



Projet Intégratif ITIneraire

Arrigoni Ambroise, Fougeray Paul, Sanson Dylan, Sourdrille Nathan,
Zouaghi Rayan

ITI3 groupe 1



Titre :

Projet Intégratif ITIneraire

Matières :

Capteurs et Statistiques

Période du projet :

Mars-Mai 2025

Groupe de projet :

Groupe 9

Participant(s) :

Arrigoni Ambroise

Fougeray Paul

Sanson Dylan

Sourdrille Nathan

Zouaghi Rayan

Superviseur(s) :

Condat Robin

Rogozan Alexandrina

Nombre de pages : 18

Date de réalisation :

29 avril 2025

Résumé:

L'objectif de ce projet d'intégration est de concurrencer l'application mobile Strava, dédiée pour l'enregistrement des activités sportives par GPS. Pour cela, vous devrez concevoir et développer un système d'acquisition permettant l'estimation de trajectoire d'un parcours fait à pied.

Table des matières

1	Introduction	2
2	Présentation des capteurs à notre disposition	3
2.1	Description et fonctionnement	3
2.1.1	GPS	3
2.1.2	Accéléromètre	3
2.1.3	Gyroscope	3
2.1.4	Magnétomètre	3
2.2	Avantages et inconvénients	3
2.3	Sources de bruitages et/ou défauts techniques	4
2.4	Calibration effectuée	4
2.4.1	Démarche	4
2.4.2	Expérimentations	4
2.4.3	Résultats	4
2.5	Choix des paramètres d'acquisition	4
2.6	Filtrage des signaux bruts	4
2.6.1	Présentation du filtre de Kalman	5
2.6.2	Application dans notre cas	5
3	Analyse des performances du système d'acquisition	6
3.1	Méthodologie pour la détermination du paramétrage du système d'acquisition	7
3.2	Description et analyse du choix des méthodes statistiques avec les résultats obtenus	7
3.3	Analyse des résultats de tracking obtenus	7
3.3.1	Mouvement extérieur 1	7
3.4	Analyse des résultats obtenus en cas de défaillance capteur	10
3.4.1	Acquisition immobile extérieur 1	10
3.4.2	Acquisition immobile extérieur 2	13
4	Conclusion	16
4.1	Citations et références	16
	Bibliographie	17
	Table des figures	18

Chapitre 1

Introduction

L'objectif principal de ce projet est de concevoir un capteur de position destiné à une application de type STRAVA, dédiée au suivi et à l'analyse des activités sportives en extérieur. Ce dispositif sera constitué de plusieurs capteurs intégrés, notamment un GPS, un accéléromètre, un gyroscope et un magnétomètre. L'intégration de ces différents capteurs vise à fournir des données précises et fiables sur la position, le mouvement et l'orientation de l'utilisateur.

Ce projet s'inscrit dans le cadre de notre formation et constitue une mise en pratique concrète des connaissances théoriques acquises en cours, notamment en matière de capteurs. Il offre également l'opportunité d'appliquer des outils mathématiques, en particulier des méthodes statistiques avancées. À ce titre, l'un des axes majeurs de notre travail sera l'utilisation du filtre de Kalman, un algorithme de filtrage permettant de fusionner efficacement les données issues de capteurs multiples, tout en tenant compte de leur incertitude respective.

Au-delà des aspects techniques, ce projet mettra en valeur le travail en équipe, la répartition des tâches, la collaboration entre membres et la capacité à mener un projet technique de bout en bout. Il s'agit donc d'un exercice complet, à la fois technique, méthodologique et collaboratif, nous préparant à des projets similaires dans un cadre professionnel.

Chapitre 2

Présentation des capteurs à notre disposition

Cette partie a pour but de présenter les capteurs que nous avons utilisés lors des travaux pratiques.

2.1 Description et fonctionnement

2.1.1 GPS

Le capteur GPS (Global Positioning System) permet d'obtenir la position géographique d'un objet en temps réel à l'aide de signaux satellites. Il fournit typiquement des données de latitude, longitude, altitude, vitesse et temps. Ce capteur est essentiel pour le suivi de trajectoire.

2.1.2 Accéléromètre

L'accéléromètre mesure les accélérations linéaires suivant les trois axes X, Y et Z. Il permet de détecter les mouvements, les chocs, et d'estimer l'orientation d'un objet (par exemple, inclinaison) lorsqu'il est combiné avec d'autres capteurs.

2.1.3 Gyroscope

Le gyroscope mesure la vitesse angulaire de rotation autour des trois axes. Il est souvent utilisé pour suivre l'orientation d'un objet en mouvement, en particulier dans les systèmes d'asservissement ou de navigation inertielle.

2.1.4 Magnétomètre

Le magnétomètre détecte le champ magnétique terrestre et fonctionne comme une boussole numérique. Il permet de déterminer l'orientation absolue par rapport au nord magnétique. Il est souvent combiné au gyroscope pour améliorer la précision de l'orientation.

2.2 Avantages et inconvénients

Chaque capteur présente des avantages et des limites :

- **GPS** : Bonne précision sur la position à grande échelle, mais latence élevée et faible fréquence d'échantillonnage. Inefficace en intérieur.
- **Accéléromètre** : Précis pour les mouvements rapides, mais sensible au bruit et aux erreurs d'intégration.

- **Gyroscope** : Très réactif pour détecter les rotations, mais dérive dans le temps sans recalibrage.
- **Magnétomètre** : Utile pour connaître l'orientation absolue, mais perturbé par les champs magnétiques ambiants.

2.3 Sources de bruitages et/ou défauts techniques

Les capteurs sont sujets à différents types de bruits :

- **GPS** : erreurs dues à la météo, aux obstacles (bâtiments), et aux multipaths.
- **Accéléromètre et gyroscope** : bruit thermique, erreurs de biais, et dérive.
- **Magnétomètre** : perturbations électromagnétiques, présence de métaux ferromagnétiques proches.

2.4 Calibration effectuée

2.4.1 Démarche

La calibration vise à réduire les erreurs systématiques. Pour l'accéléromètre et le gyroscope, nous avons mesuré les valeurs à l'arrêt afin de corriger les biais.

- **GPS** : Nous avons paramétré le GPS de telle sorte que `MODE_GNSS = GPS_BEIDOU_GLONASS`. Cela permet de bénéficier d'une couverture satellite plus dense et plus stable, réduisant ainsi les pertes de signal et améliorant la précision de la position, notamment en milieu urbain ou boisé. Cette configuration maximise le nombre de satellites visibles en continu. Par exemple, lors de nos acquisitions, notre GPS détectait une trentaine de satellites dans de bonnes conditions.
- **Accéléromètre** : Deux paramètres doivent être ajustés : la plage de mesure et la fréquence d'échantillonnage. La plage de mesure permet d'adapter la sensibilité du capteur aux accélérations attendues ($\pm 2g$, $\pm 4g$, etc.). Une plage trop grande réduit la précision sur de petites accélérations, tandis qu'une plage trop petite peut entraîner une saturation. La fréquence d'échantillonnage permet de suivre des variations rapides du mouvement : une fréquence trop basse peut lisser ou perdre des événements rapides.
- **Gyroscope** : Très réactif pour détecter les rotations, mais sujet à la dérive sans recalibrage. Nous avons ajusté deux paramètres : la plage de mesure (en $^{\circ}/s$) pour adapter le capteur aux vitesses angulaires attendues, et la fréquence d'échantillonnage pour capturer les variations rapides de rotation.
- **Magnétomètre** : Utile pour connaître l'orientation absolue, mais sensible aux perturbations magnétiques ambiantes. Deux paramètres ont été considérés : la fréquence d'échantillonnage et la plage de mesure. Un calibrage manuel a également été effectué par des mouvements circulaires (en forme de 8) pour linéariser la réponse.
- **LIDAR** : Même si nous ne l'avons pas utilisé dans ce projet, nous avons observé en travaux pratiques que certains paramètres influencent ses performances, notamment les angles de balayage : `MIN_ANGLE` et `MAX_ANGLE`, qui permettent de concentrer la mesure sur une zone d'intérêt.

2.4.2 Expérimentations

Nous avons relevé les valeurs brutes en réalisant à chaque fois le même parcours en extérieur. Des tests répétés ont été effectués pour valider la stabilité des coefficients de correction.

- **GPS** : Grâce au mode multi-constellation (GPS_BEIDOU_GLONASS), nous avons constaté une excellente stabilité du signal, avec un nombre constant de satellites visibles. Les trajectoires étaient plus lisses et moins sujettes aux discontinuités.
- **Accéléromètre** : Nous avons réalisé 20 acquisitions en modifiant progressivement les couples plage de mesure / fréquence d'échantillonnage. Ne disposant pas de référence externe précise (comme un téléphone ou un système optique), nous avons comparé les données entre elles pour détecter les combinaisons les plus stables. *Pour cela, un test statistique comme l'analyse de la variance (ANOVA) ou le test de Kruskal-Wallis (si les données ne sont pas normales) peut être utilisé pour comparer la dispersion des mesures en fonction des couples de paramètres. Cela permet d'identifier le réglage offrant la meilleure cohérence.*
- **Gyroscope** : Les biais ont été mesurés à l'arrêt pour chaque axe (X, Y, Z), puis soustraits dynamiquement durant les acquisitions. Cela a permis de réduire la dérive constatée au fil du temps.
- **Magnétomètre** : Le calibrage manuel a été effectué par des mouvements de type "8" dans l'espace pour estimer et corriger les biais internes dus aux perturbations magnétiques. Les résultats montrent une amélioration notable de la cohérence des mesures d'orientation.
- **LIDAR** : Lors des TPs, nous avons observé que restreindre l'angle de balayage permet de concentrer l'analyse sur une zone précise (par exemple un seul côté du robot), ce qui peut réduire les données inutiles et améliorer la réactivité du traitement.

2.4.3 Résultats

Les données corrigées présentent une réduction notable du biais et une meilleure cohérence entre les capteurs. Lors des déplacements rectilignes ou des rotations contrôlées, les trajectoires obtenues sont plus fluides et précises. L'utilisation de constellations multiples pour le GPS s'est révélée particulièrement efficace, et le recalibrage des capteurs inertiels a permis de limiter les dérives et d'obtenir une estimation de mouvement plus fiable.

2.5 Choix des paramètres d'acquisition

Les paramètres ont été choisis pour équilibrer précision et consommation :

- GPS : 1 Hz, suffisant pour les déplacements lents.
- Accéléromètre et gyroscope : 50 Hz pour bien suivre les mouvements.
- Magnétomètre : 10 Hz, suffisant pour détecter l'orientation.

2.6 Filtrage des signaux bruts

Pour filtrer nos données, nous avons mis en place le filtre de Kalman.

2.6.1 Présentation du filtre de Kalman

Le filtre de Kalman est un algorithme récursif d'estimation d'état, largement utilisé dans les systèmes de navigation, de robotique et de traitement du signal. Il permet de combiner les mesures provenant de différents capteurs tout en tenant compte de leurs incertitudes respectives, afin d'obtenir une estimation plus fiable et plus précise de la variable d'intérêt (position, vitesse, orientation, etc.).

Le principe du filtre de Kalman repose sur deux étapes principales :

- **Prédiction** : à partir du modèle dynamique du système, le filtre prédit l'état futur et son incertitude.
- **Mise à jour (correction)** : lorsque de nouvelles mesures sont disponibles, le filtre corrige son estimation en fonction de l'erreur observée entre la prédiction et la mesure réelle.

Mathématiquement, le filtre de Kalman repose sur l'hypothèse que les erreurs de mesure et les incertitudes sont de nature gaussienne (bruit blanc) et que le système peut être modélisé de manière linéaire. Pour des systèmes non linéaires, des variantes comme le filtre de Kalman étendu (EKF) ou le filtre de Kalman non linéaire (UKF) sont utilisées.

2.6.2 Application dans notre cas

Dans notre projet, le filtre de Kalman a été utilisé pour fusionner les données de l'accéléromètre et du gyroscope. L'accéléromètre fournit une estimation de l'orientation à long terme mais bruitée, tandis que le gyroscope offre des mesures plus stables à court terme mais sujettes à la dérive. Le filtre de Kalman permet de combiner ces deux sources d'information pour obtenir une estimation de l'orientation à la fois stable et précise.

Cette fusion permet de limiter les effets des bruits haute fréquence de l'accéléromètre et de compenser la dérive du gyroscope, ce qui est essentiel pour une utilisation fiable des capteurs dans un système embarqué.

Chapitre 3

Analyse des performances du système d'acquisition

3.1 Méthodologie pour la détermination du paramétrage du système d'acquisition

3.2 Description et analyse du choix des méthodes statistiques avec les résultats obtenus

3.3 Analyse des résultats de tracking obtenus

3.3.1 Mouvement extérieur 1

Comparaison des trajets

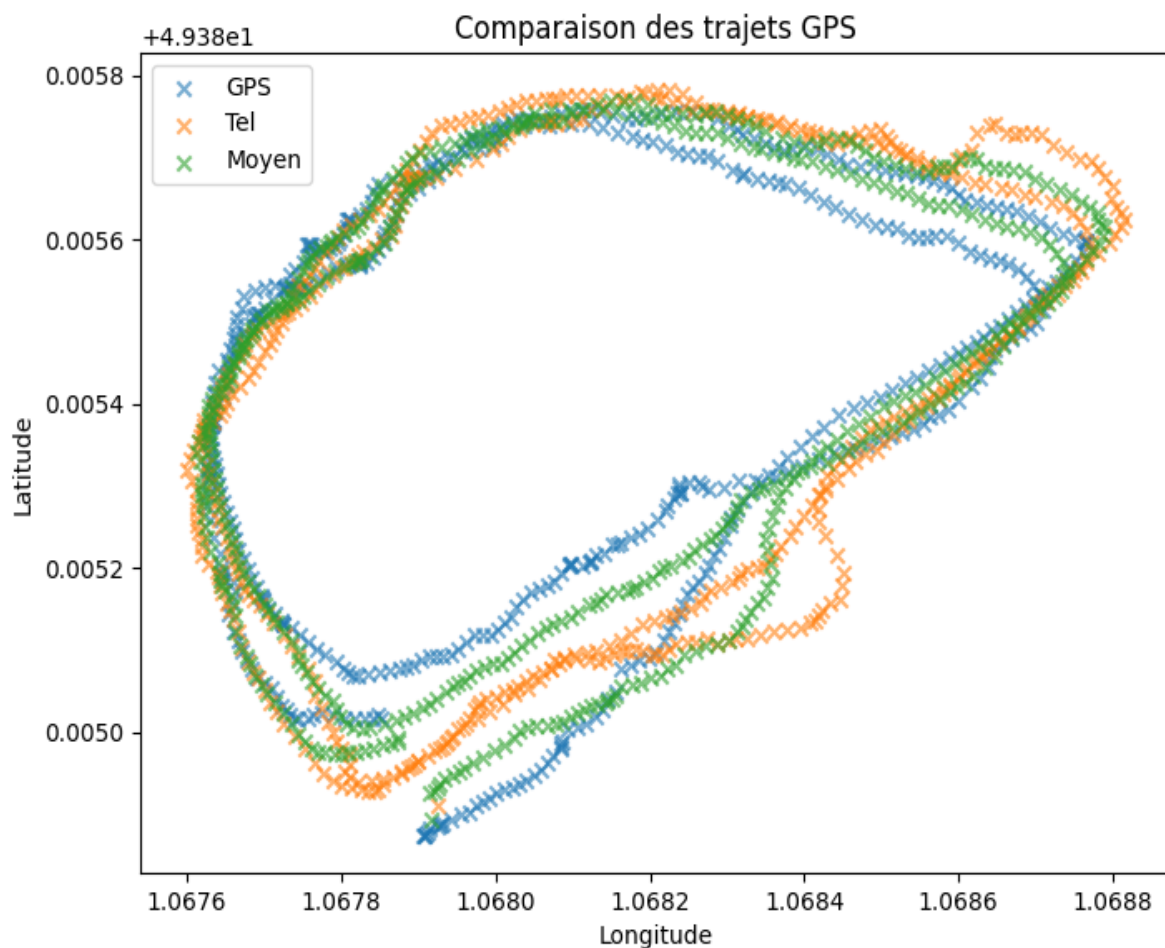


Figure 1 : Comparaison trajet mouvement extérieur 1 (Gps vs Téléphone)

Dans cet exemple, on a fait deux tours à l'extérieur et on remarque qu'en prenant les données du téléphone comme repère. Le GPS qu'on utilise n'est pas trop mauvais (FIXEZ ÇA JE DIS DE LA MERDE).

Comparaison latitude et longitude

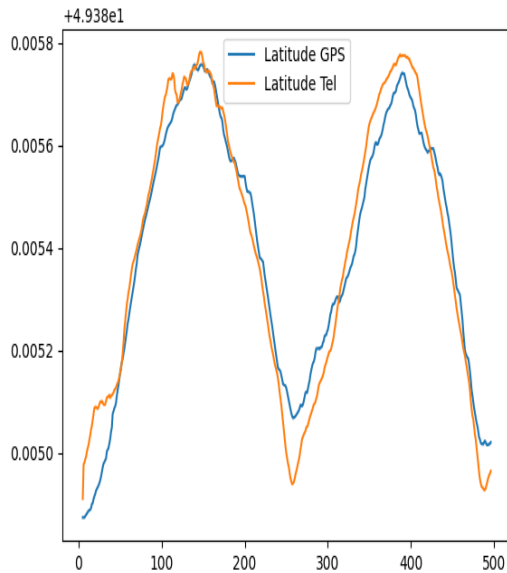


Figure 2 : Comparaison latitude (Gps vs Téléphone)

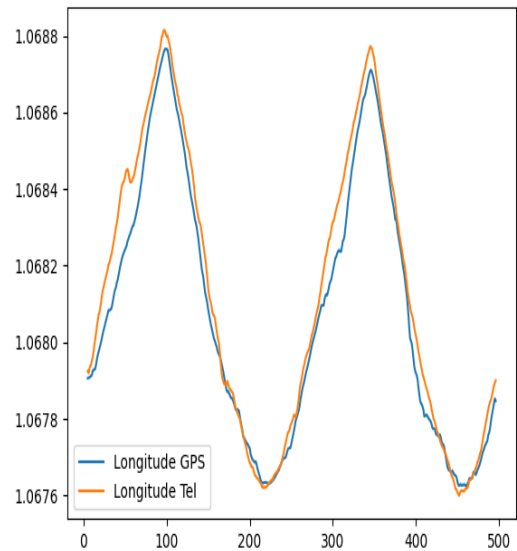


Figure 3 : Comparaison longitude (Gps vs Téléphone) mouvement extérieur1

Boite à moustache vitesse / accélération

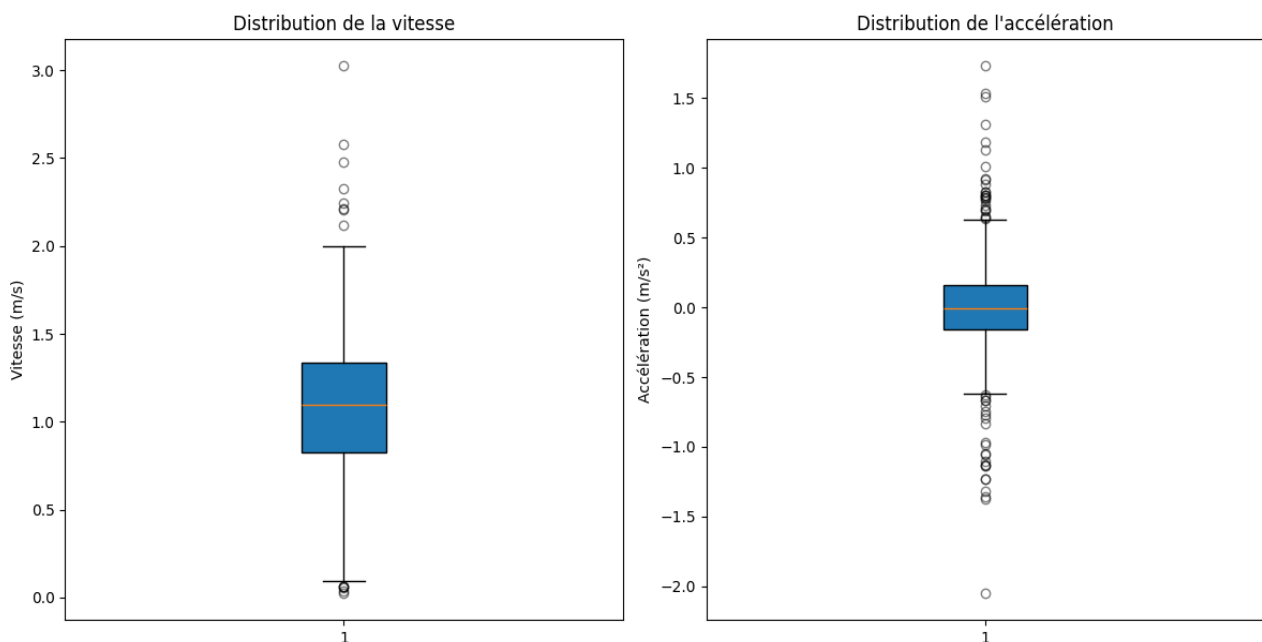


Figure 4 : Boite à moustache

Evolution de l'erreur mouvement extérieur1

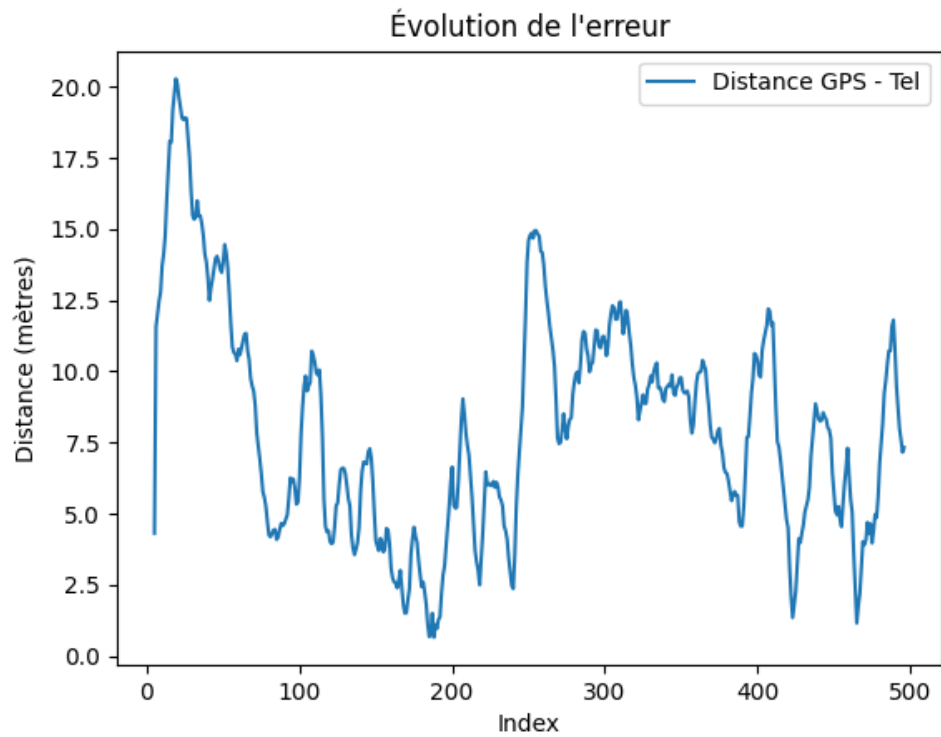


Figure 5 : Evolution de l'erreur en cours du temps

Valeurs aberrantes

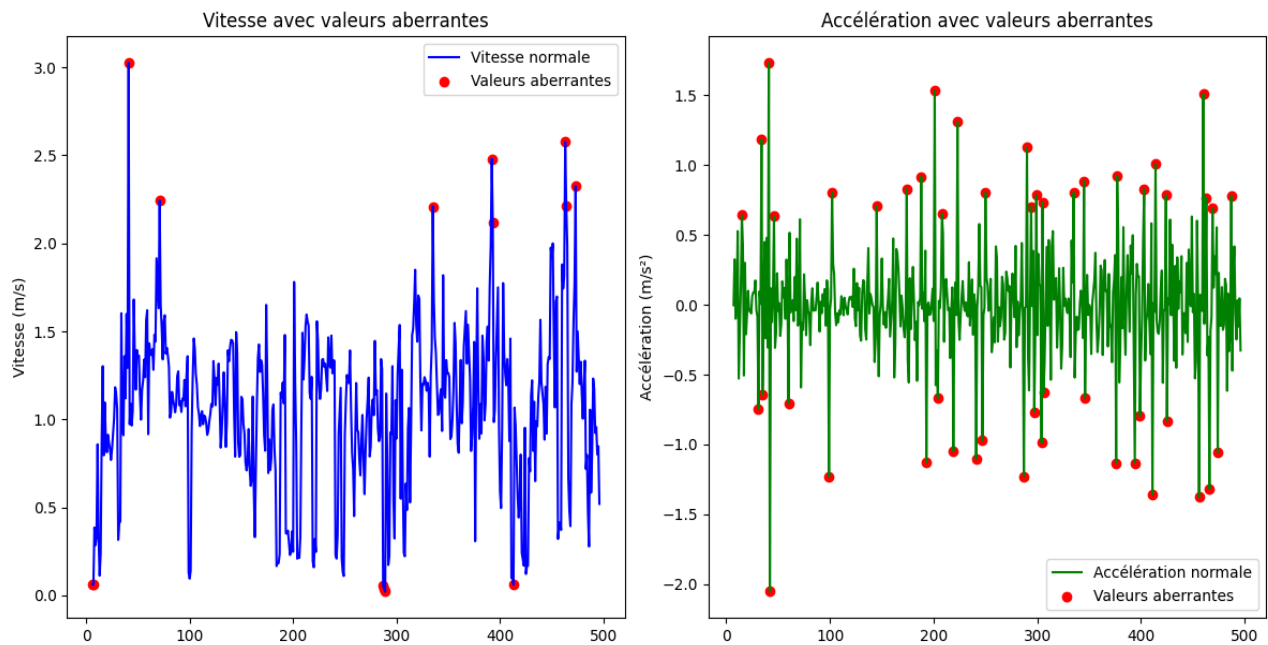


Figure 6 : Valeurs aberrantes

3.4 Analyse des résultats obtenus en cas de défaillance capteur

3.4.1 Acquisition immobile extérieur 1

Comparaison trajet Gps vs Téléphone

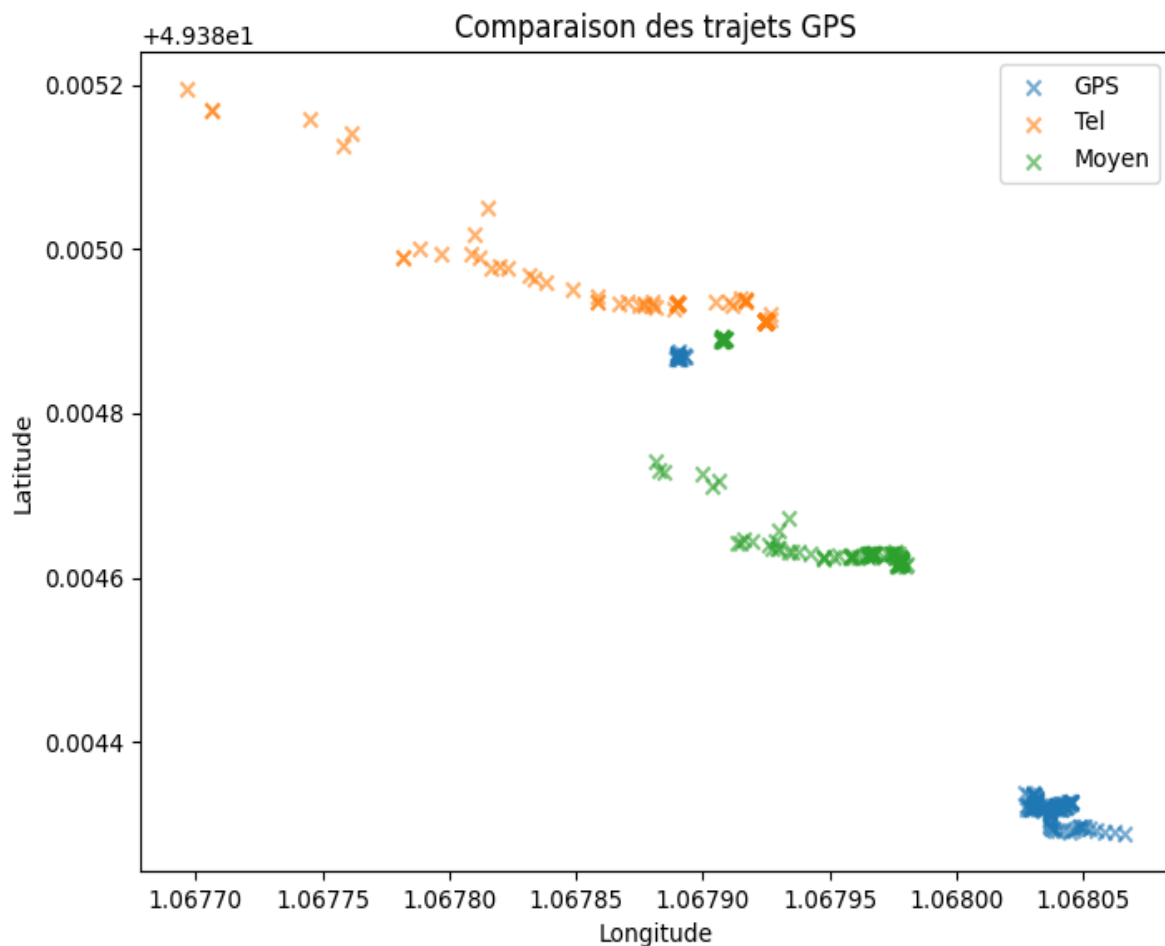


Figure 7 : Comparaison trajet immobile extérieur 1 (Gps vs Téléphone)

On remarque que même à l'extérieur, les acquisitions du gps et du téléphone ne sont pas assez précises. Le trajet nous indique qu'on était en mouvement même si on était immobile.

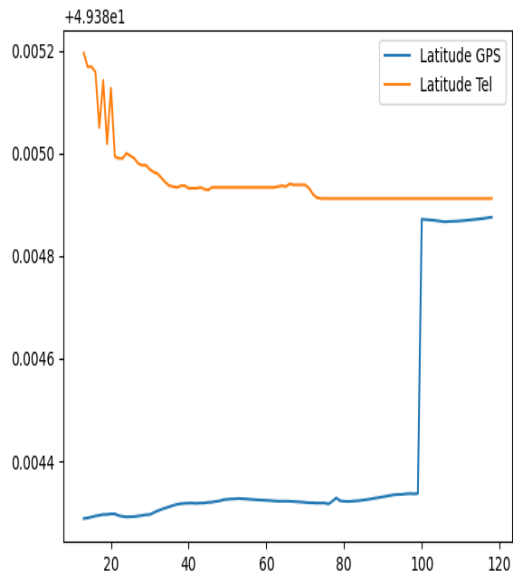


Figure 8 : Comparaison latitude (Gps vs Téléphone)

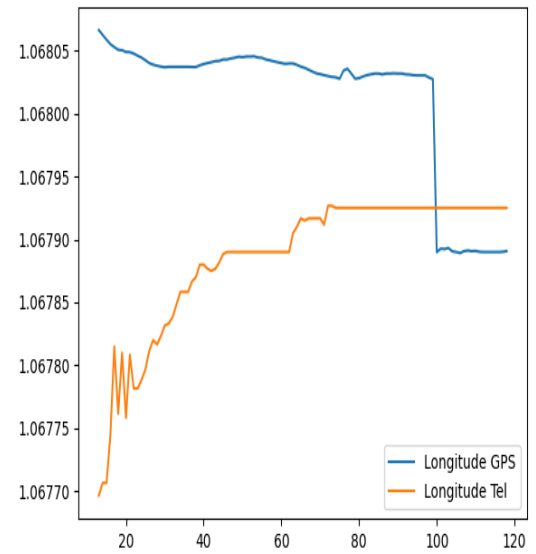


Figure 9 : Comparaison longitude (Gps vs Téléphone)

Comparaison latitude et longitude

Boite à moustache vitesse / accélération

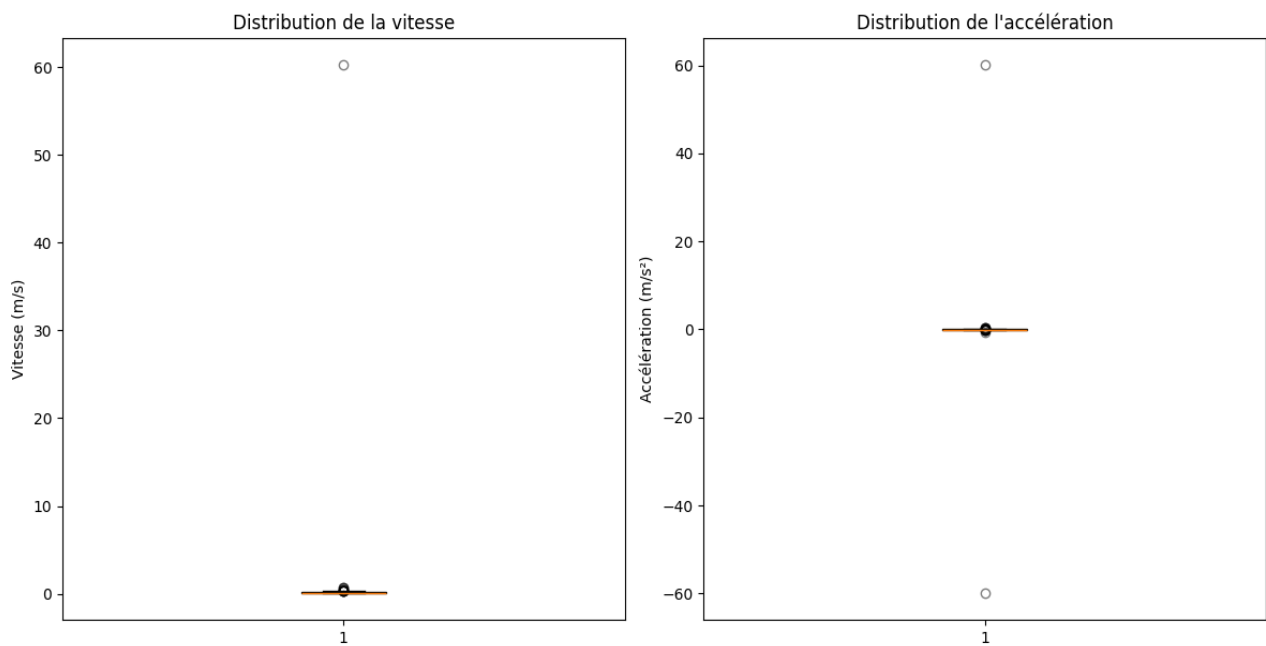


Figure 10 : Boite à moustache

Evolution de l'erreur

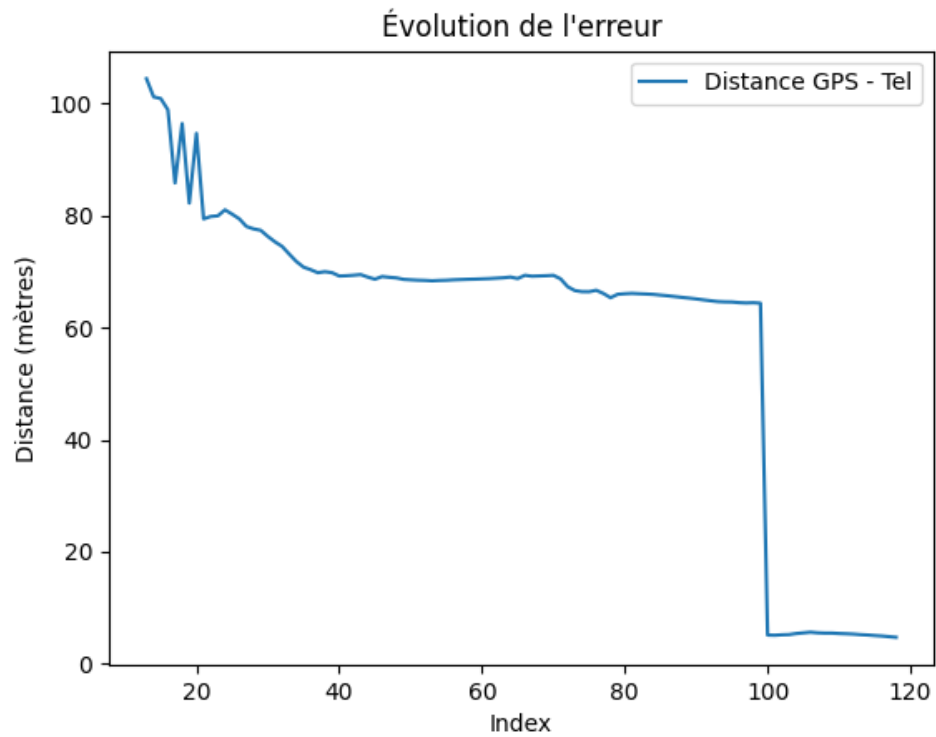


Figure 11 : Evolution de l'erreur en cours du temps

Valeurs aberrantes

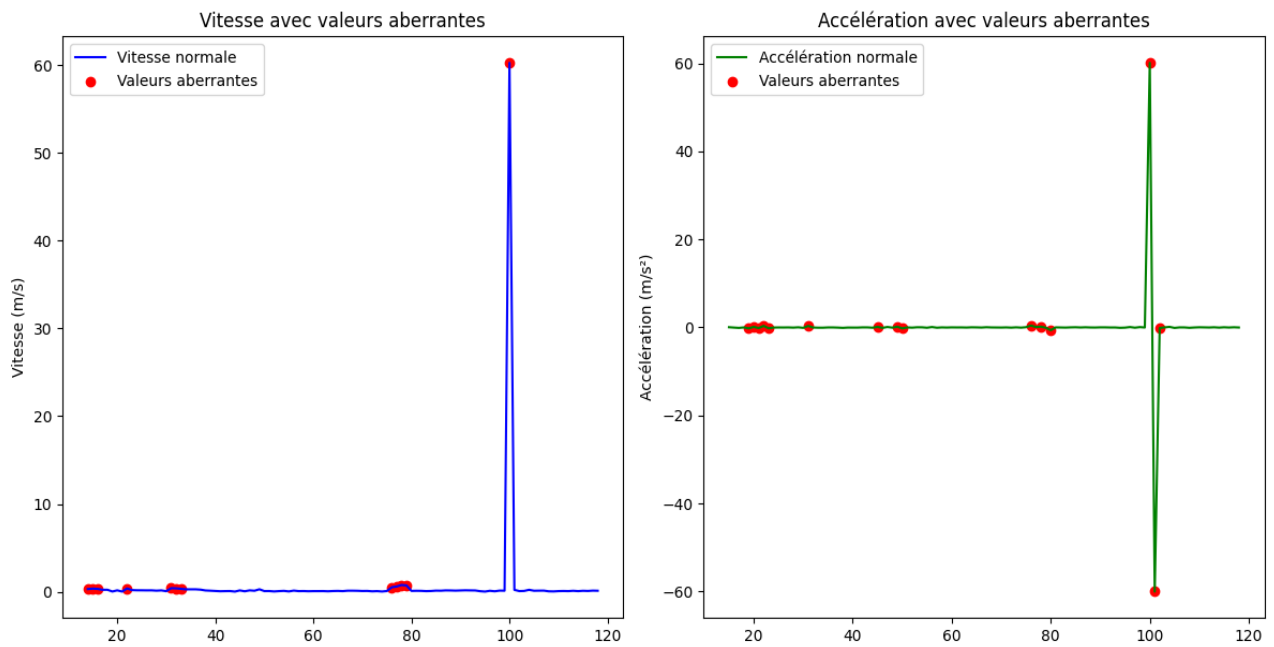


Figure 12 : Valeurs aberrantes

3.4.2 Acquisition immobile exterieur 2

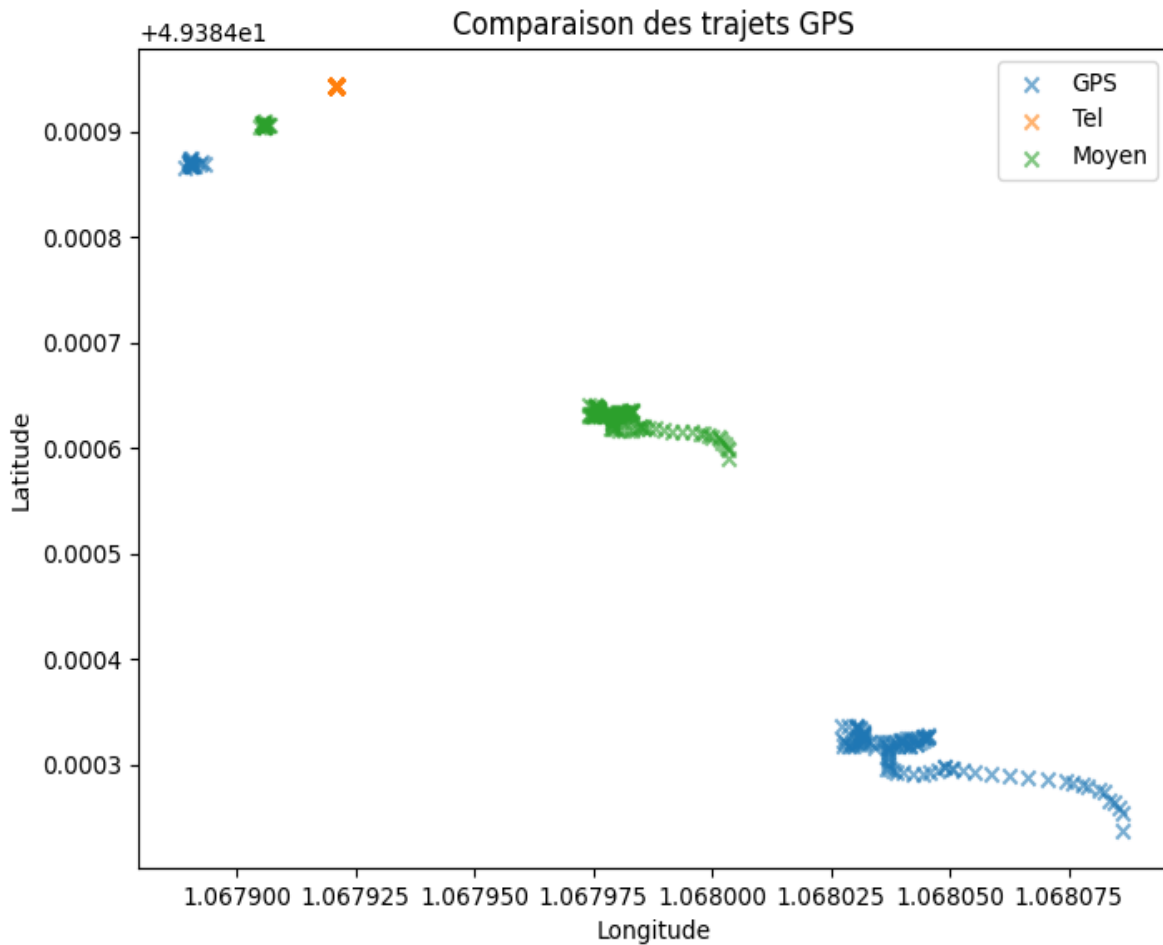


Figure 13 : Comparaison trajet immobile exterieur 2 (Gps vs Téléphone)

Ici, on peut remarquer que les données fournies par le téléphone sont beaucoup plus précises que les données fournies. En effet, on ne peut pas se fier aux données du GPS. (à conclure après je sais pas voir avec la démarche etc)

subsubsection Comparaison latitude et longitude

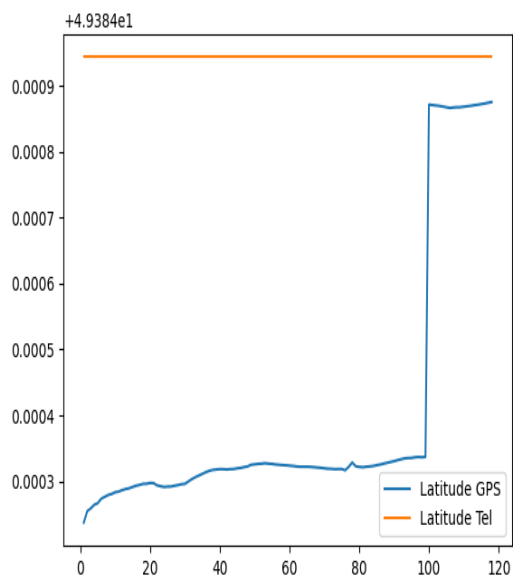


Figure 14 : Comparaison latitude (Gps vs Tél-
phone) immobile extérieur 2

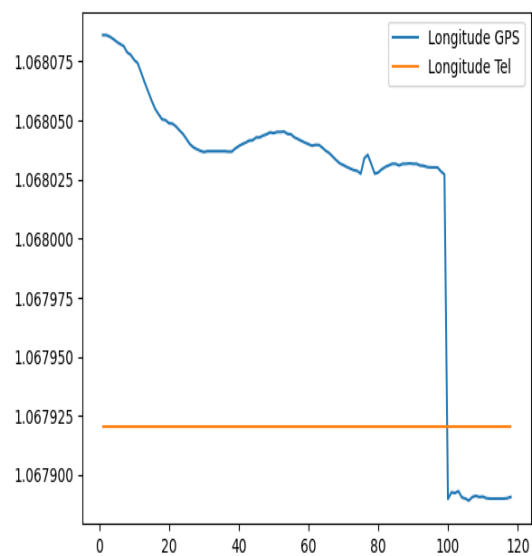


Figure 15 : Comparaison longitude (Gps vs Tél-
phone) immobile extérieur 2

Boite à moustache vitesse / accélération

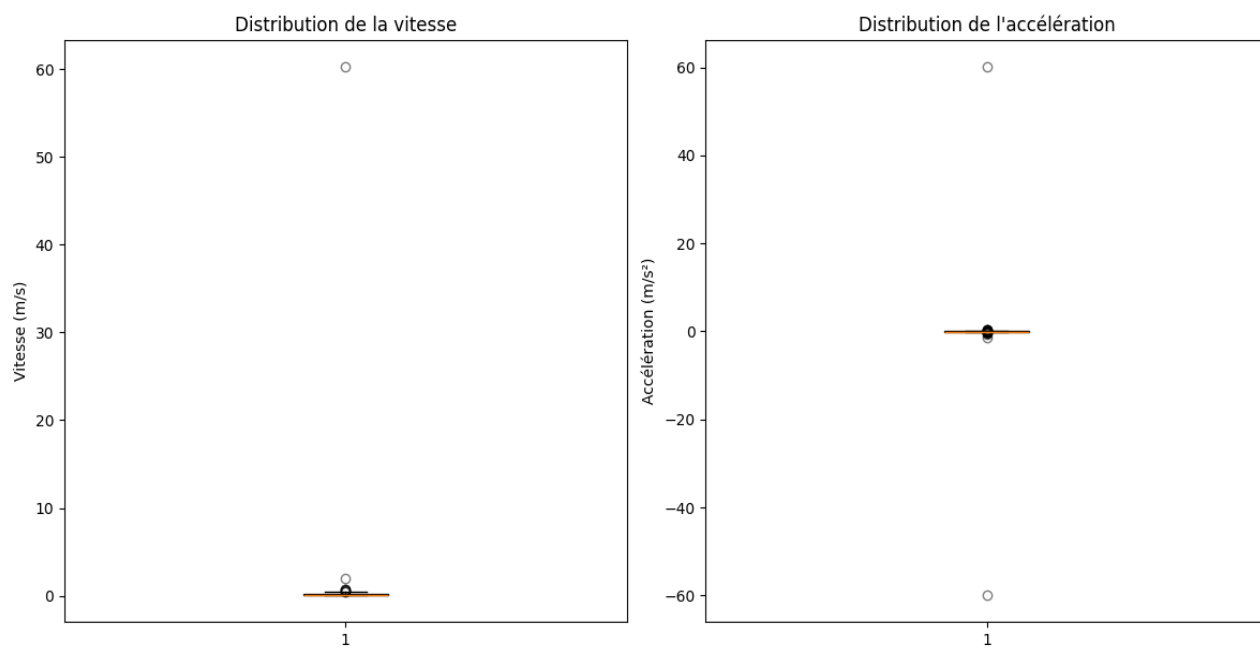


Figure 16 : Boite à moustache

Evolution de l'erreur

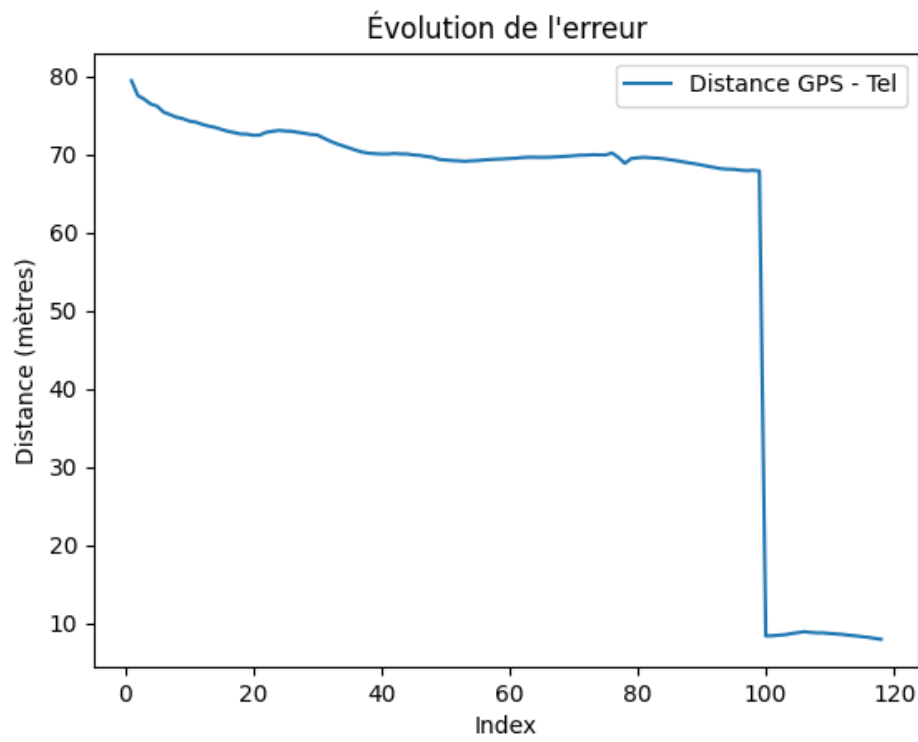


Figure 17 : Evolution de l'erreur en cours du temps

Valeurs aberrantes

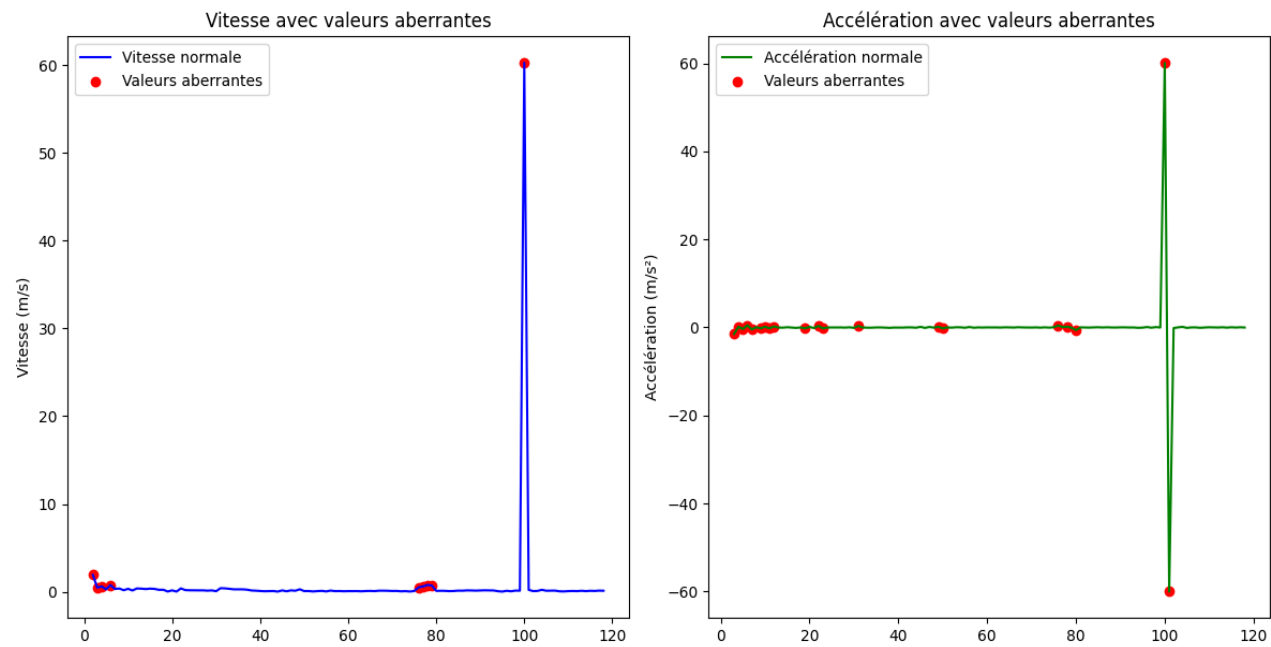


Figure 18 : Valeurs aberrantes

Chapitre 4

Conclusion

4.1 Citations et références

Bibliographie

- [1] Albert Einstein. *Zur Elektrodynamik bewegter Körper*. Annalen der Physik, 1905.
- [2] Stéphane Calderon, Floris Chabert. *Filtrage de Kalman appliqué à une centrale inertielle multi-capteurs*, École Nationale Supérieure des Télécommunications, Paris. Disponible à : <https://igns.wdfiles.com/local--files/filtre-de-kalman/Kalman.pdf>, (Consulté le 01/04/2025).
- [3] *Matrice jacobienne*, Wikipédia, l'encyclopédie libre. Disponible à : https://fr.wikipedia.org/wiki/Matrice_jacobienne, (Consulté le 01/04/2025).
- [4] *Filtre de Kalman*, Wikipédia, l'encyclopédie libre. Disponible à : https://fr.wikipedia.org/wiki/Filtre_de_Kalman, (Consulté le 01/04/2025).

Contenu de l'annexe A .

Table des figures

1	Comparaison trajet mouvement extérieur 1 (Gps vs Téléphone)	7
2	Comparaison latitude (Gps vs Téléphone)	8
3	Comparaison longitude (Gps vs Téléphone) mouvement extérieur1	8
4	Boite à moustache	8
5	Evolution de l'erreur en cours du temps	9
6	Valeurs aberrantes	9
7	Comparaison trajet immobile extérieur 1 (Gps vs Téléphone)	10
8	Comparaison latitude (Gps vs Téléphone)	11
9	Comparaison longitude (Gps vs Téléphone)	11
10	Boite à moustache	11
11	Evolution de l'erreur en cours du temps	12
12	Valeurs aberrantes	12
13	Comparaison trajet immobile extérieur 2 (Gps vs Téléphone)	13
14	Comparaison latitude (Gps vs Téléphone) immobile extérieur 2	14
15	Comparaison longitude (Gps vs Téléphone) immobile extérieur 2	14
16	Boite à moustache	14
17	Evolution de l'erreur en cours du temps	15
18	Valeurs aberrantes	15