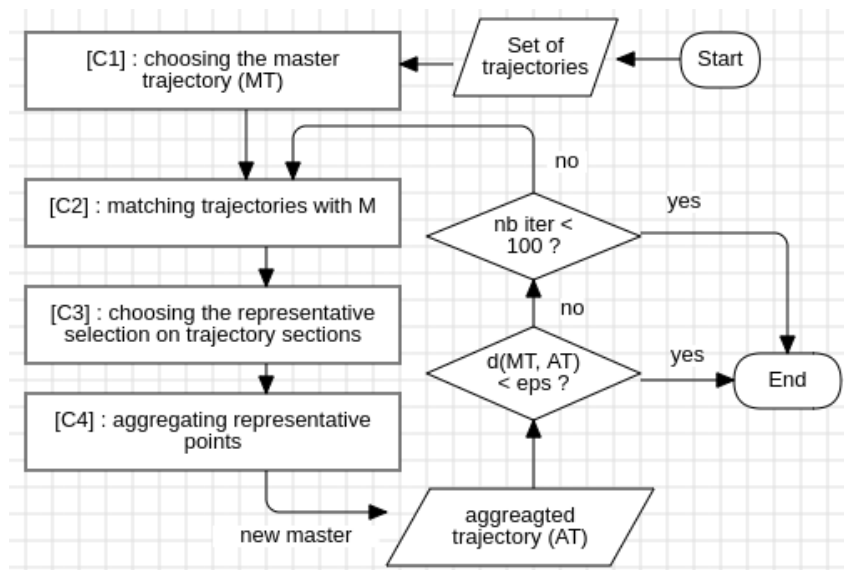
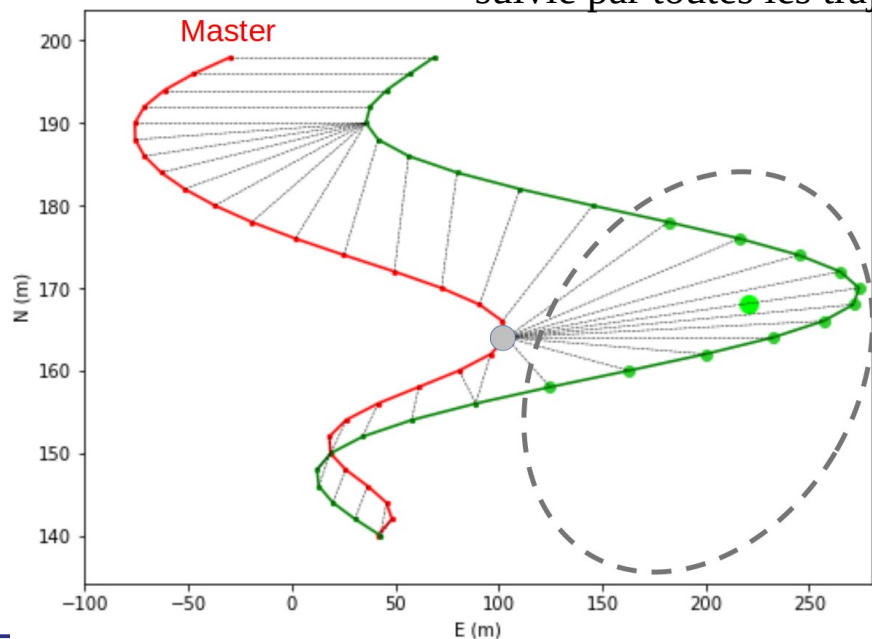
Un algorithme modulaire et itératif d'agrégation de trajectoires GNSS : MIAA

- Notre approche :**
- ~ Proposer un algorithme modulaire afin de calculer la trace agrégée
 - ~ Étudier les performances métrologiques de l'algorithme :
c'est-à-dire sa capacité à reconstruire avec précision la trajectoire commune suivie par toutes les trajectoires de l'échantillon



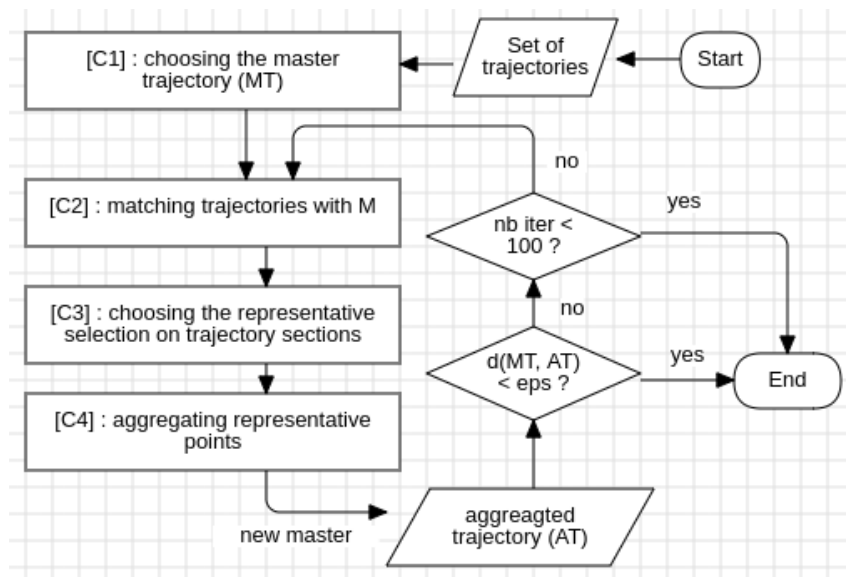
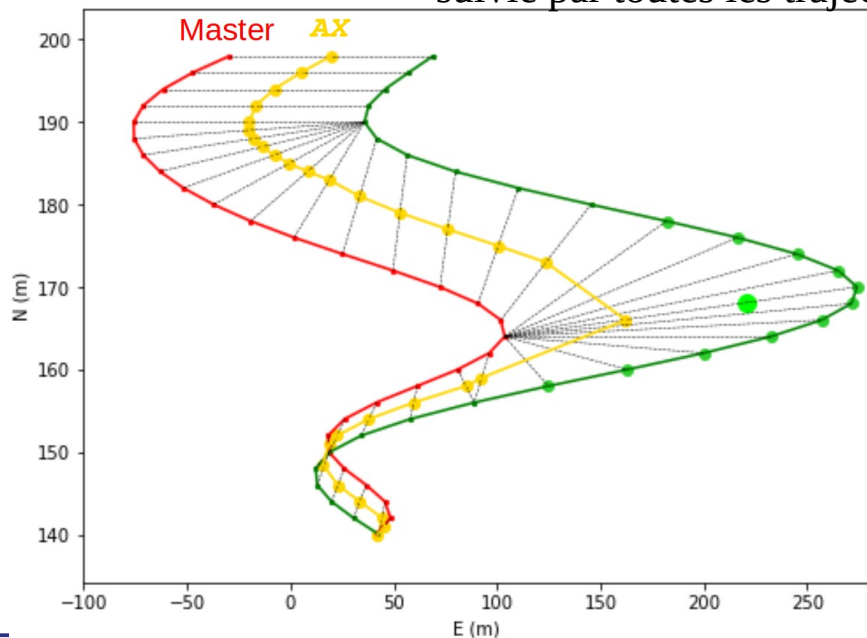
Un algorithme modulaire et itératif d'agrégation de trajectoires GNSS : MIAA

- Notre approche :**
- ~ Proposer un algorithme modulaire afin de calculer la trace agrégée
 - ~ Étudier les performances métrologiques de l'algorithme :
c'est-à-dire sa capacité à reconstruire avec précision la trajectoire commune suivie par toutes les trajectoires de l'échantillon



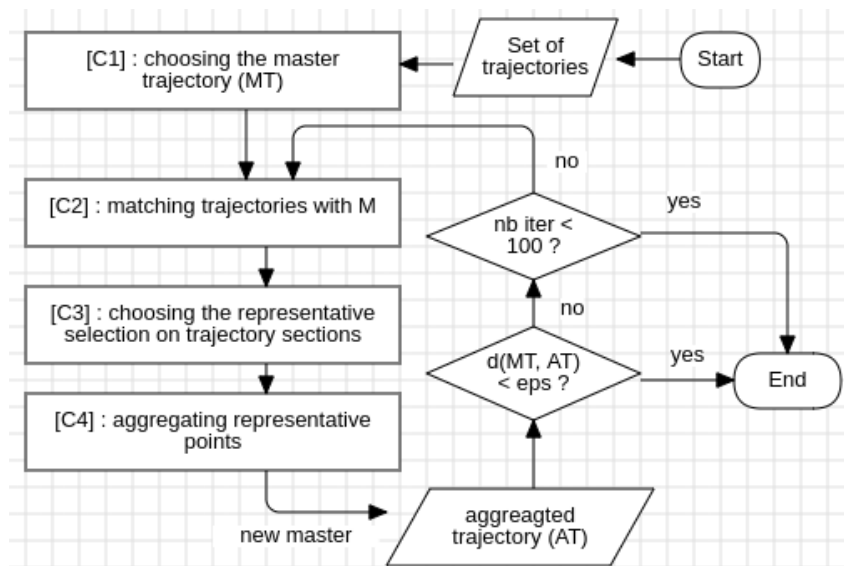
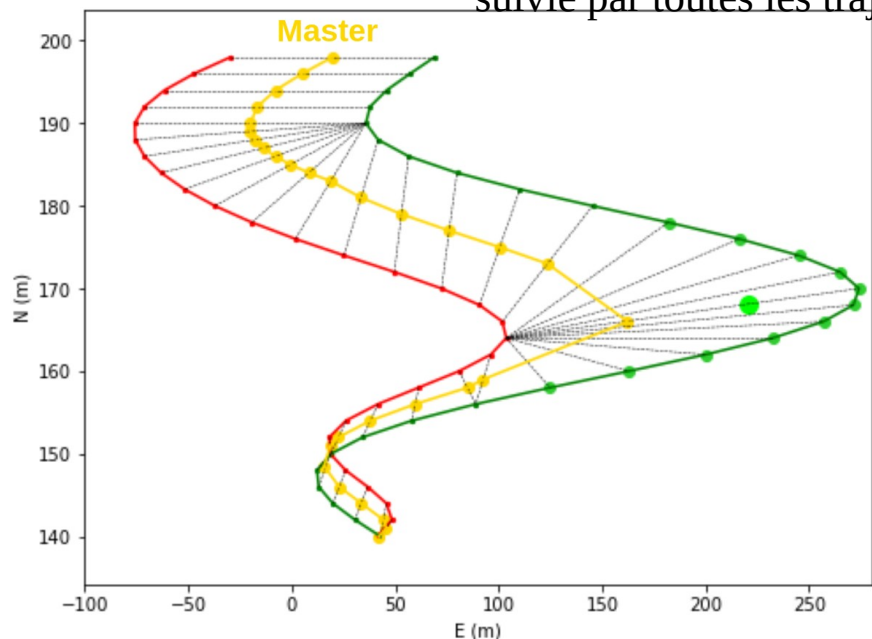
Un algorithme modulaire et itératif d'agrégation de trajectoires GNSS : MIAA

- Notre approche :**
- ~ Proposer un algorithme modulaire afin de calculer la trace agrégée
 - ~ Étudier les performances métrologiques de l'algorithme :
c'est-à-dire sa capacité à reconstruire avec précision la trajectoire commune suivie par toutes les trajectoires de l'échantillon



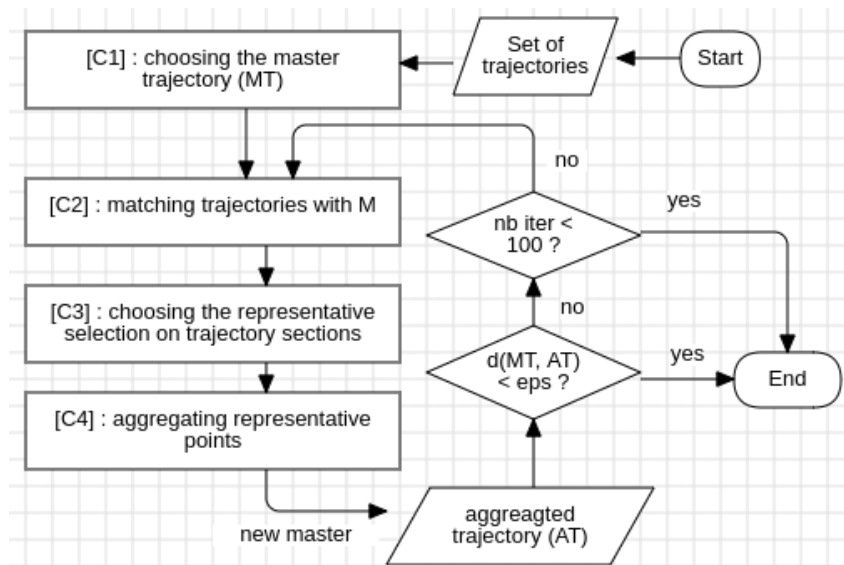
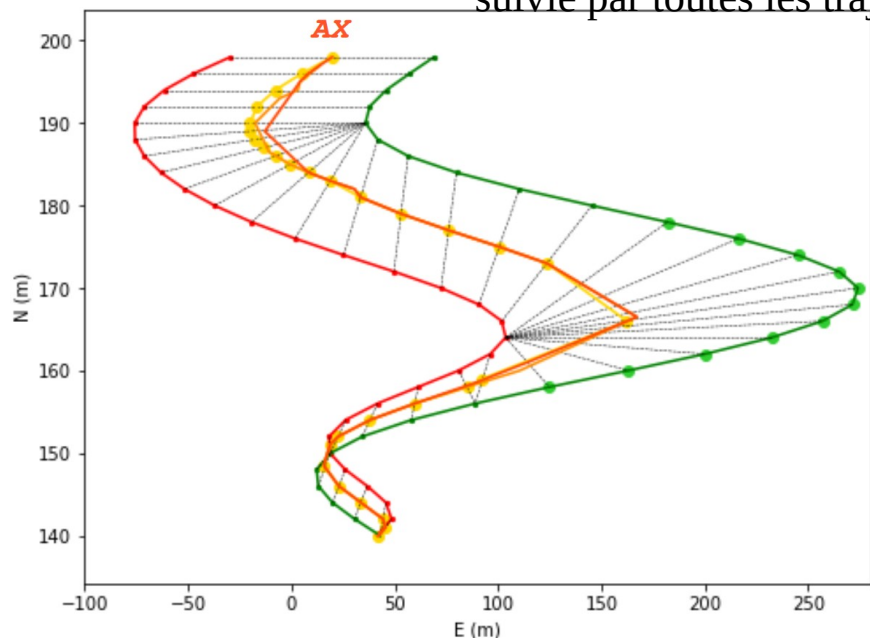
Un algorithme modulaire et itératif d'agrégation de trajectoires GNSS : MIAA

- Notre approche :**
- ~ Proposer un algorithme modulaire afin de calculer la trace agrégée
 - ~ Étudier les performances métrologiques de l'algorithme :
c'est-à-dire sa capacité à reconstruire avec précision la trajectoire commune suivie par toutes les trajectoires de l'échantillon

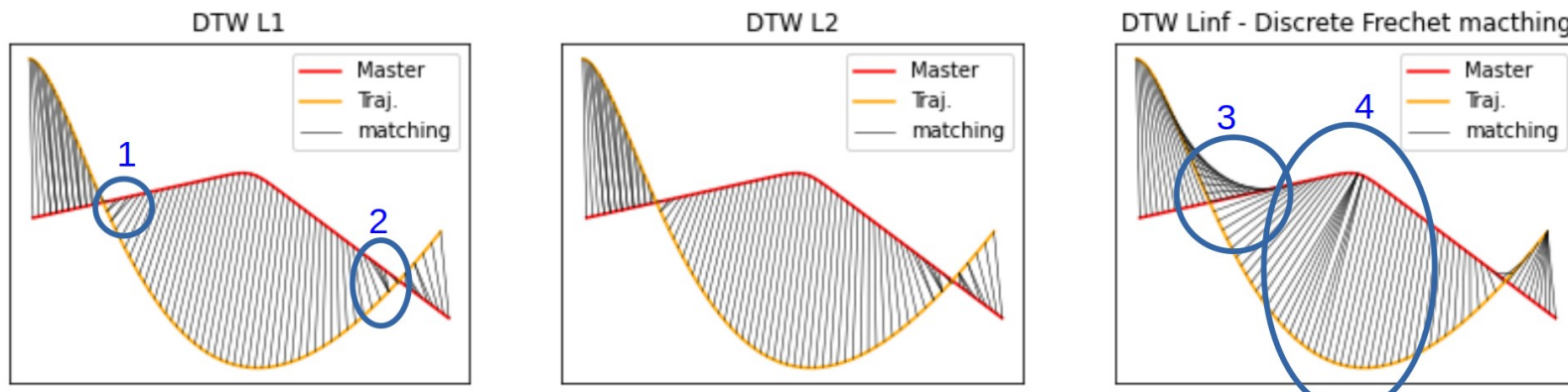


Un algorithme modulaire et itératif d'agrégation de trajectoires GNSS : MIAA

- Notre approche :**
- ~ Proposer un algorithme modulaire afin de calculer la trace agrégée
 - ~ Étudier les performances métrologiques de l'algorithme :
c'est-à-dire sa capacité à reconstruire avec précision la trajectoire commune suivie par toutes les trajectoires de l'échantillon



Appariement des trajectoires avec la trace Master



On s'appuie sur des algorithmes dont le calcul est une approche de programmation dynamique :

- distance de Fréchet discrète (utilisée par [1]) ,
- appariement par déformation temporelle dynamique (DTW muni d'une norme L_p).

Notons que la distance de Fréchet discrète est similaire, mais pas identique à DTW, puisque la distance discrète de Fréchet cherche à minimiser le maximum des distances entre les deux courbes, alors que L_p -DTW cherche à minimiser la somme de ces distances.

MIAA : modularité par généralisation naturelle

C1 : Choix de la trace Master :

Trace dont la longueur avoisine le plus la médiane des longueurs

Trace au hasard

Trace qui minimise la distance aux autres trajectoires

C2 : Algorithme d'appariement :

Appariement avec la distance discrète de Fréchet (DTW avec L_∞)

Appariement avec le plus proche voisin

Appariement avec DTW avec L_1 , L_2

C3 : Choix du point représentatif dans les liens d'appariement n-m :

Centroïde des points du cluster

Position médiane temporelle des observations

Point le plus éloigné de la trace Master

C4 : Agrégation des couples de points :

Médiane des coordonnées

Médiane géométrique (L_1)

Barycentre des coordonnées (L_2)

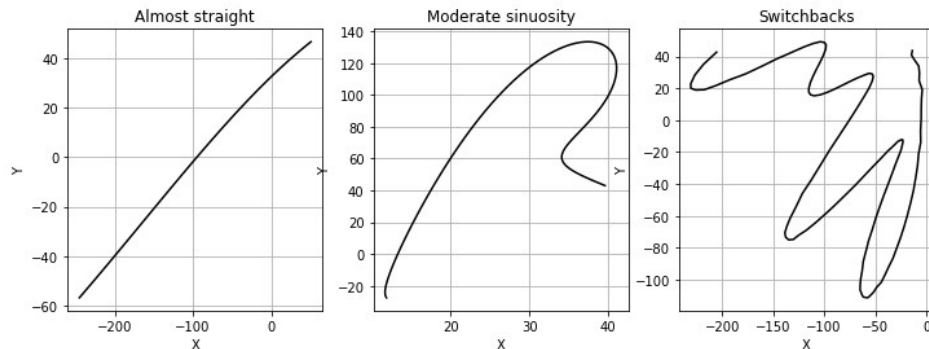
Centre cercle englobant (L_∞)

Options dans l'algo de [1]

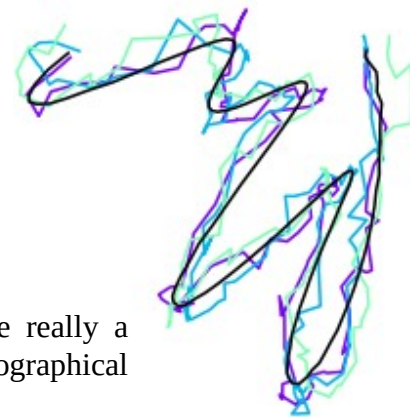
Analyse métrologique : Calibration

Trajectoires GNSS synthétiques réalistes

Constitution des données en entrée:
on propose 3 formes de sentier,
puis on génère N traces bruitées aléatoires,
avec $N \in \{2, 3, 4, 5, 6, 7, 10, 25, 50\}$



Composante	Amplitude	Portée	Sens physique
Gaussienne	$\sigma = 0.5 \text{ m}$	$\lambda = 100 \text{ m}$	Erreur de référencement, etc.
Exponentielle	$\sigma = 5 \text{ m}$	$\lambda = 20 \text{ m}$	Erreur GNSS, multi-trajets, etc.
Bruit blanc	$\sigma = 1 \text{ m}$	$\lambda = 0 \text{ m}$	Vibrations, Bruit électronique, etc



Y. Méneroux, I. Maidaneh Abdi, A. Le Guilcher & A.-M. Olteanu-Raimond, (2022). Is the radial distance really a distance ? An analysis of its properties and interest for the matching of polygon features. International of Geographical Information Science, 37(2), 438-475. <https://doi.org/10.1080/13658816.2022.2123487>

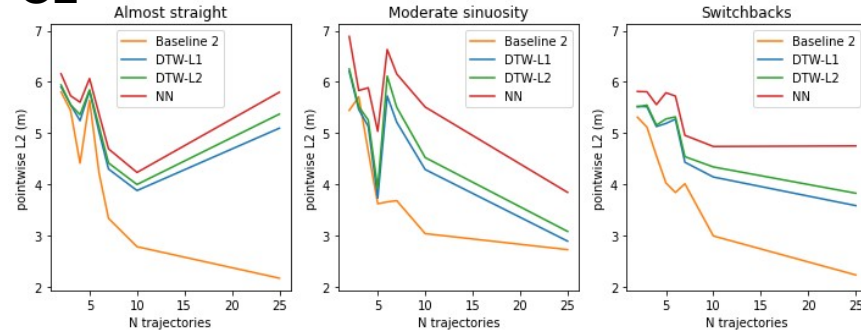
Calibration de l'algorithme : résultats

Approche : chaque option des composants de MIAA pris individuellement est évaluée en analysant les trajectoires agrégées à celles obtenues avec la configuration baseline utilisée dans [1].

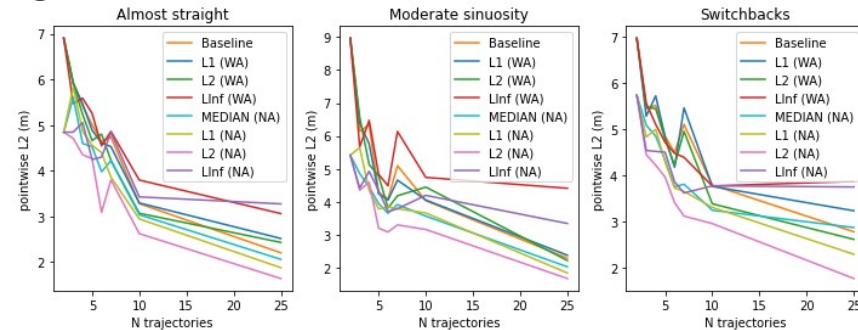
Critère de qualité Q: Mesure de l'erreur de position entre la vérité terrain simulée et la trajectoire agrégée.

1. On réplique chaque scénario 10 fois, puis on calcule la moyenne des résultats
 2. On ré-échantillonne la trace agrégée ainsi que la vérité terrain à 1 000 points
 3. On calcule la dist. pointwise L_2 (Err. quadratique moy)
- ♦ Sans contrainte spatiale pour C4
 - ♦ Convergence en position à partir de 20 trajectoires
 - ♦ Suite on prendra DTW plutôt que la distance de Fréchet

C2



C4



Analyse métrologique : Vitesse de convergence

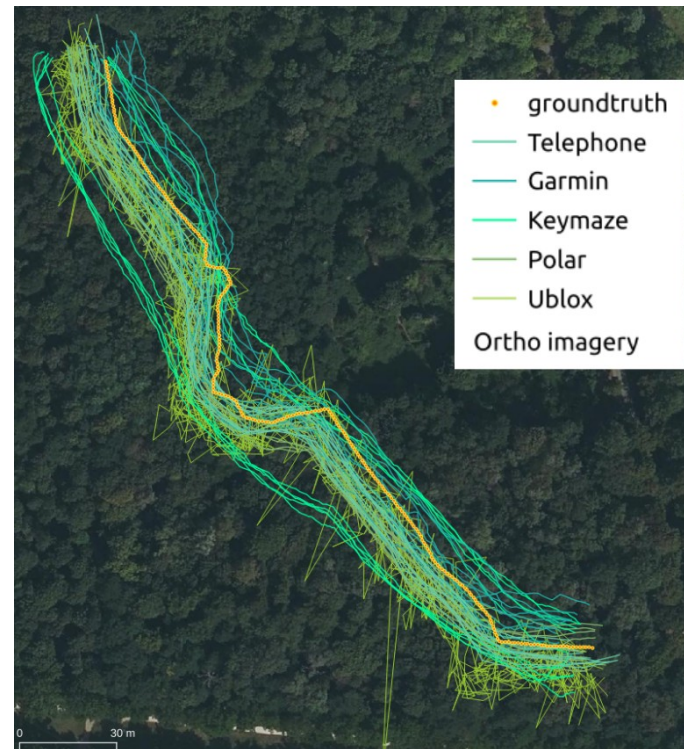
Données collectées

- 50 trajectoires, suivant le même chemin, collectées par 2 opérateurs, pour évaluer l'impact des capteurs sur la précision dans les forêts denses. <https://doi.org/10.57745/MOUSLS>



- La trace de vérité terrain a été obtenue via un levé topométrique sur 42 stations, géoréférencé par positionnement GNSS différentiel statique (précision planimétrique en RGF93 ~ 5 mm)

P. Calloch, B. Labbé, and L. Peseux. Établissement d'une méthode low-cost de vérité terrain pour l'étude de la précision de traces GNSS de randonneurs en forêt. Technical report, 2024. Projet d'initiation à la recherche, encadré par Emmanuel Clédât, Franck Tertre.

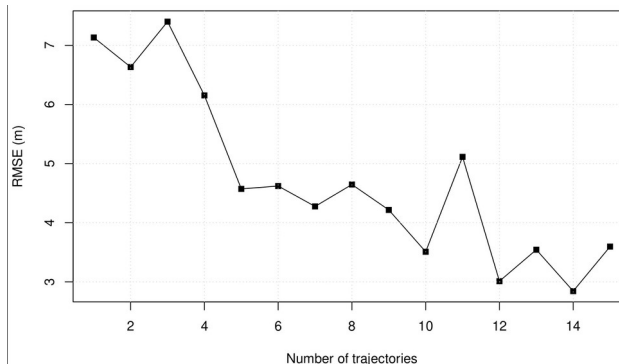


Vitesse de convergence

Approche: Déterminer le nombre de traces d'échantillons nécessaires pour que la trajectoire agrégée converge vers la vérité terrain.

Critère de qualité Q: Mesure de l'écart de forme

1. Aligner avec une transformation géométrique affine, la trace agrégée avec la trace de référence permet de s'affranchir des problèmes de position.
2. Ré-échantillonnage des traces à 1 000 points.
3. Calcul la distance au plus proche voisin pour chaque point des traces.

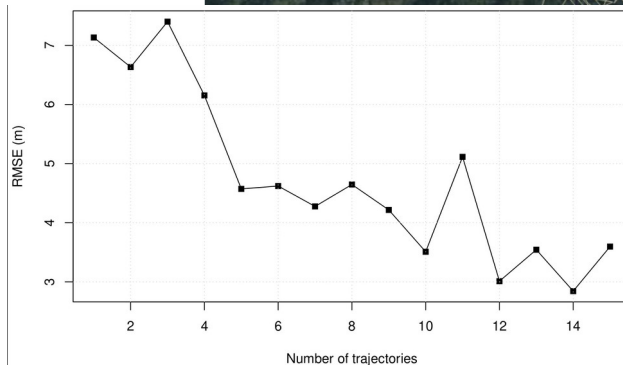
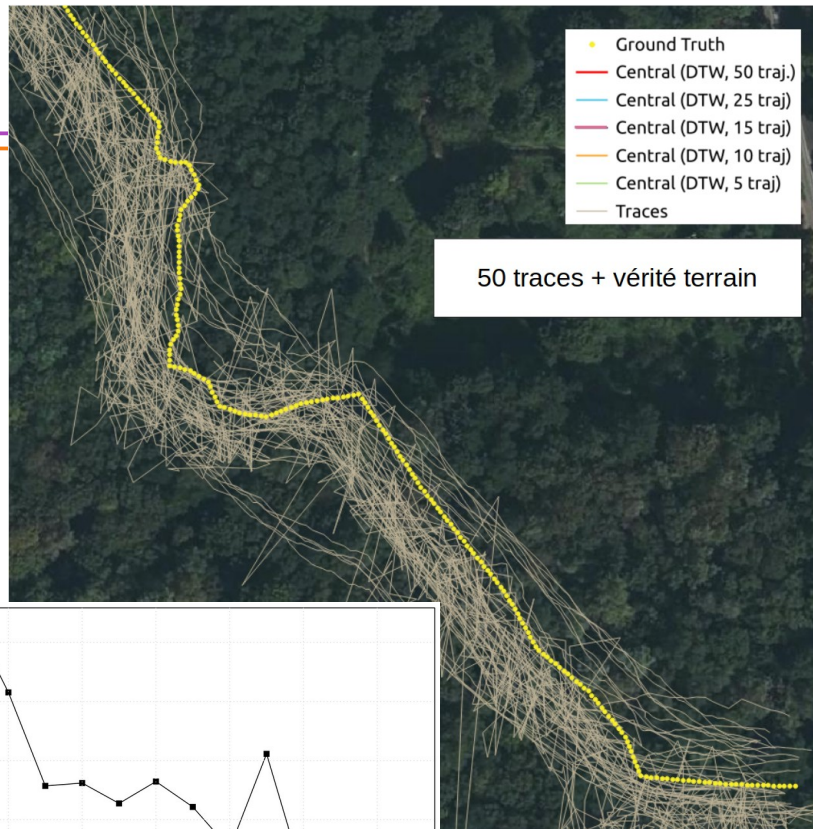


Vitesse de convergence

Approche: Déterminer le nombre de traces d'échantillons nécessaires pour que la trajectoire agrégée converge vers la vérité terrain.

Critère de qualité Q: Mesure de l'écart de forme

1. Aligner avec une transformation géométrique affine, la trace agrégée avec la trace de référence permet de s'affranchir des problèmes de position.
2. Ré-échantillonnage des traces à 1 000 points.
3. Calcul la distance au plus proche voisin pour chaque point des traces.

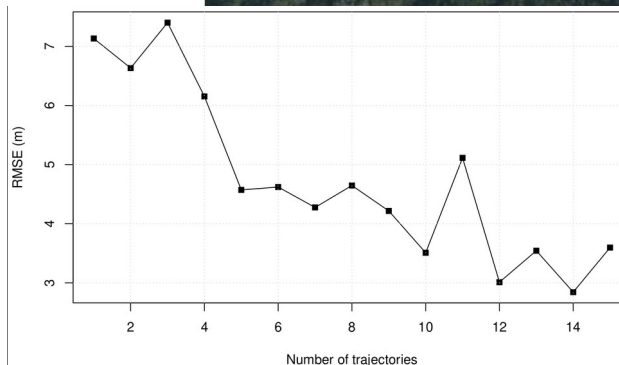
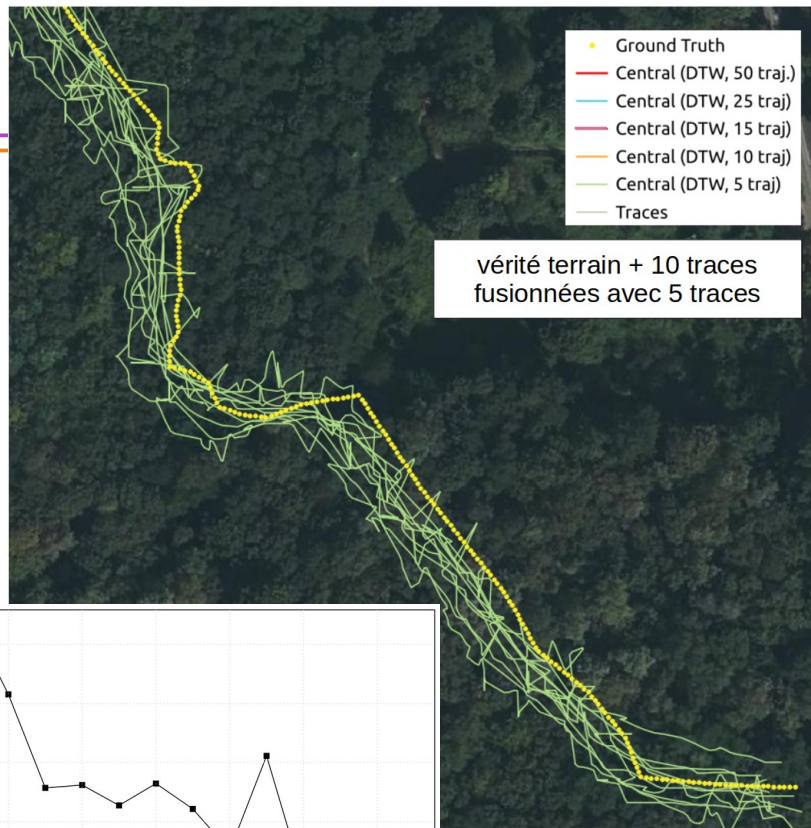


Vitesse de convergence

Approche: Déterminer le nombre de traces d'échantillons nécessaires pour que la trajectoire agrégée converge vers la vérité terrain.

Critère de qualité Q: Mesure de l'écart de forme

1. Aligner avec une transformation géométrique affine, la trace agrégée avec la trace de référence permet de s'affranchir des problèmes de position.
2. Ré-échantillonnage des traces à 1 000 points.
3. Calcul la distance au plus proche voisin pour chaque point des traces.

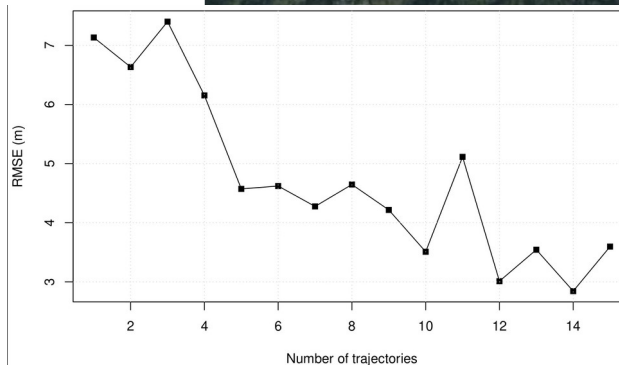
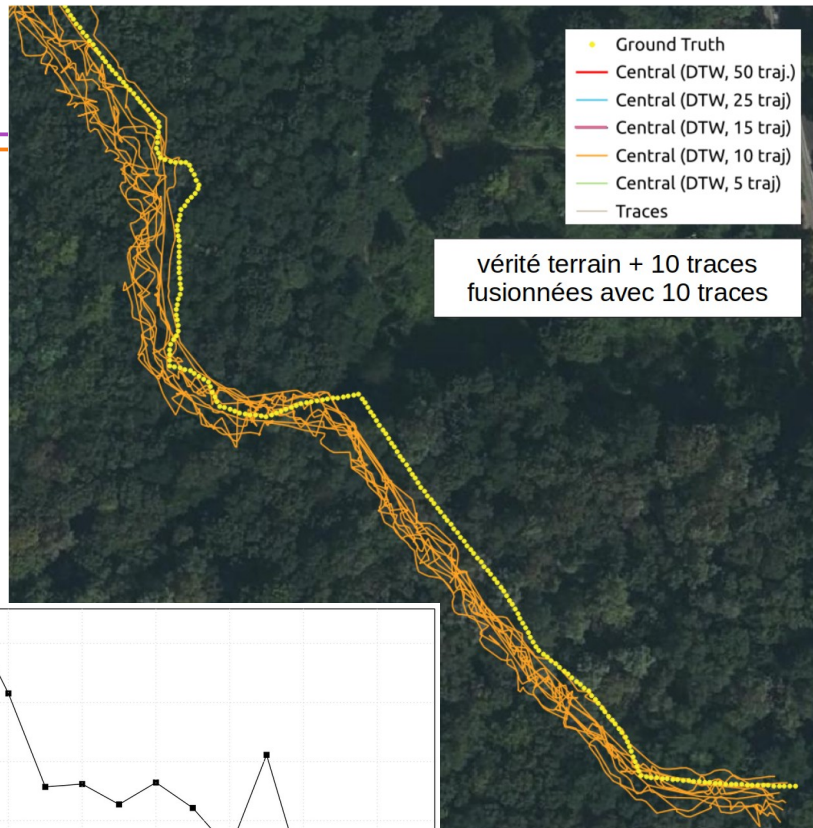


Vitesse de convergence

Approche: Déterminer le nombre de traces d'échantillons nécessaires pour que la trajectoire agrégée converge vers la vérité terrain.

Critère de qualité Q: Mesure de l'écart de forme

1. Aligner avec une transformation géométrique affine, la trace agrégée avec la trace de référence permet de s'affranchir des problèmes de position.
2. Ré-échantillonnage des traces à 1 000 points.
3. Calcul la distance au plus proche voisin pour chaque point des traces.

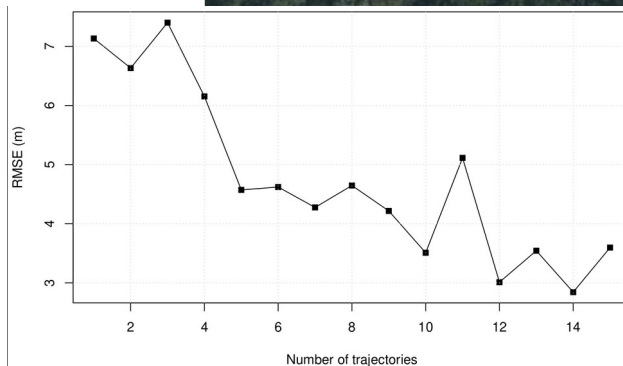
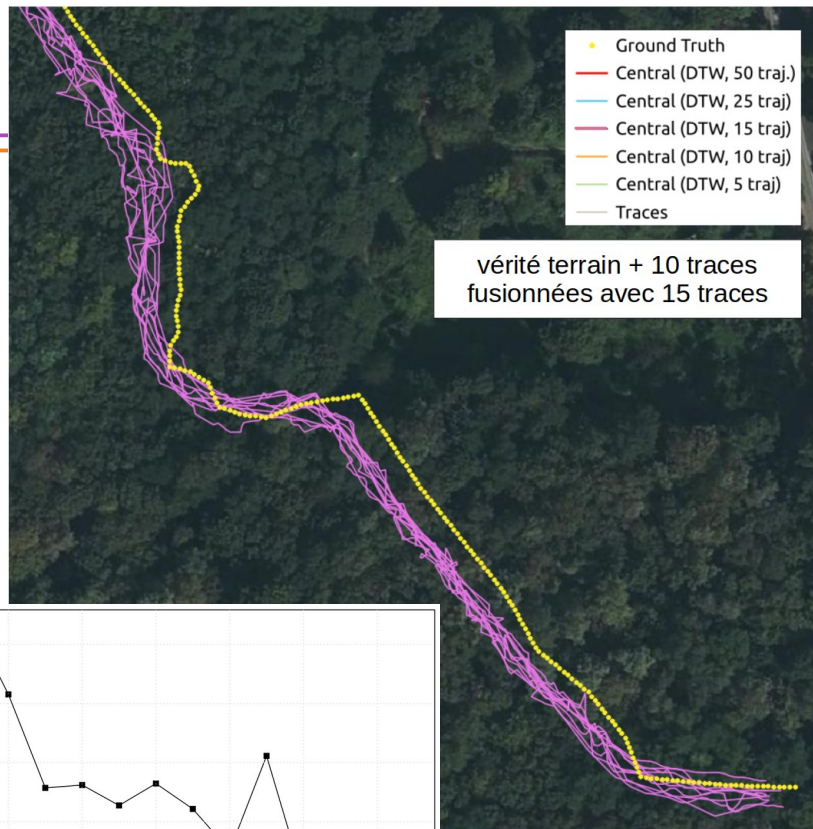


Vitesse de convergence

Approche: Déterminer le nombre de traces d'échantillons nécessaires pour que la trajectoire agrégée converge vers la vérité terrain.

Critère de qualité Q: Mesure de l'écart de forme

1. Aligner avec une transformation géométrique affine, la trace agrégée avec la trace de référence permet de s'affranchir des problèmes de position.
2. Ré-échantillonnage des traces à 1 000 points.
3. Calcul la distance au plus proche voisin pour chaque point des traces.

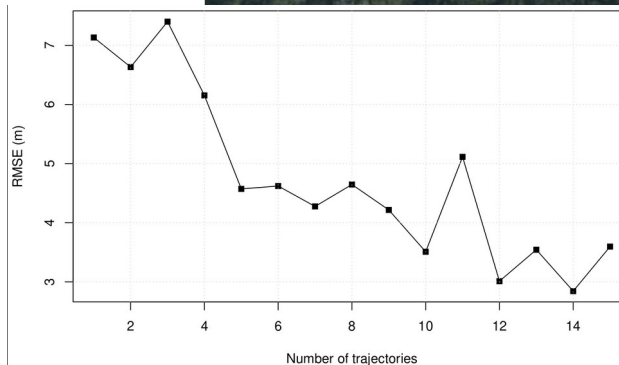
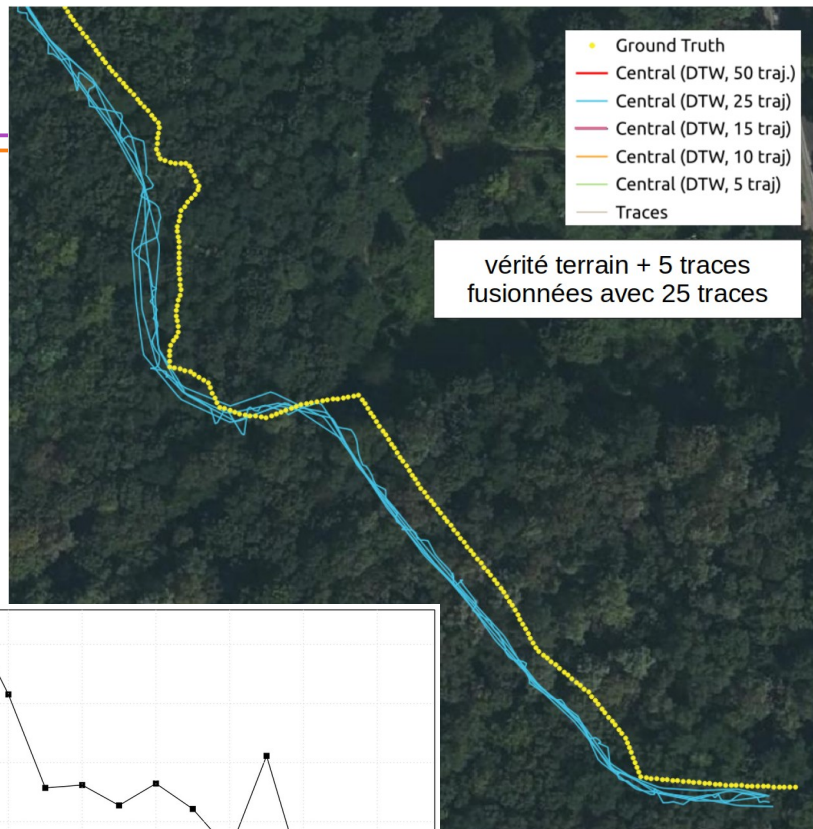


Vitesse de convergence

Approche: Déterminer le nombre de traces d'échantillons nécessaires pour que la trajectoire agrégée converge vers la vérité terrain.

Critère de qualité Q: Mesure de l'écart de forme

1. Aligner avec une transformation géométrique affine, la trace agrégée avec la trace de référence permet de s'affranchir des problèmes de position.
2. Ré-échantillonnage des traces à 1 000 points.
3. Calcul la distance au plus proche voisin pour chaque point des traces.

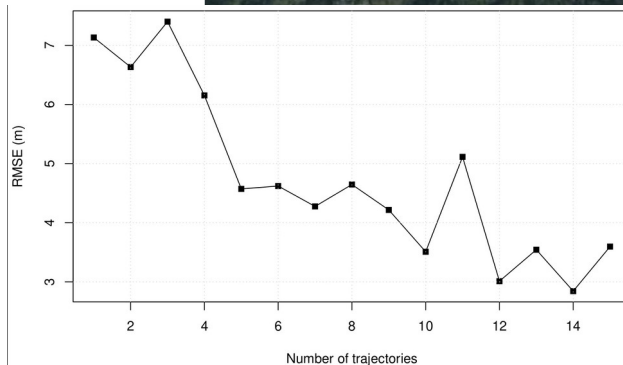
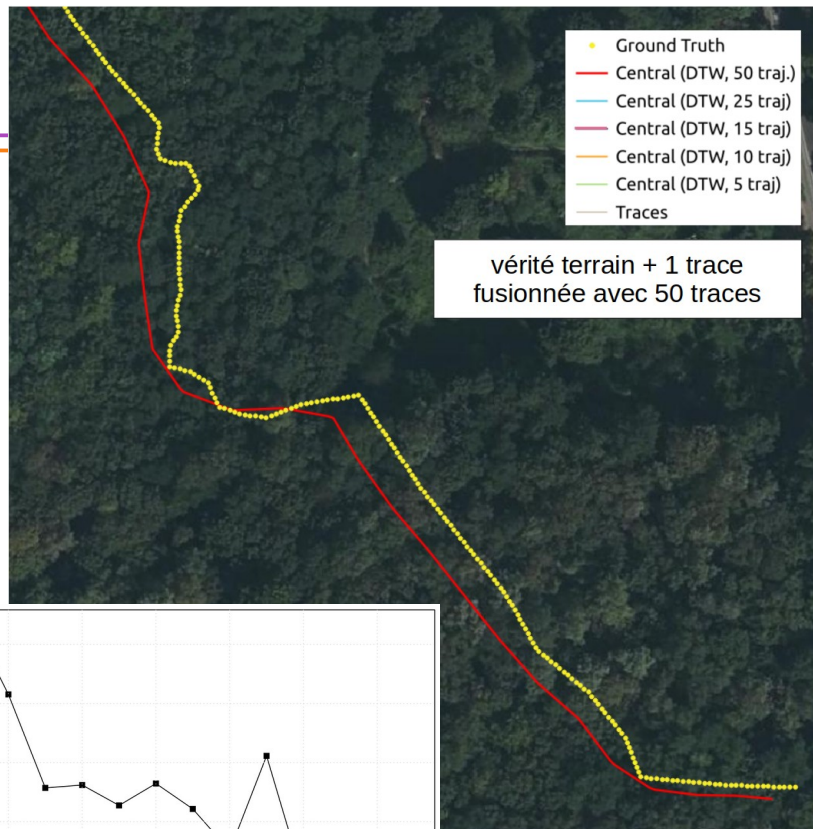


Vitesse de convergence

Approche: Déterminer le nombre de traces d'échantillons nécessaires pour que la trajectoire agrégée converge vers la vérité terrain.

Critère de qualité Q: Mesure de l'écart de forme

1. Aligner avec une transformation géométrique affine, la trace agrégée avec la trace de référence permet de s'affranchir des problèmes de position.
2. Ré-échantillonnage des traces à 1 000 points.
3. Calcul la distance au plus proche voisin pour chaque point des traces.



Application : Réseau de mobilité des activités sportives en zone de montagne

[travail en cours]

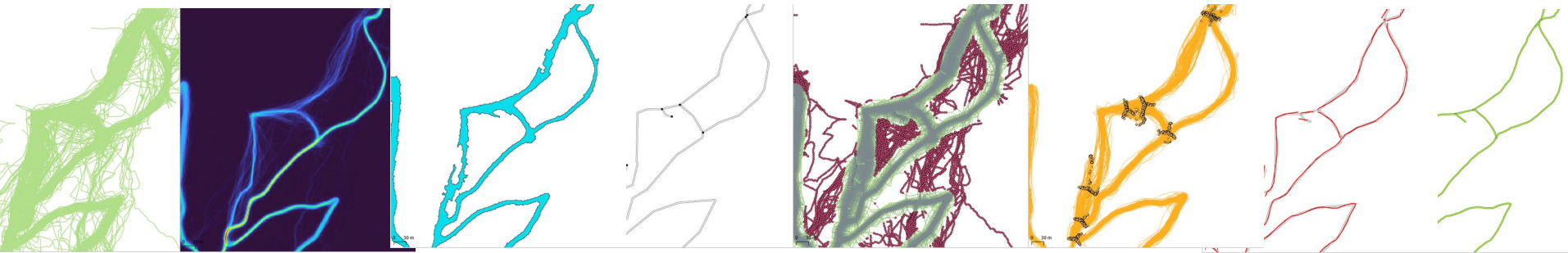
Passage au réseau de mobilité



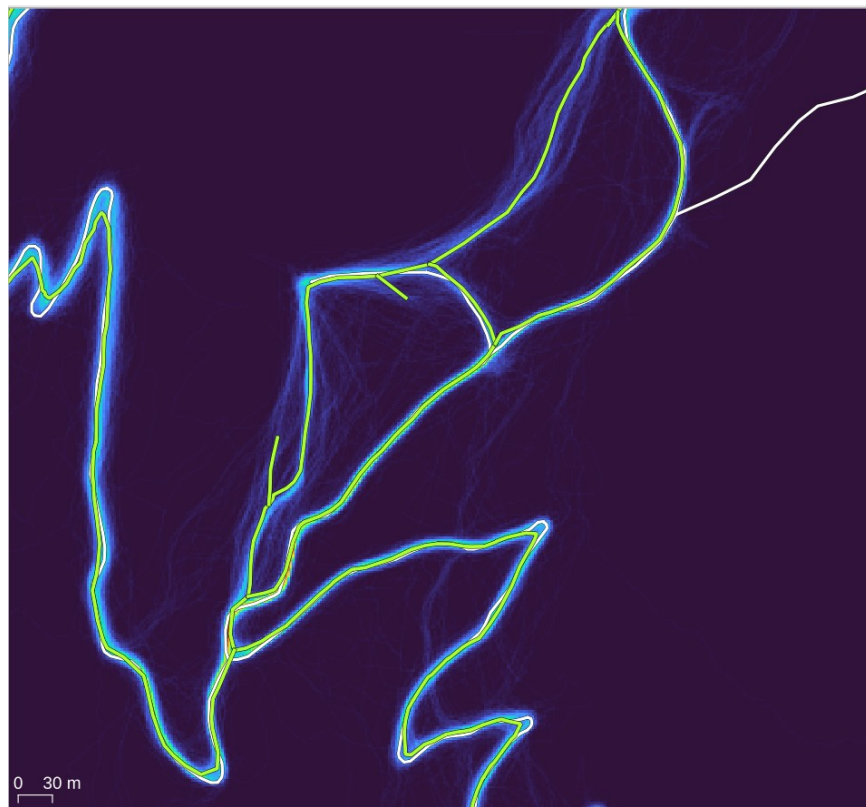
Pôle ressources national des sports de nature (PRNSN)

⇒ L'application Outdoorvision fournit des traces GPS issus de services et d'objets connectés des pratiquants de sports et loisirs de nature

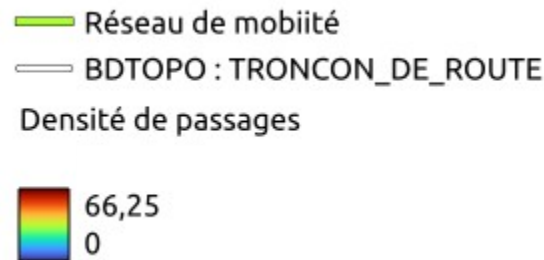
- Calcul d'une carte de densité à partir des traces GNSS
- De la vectorisation on extrait une ligne centrée $\equiv$ arc de la topologie
- Attribue les points des traces brutes à chaque arc de la topologie
- Reconstitue les bons morceaux de traces candidats pour chaque arc de la topologie
- Agrégation des morceaux de traces
- Conflation des traces fusionnées afin d'obtenir un réseau de mobilité



Réseau de mobilité : premier résultat



- Ce pipeline va nécessiter une deuxième itération pour traiter les points non recalés
- Les traces candidates ne sont pas aussi « belles » que celles des contributeurs publiées sur des sites internet



Conclusion

- ♦ Implémentation et appropriation d'un algorithme d'agrégation de trajectoires pour la recherche dans MEIG
- ♦ Appliqué dans un pipeline afin d'avoir les géométries des mobilités humaines
- ♦ Travaux en étude de pré-industrialisation à l'IGN pour la mise à jour des tronçons de route de la BDTOPO
- ♦ Des travaux en sciences ouvertes :



Multi-sensors and Ground
Truth Tracks (MOUSLS)



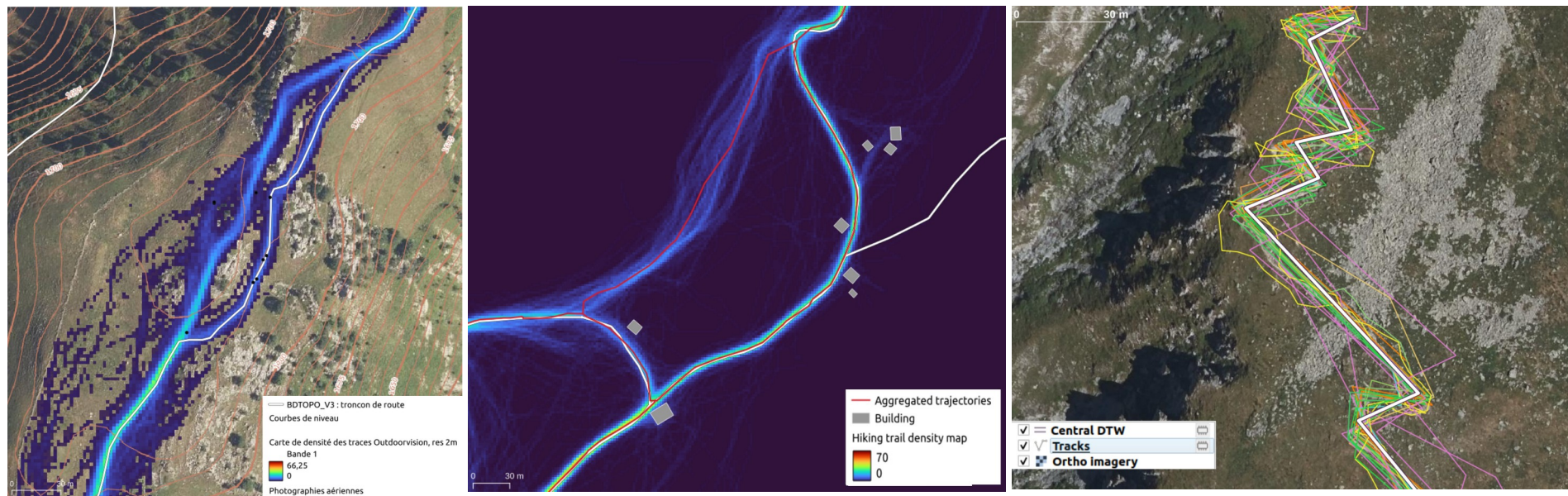
Tracklib

A Python library that provides a variety of tools, operators and functions to manipulate GNSS trajectories.

Perspectives

- ♦ Pipeline configurable : on peut générer différents types de réseau de mobilité,
- ♦ en fonction des filtres appliqués sur les traces en entrées.

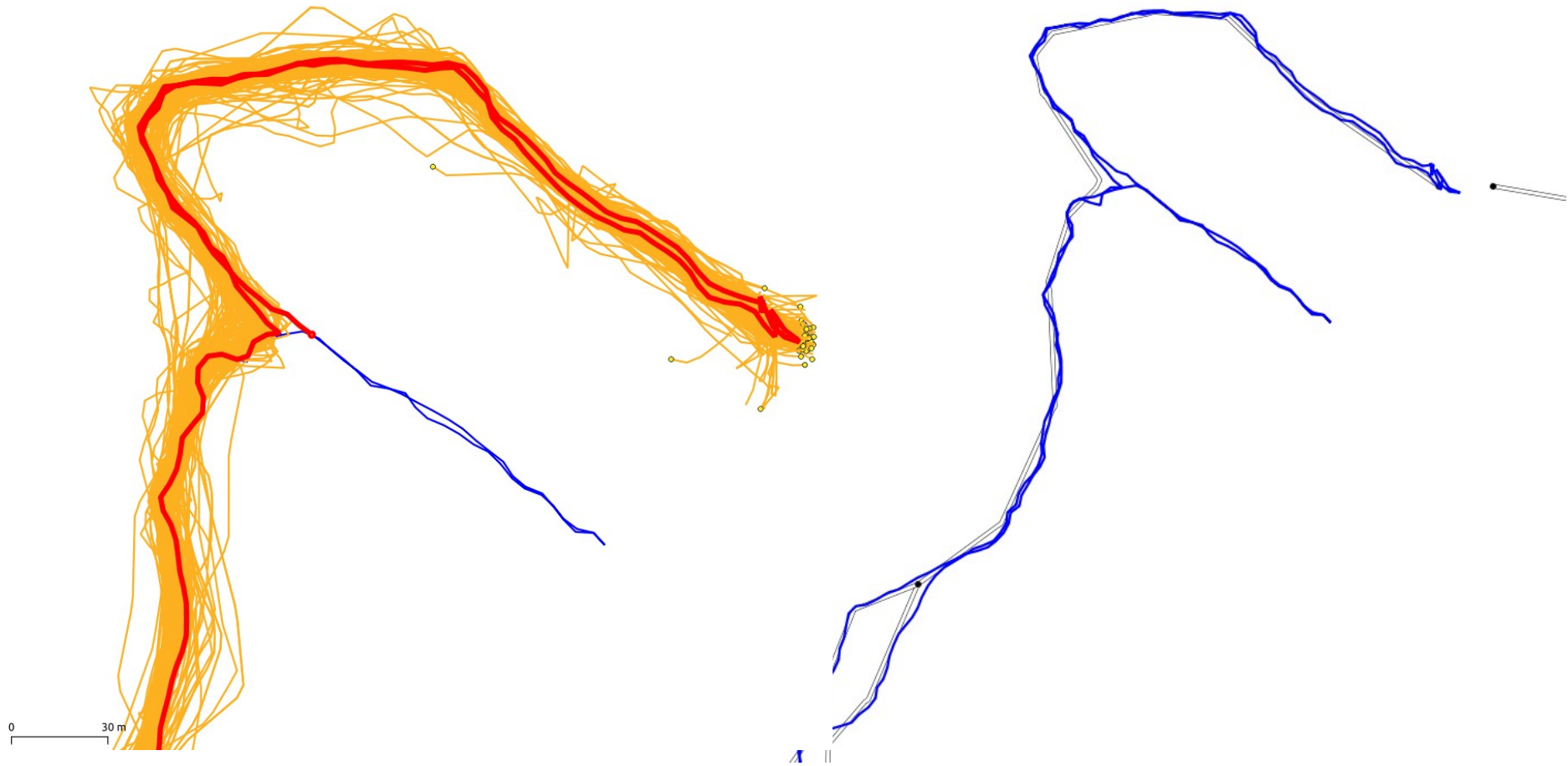
- ♦ Estimer la représentativité :
 - du réseau de mobilité d'un point de vue géométrique et spatial
 - des données d'observation de fréquentation humaine
/ à la fréquentation réelle

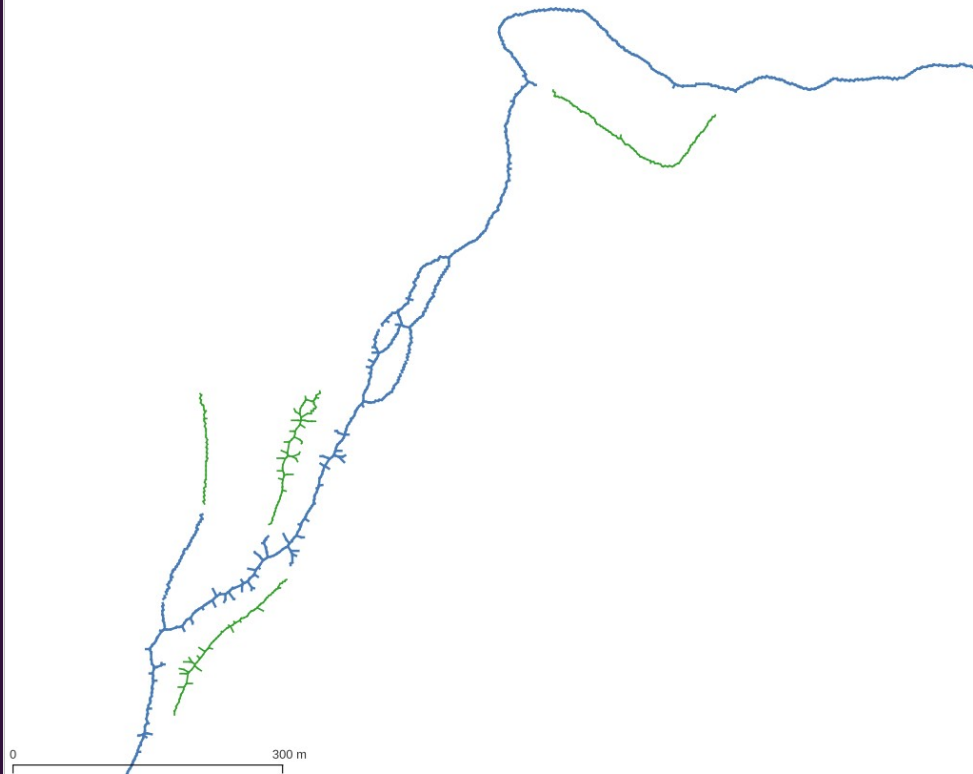
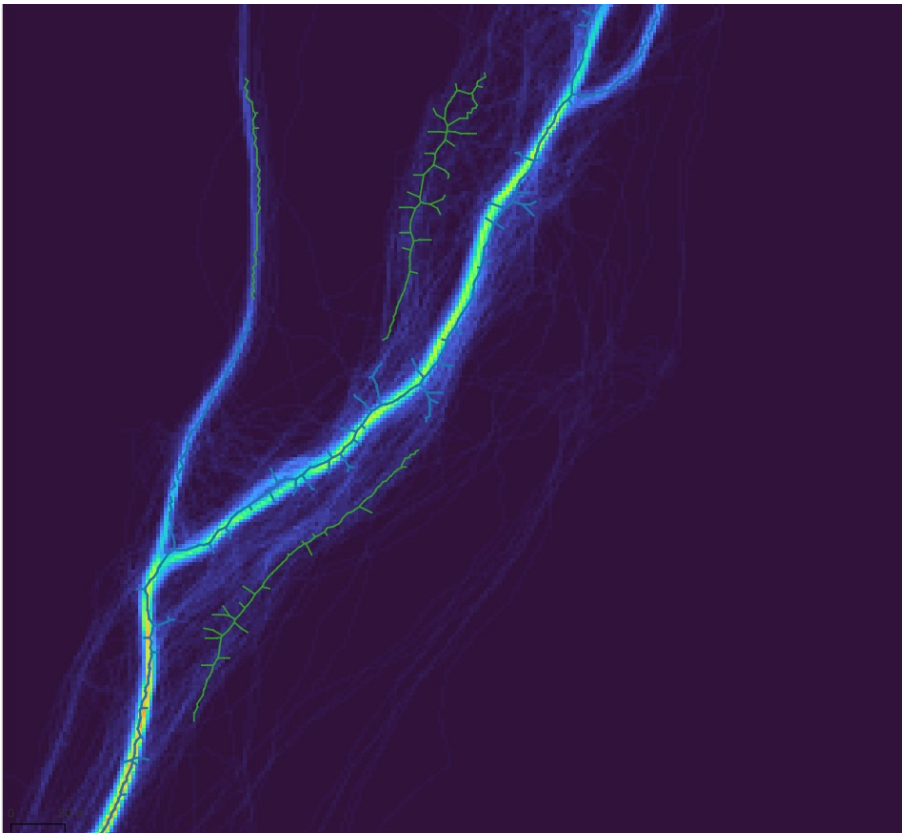


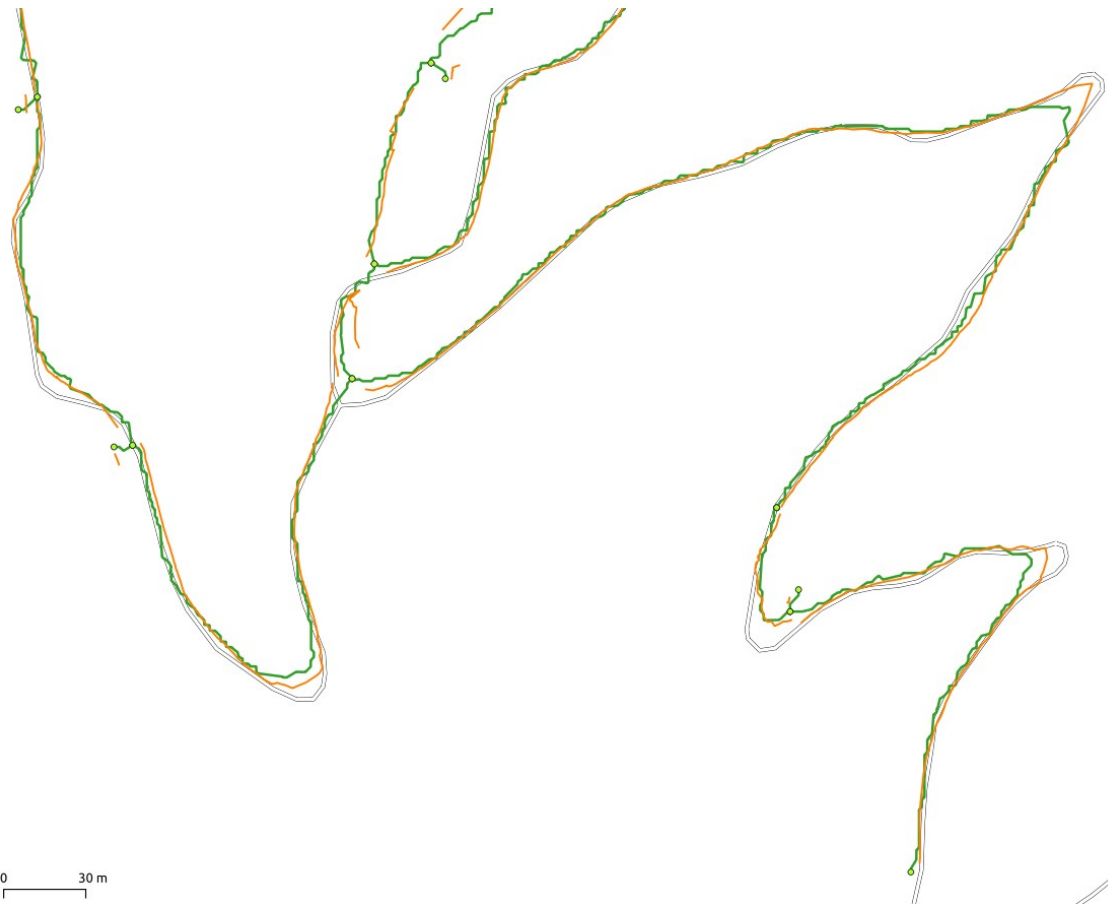
Merci pour votre attention

Références

- Marie-Dominique van Damme, Yann Méneroux, Ana-Maria Olteanu-Raimond. A metrological analysis of a modular and iterative aggregation algorithm of GNSS trajectories. SIGSPATIAL '24: The 32nd ACM International Conference on Advances in Geographic Information Systems, ACM SIGSPATIAL, Oct 2024, Atlanta (GA), United States. pp.633 - 636 {10.1145/3678717.3691325}
- Marie-Dominique van Damme, Yann Méneroux, Ana-Maria Olteanu-Raimond. An extensive analysis and calibration of the Modular Aggregation Algorithm across three categories of for GNSS trajectories data sources. Laboratoire sciences et technologies de l'information géographique. 2025. (10.48550/arXiv.2512.17919)
- Y. Méneroux, I. Maidaneh Abdi, A. Le Guilcher & A.-M. Olteanu-Raimond, (2022). Is the radial distance really a distance ? An analysis of its properties and interest for the matching of polygon features. International of Geographical Information Science, 37(2), 438-475.
- Trajectoires Médiannes. Laurent Étienne et Thomas Devogele. 2014. *4ème conférence Extraction et Gestion des Connaissances, Ateliers fouille de données spatiales et temporelles & construction, enrichissement et exploitation de ressources géographiques pour l'analyse de données*. Rennes, France.
- P. Calloch, B. Labbé, and L. Peseux. Établissement d'une méthode low-cost de vérité terrain pour l'étude de la précision de traces GNSS de randonneurs en forêt. Technical report, 2024. Projet d'initiation à la recherche, encadré par Emmanuel Clédat, Franck Tertre.







Fusions
reseau4
TRONCON_DE_ROUTE

0 30 m