



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 : 24

Date de réalisation :

13 mai 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	4
2.1.4	Magnétomètre	4
2.2	Avantages et inconvénients	5
2.3	Sources de bruitages et/ou défauts techniques	6
2.4	Calibration effectuée	7
2.4.1	Démarche	7
2.4.2	Expérimentations	8
2.5	Choix des paramètres d'acquisition	9
2.5.1	Test d'homogénéité des variances	9
2.5.2	Sélection empirique du meilleur paramétrage	9
2.6	Filtrage des signaux bruts	9
2.6.1	Synchronisation des signaux	10
2.6.2	Détection des valeurs aberrantes	10
2.6.3	Lissage et filtrage complémentaire	10
2.6.4	Résultat du prétraitement	10
3	Analyse des performances du système d'acquisition	11
3.1	Méthodologie pour la détermination du paramétrage du système d'acquisition	12
3.2	Description et analyse du choix des méthodes statistiques avec les résultats obtenus	12
3.3	Analyse des résultats de tracking obtenus	12
3.3.1	Mouvement extérieur 1	12
3.4	Analyse des résultats obtenus en cas de défaillance capteur	15
3.4.1	Acquisition immobile extérieur 1	15
3.4.2	Acquisition immobile extérieur 2	18
3.5	Filtrage des signaux bruts	20
3.5.1	Présentation du filtre de Kalman	21
3.5.2	Application dans notre cas	21
4	Conclusion	22
4.1	Citations et références	22
	Bibliographie	23
	Table des figures	24

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) est un composant permettant de capter les signaux envoyés par les satellites GPS afin de déterminer une position géographique précise. Pour rappel, le GPS est le nom du système GNSS (Global Navigation Satellite System) développé par les États-Unis. Il s'agit d'un système de positionnement basé sur des satellites artificiels placés en orbite et fonctionnant de manière coordonnée.

Ce réseau repose sur une constellation d'environ 30 satellites opérationnels, situés à une altitude d'environ 20 200 km. La précision pour les usages civils varie généralement entre 3 et 5 mètres. Plus le nombre de satellites captés est élevé, plus la précision augmente, notamment grâce à la correction des erreurs liées à l'atmosphère ou aux interférences.

Le principe de fonctionnement est plutôt simple : chaque satellite émet en continu un signal contenant l'heure exacte d'émission et sa position dans l'espace, transmis à la vitesse de la lumière. À la réception, le capteur GPS calcule sa distance à chaque satellite en mesurant le temps de parcours du signal.

Pour fonctionner correctement, le capteur doit capter les signaux d'au moins quatre satellites : les signaux de trois d'entre eux permettent de déterminer une position en deux dimensions via la trilatération, tandis que le quatrième sert à corriger l'erreur d'horloge du récepteur et à déterminer l'altitude.

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

Un accéléromètre est un dispositif qui mesure l'accélération (ou le mouvement) auquel il est soumis en appliquant le principe fondamentale de la dynamique :

$$\vec{F} = m\vec{a}.$$

En termes simples, l'accéléromètre détecte les changements de vitesse ou de direction. L'accéléromètre fonctionne en mesurant la force exercée sur un petit composant interne, souvent une masse suspendue à un ressort ou un capteur piézoélectrique. Cette masse se

déplace en fonction des variations d'accélération de l'objet. Plus l'objet accélère, plus cette masse se déplace. Ce mouvement est ensuite mesuré par le capteur.

L'accéléromètre mesure les accélérations linéaires le long des trois axes (X, Y et Z). Il permet ainsi de détecter les mouvements, les chocs, et d'estimer l'orientation d'un objet (comme l'inclinaison). Lorsqu'il est combiné avec d'autres capteurs, il peut aussi fournir des informations plus précises sur la position et le mouvement de l'objet dans l'espace.

2.1.3 Gyroscope

Le gyroscope est un capteur qui mesure la vitesse angulaire, c'est-à-dire la rapidité avec laquelle un objet tourne autour de ses axes (X, Y ou Z). Contrairement à l'accéléromètre qui détecte des mouvements linéaires, le gyroscope mesure les rotations. Le principe de fonctionnement du gyroscope repose sur la conservation du moment cinétique. Lorsqu'un rotor (ou masse tournante) est mis en rotation, il tend à conserver son orientation dans l'espace, conformément à la loi :

$$\frac{d\vec{L}_O}{dt} = 0 \Rightarrow \vec{L}_O = \vec{C}t$$

avec \vec{L}_O le moment cinétique par rapport à un point O.

Dans les gyroscopes MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) modernes, cette rotation est généralement mesurée par effet Coriolis. Une petite structure oscillante à l'intérieur du capteur subit une déviation lorsqu'elle est en mouvement de rotation. Cette déviation est proportionnelle à la vitesse angulaire et peut être détectée électriquement.

Grâce à ces mesures, le gyroscope est capable de suivre les changements d'orientation d'un appareil, ce qui le rend essentiel pour notre processus de développement.

2.1.4 Magnétomètre

Le magnétomètre est un capteur qui mesure l'intensité et la direction d'un champ magnétique, généralement celui de la Terre. Il fonctionne comme une boussole numérique, permettant de déterminer l'orientation absolue d'un objet par rapport au nord magnétique. Contrairement au gyroscope, qui mesure des vitesses de rotation relatives, le magnétomètre fournit un repère fixe dans l'espace.

Le principe de fonctionnement le plus courant repose sur l'effet Hall. Lorsqu'un courant électrique traverse un conducteur ou un semi-conducteur soumis à un champ magnétique perpendiculaire, une différence de potentiel apparaît sur les côtés du matériau. Cette tension, appelée tension de Hall, est proportionnelle à l'intensité du champ magnétique traversant le capteur. Elle est mesurée électroniquement pour en déduire la composante du champ magnétique selon chaque axe (X, Y, Z).

Le magnétomètre permet donc d'obtenir une mesure vectorielle du champ magnétique terrestre, et ainsi de calculer l'orientation d'un objet par rapport aux points cardinaux. Toutefois, il est sensible aux perturbations électromagnétiques de l'environnement (matériaux ferromagnétiques, courants, appareils électroniques, etc.). Pour cette raison, il est souvent

combiné avec un gyroscope et un accéléromètre, permettant une estimation plus fiable et précise de l'orientation dans l'espace.

2.2 Avantages et inconvénients

Chaque capteur mesure une grandeur physique, mais aucun capteur n'est parfait : Chaque présente des atouts et des limitations qu'il convient de connaître afin de concevoir un système de mesure fiable.

- **GPS :**

- *Avantages :*

Le GPS a une bonne précision géographique (de l'ordre de quelques mètres pour un GPS civil).

De plus, il fonctionne de manière autonome. En effet, il n'a pas besoin d'infrastructure locale. En outre, il permet de déterminer la position absolue sur le globe (latitude, longitude, altitude).

- *Limites :*

Même si le GPS nous offre plusieurs avantages. Ce dernier a quelques limites à ne pas ignorer. En fait, il a une latence élevée de l'ordre de plusieurs centaines de millisecondes à quelques secondes.

Le GPS a aussi une faible fréquence d'échantillonnage (entre 1Hz et 10Hz), ce qui n'est parfois pas suffisant surtout pour capter les dynamiques rapides. Il ne faut pas oublier aussi qu'il est peu fiable en environnements clos comme les bâtiments, tunnels, etc... car il nécessite une ligne de vue avec les satellites. Finalement, le GPS est vulnérable aux interférences radio et au brouillage.

- **Accéléromètre**

- *Avantages :*

L'accéléromètre nous offre une mesure directe de l'accélération linéaire dans les 3 axes (x,y,z). En effet, ce dernier est très utile pour détecter les chocs, les mouvements ou les vibrations. Sa haute fréquence d'échantillonnage (plusieurs KHz) lui permet d'avoir un suivi précis des changements rapides. Les avantages les plus importants de l'accéléromètre sont sa taille et son coût. En effet, il est peu coûteux et très compact.

- *Limites :*

Tout comme le GPS, l'accéléromètre a ses inconvénients. En fait, un accéléromètre est très sensible au bruit (bruit thermique, vibrations parasites). Les mesures nécessitent souvent un filtrage notamment : un filtre passe-bas ou filtre de Kalman. De plus, un accéléromètre ne donne pas la position absolue. Il donne seulement des informations relatives au mouvement.

- **Gyroscope :**

- *Avantages :*

Le gyroscope permet de mesurer la vitesse angulaire, c'est-à-dire les rotations autour des axes.

Il est très réactif et précis à court terme, ce qui le rend particulièrement utile pour

détecter des changements rapides d'orientation.

Grâce à sa haute fréquence d'échantillonnage, il est capable de suivre les mouvements avec une grande précision en temps réel.

– *Limites :*

Cependant, le gyroscope présente aussi certaines limites.

Il souffre notamment d'un phénomène appelé *dérive* : les petites erreurs de mesure s'accumulent avec le temps, ce qui dégrade la précision à long terme si le capteur n'est pas recalibré.

De plus, il consomme généralement plus d'énergie que d'autres capteurs comme l'accéléromètre, ce qui peut poser problème dans les systèmes autonomes.

- **Magnétomètre :**

– *Avantages :*

Le magnétomètre mesure le champ magnétique terrestre, ce qui permet d'estimer l'orientation absolue par rapport au nord magnétique.

Contrairement au gyroscope, il ne dérive pas avec le temps.

Il est donc particulièrement utile pour corriger les erreurs d'orientation dans les systèmes de navigation.

– *Limites :*

Le principal inconvénient du magnétomètre est sa grande sensibilité aux perturbations magnétiques locales.

En présence de métaux ferromagnétiques ou de champs électromagnétiques générés par des appareils électroniques, ses mesures peuvent devenir très imprécises.

Il nécessite souvent un étalonnage régulier pour fonctionner correctement, notamment en environnement intérieur ou urbain dense.

2.3 Sources de bruitages et/ou défauts techniques

Les capteurs sont sujets à différents types de bruits :

Sources de bruit des capteurs :

- *GPS :*

Bien que le GPS soit un outil de localisation très répandu, il reste vulnérable à plusieurs types de bruits et d'erreurs.

L'une des principales sources de perturbation provient des conditions atmosphériques : les variations de la densité de la troposphère (couche inférieure de l'atmosphère) et les irrégularités de l'ionosphère (couche chargée en particules ionisées) peuvent ralentir ou dévier les signaux émis par les satellites, introduisant des erreurs de positionnement.

Par ailleurs, en milieu urbain ou montagneux, les bâtiments et obstacles naturels bloquent la ligne de vue entre les satellites et le récepteur, causant des pertes de signal ou un manque de satellites visibles, ce qui réduit la précision.

Le phénomène de *multipath*, où les signaux rebondissent sur des surfaces avant d'atteindre le récepteur, introduit des délais artificiels dans la réception des signaux, faussant ainsi le calcul de la distance satellite-récepteur.

- *Accéléromètre et gyroscope :*

Les capteurs inertiels sont particulièrement sensibles aux erreurs internes liées à leur structure physique et électronique.

Le *bruit thermique* est l'un des plus répandus : il résulte de l'agitation thermique des électrons dans les circuits du capteur, créant des fluctuations aléatoires dans les mesures.

Ces capteurs présentent également des *biais*, c'est-à-dire une erreur constante (ou lentement variable) dans la mesure, qui peut varier en fonction de la température ou de l'usure du composant.

Lorsqu'on intègre les données de l'accéléromètre (pour obtenir la vitesse) ou du gyroscope (pour obtenir l'orientation), ces biais s'accumulent dans le temps et produisent une *dérive* significative : même en l'absence de mouvement, le système peut croire qu'un déplacement ou une rotation est en cours.

À cela s'ajoutent les erreurs d'alignement des axes (erreurs de montage) et les vibrations mécaniques indésirables.

Ces limitations rendent l'utilisation isolée de ces capteurs peu fiable pour les estimations sur le long terme sans recalibrage ou fusion de capteurs.

- *Magnétomètre :*

Le magnétomètre mesure le vecteur du champ magnétique terrestre, ce qui en fait un capteur clé pour estimer le cap absolu (direction nord-sud).

Cependant, sa fiabilité est fortement dépendante de l'environnement dans lequel il est utilisé.

Tout d'abord, la proximité d'objets contenant des matériaux *ferromagnétiques* (comme les structures métalliques, les véhicules, ou même des meubles) peut déformer localement le champ magnétique, provoquant une erreur d'orientation.

Ensuite, les sources *électromagnétiques* actives — moteurs, transformateurs, fils conducteurs parcourus par du courant — génèrent des champs parasites susceptibles d'invalider complètement la mesure.

En milieu intérieur, ces perturbations sont quasiment omniprésentes.

Pour cette raison, il est essentiel de procéder à un *étalonnage* régulier, généralement en réalisant des mouvements circulaires pour cartographier les erreurs et appliquer des corrections logicielles.

Malgré cela, le magnétomètre reste peu fiable dans certains environnements, et son usage seul pour l'orientation est déconseillé sans assistance d'autres capteurs.

2.4 Calibration effectuée

2.4.1 Démarche

La calibration vise à réduire les erreurs systématiques. Cette section concerne uniquement le gyroscope. En effet, ce capteur présente une dérive dans le temps, même en l'absence de mouvement. Cela est principalement dû à un biais constant propre à chaque axe de mesure. Il est donc nécessaire d'estimer ce biais afin de le soustraire dynamiquement aux données lors de l'utilisation.

2.4.2 Expérimentations

Pour ce faire, nous avons réalisé une acquisition en maintenant le système complètement à l'arrêt. En théorie, les vitesses angulaires mesurées devraient être nulles. Cependant, on observe que les valeurs dérivent légèrement dans le temps, indiquant la présence d'un biais.

Nous avons enregistré les mesures sur une durée de plusieurs dizaines de secondes, puis calculé la moyenne des valeurs mesurées pour chaque axe (X, Y, Z). Ces moyennes ont ensuite été utilisées comme biais statique à corriger.

Un graphique de l'évolution des mesures brutes au cours du temps met clairement en évidence cette dérive, notamment sur l'axe Z (à insérer si disponible).

GRAPHE A METTRE ICI

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

2.5 Choix des paramètres d'acquisition

Nous avons adopté une démarche statistique pour le choix des paramètres d'acquisition. Vingt séries de mesures ont été réalisées en faisant varier au maximum les réglages des différents capteurs. Néanmoins, l'absence de référence externe (le smartphone) pour comparer nos résultats a posé la question suivante : comment choisir un bon paramétrage sans pouvoir évaluer précisément les erreurs systématiques ?

2.5.1 Test d'homogénéité des variances

Dans un premier temps, nous avons évalué l'impact des modifications de paramètres sur la dispersion des mesures à l'aide du test de Levene (<https://datatab.fr/tutorial/levene-test>). Ce test permet de vérifier l'hypothèse nulle selon laquelle plusieurs échantillons proviennent d'une population à variance identique. De plus, il accepte des échantillons de tailles différentes.

- H_0 : les groupes ont des variances égales.
- H_1 : les groupes ont des variances différentes.

Si la p-valeur obtenue est supérieure à 0,05, on ne peut pas rejeter H_0 : les variances sont jugées homogènes. Si elle est inférieure à 0,05, on conclut à une différence significative des variances.

Les hypothèses du test de Levene sont :

- observations indépendantes,
- variable mesurée à un niveau d'échelle métrique.

Nous avons implémenté ce test en Python, puis comparé nos résultats à ceux fournis par la fonction `levene` de la bibliothèque `SciPy` (cf. annexe).

2.5.2 Sélection empirique du meilleur paramétrage

Une fois l'impact des réglages mis en évidence, nous avons adopté une approche empirique : parmi les vingt acquisitions, nous avons sélectionné celle présentant l'écart-type le plus faible pour chaque capteur, indiquant la meilleure stabilité des mesures.

Cette méthode, bien que simple, permet de retenir un paramétrage optimisé en termes de précision, tout en restant compatible avec les contraintes énergétiques et informatiques évoquées précédemment.

2.6 Filtrage des signaux bruts

Le filtrage des données brutes consiste à effectuer un prétraitement afin d'améliorer la qualité des signaux issus des capteurs. L'objectif principal est de garantir la cohérence des acquisitions et de supprimer les valeurs aberrantes (outliers) susceptibles de fausser les analyses ou traitements ultérieurs.

2.6.1 Synchronisation des signaux

Avant tout traitement, nous avons procédé à la synchronisation temporelle des différentes acquisitions issues des capteurs (gyroscope, accéléromètre, magnétomètre, etc.). Cela permet de garantir que les mesures analysées correspondent aux mêmes instants physiques, ce qui est essentiel pour toute fusion ou comparaison de données multisources. La synchronisation a été réalisée en alignant les horodatages fournis par chaque capteur.

2.6.2 Détection des valeurs aberrantes

Une fois les données synchronisées, nous avons utilisé des représentations graphiques de type **boxplot** (ou boîtes à moustaches) pour visualiser la distribution des données de chaque capteur. Ces graphiques permettent d'identifier facilement les éventuelles valeurs aberrantes, c'est-à-dire les points très éloignés de la médiane ou dépassant l'intervalle interquartile étendu (défini en cours par $[Q1 - 1,5 \times IQR, Q3 + 1,5 \times IQR]$).

Ces valeurs peuvent provenir de bruits ponctuels, de pertes de signal ou d'erreurs transitoires dans la transmission. Elles ont été exclues des jeux de données à l'aide d'un filtre conditionnel simple basé sur ces bornes statistiques.

2.6.3 Lissage et filtrage complémentaire

En complément, un filtrage numérique a pu être appliqué sur certaines séries temporelles à fort bruit, notamment via un filtre passe-bas de type moyenne glissante (moving average) ou un filtre de Savitzky-Golay, selon le type de signal et le niveau de bruit observé. Cela permet de réduire les fluctuations rapides non représentatives sans altérer les tendances générales du mouvement.

2.6.4 Résultat du prétraitement

Après filtrage, les signaux présentent une meilleure continuité et une diminution significative du bruit. Les valeurs extrêmes ont été supprimées, rendant les signaux plus exploitables pour les étapes suivantes telles que la calibration dynamique ou la fusion multicapteurs.

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

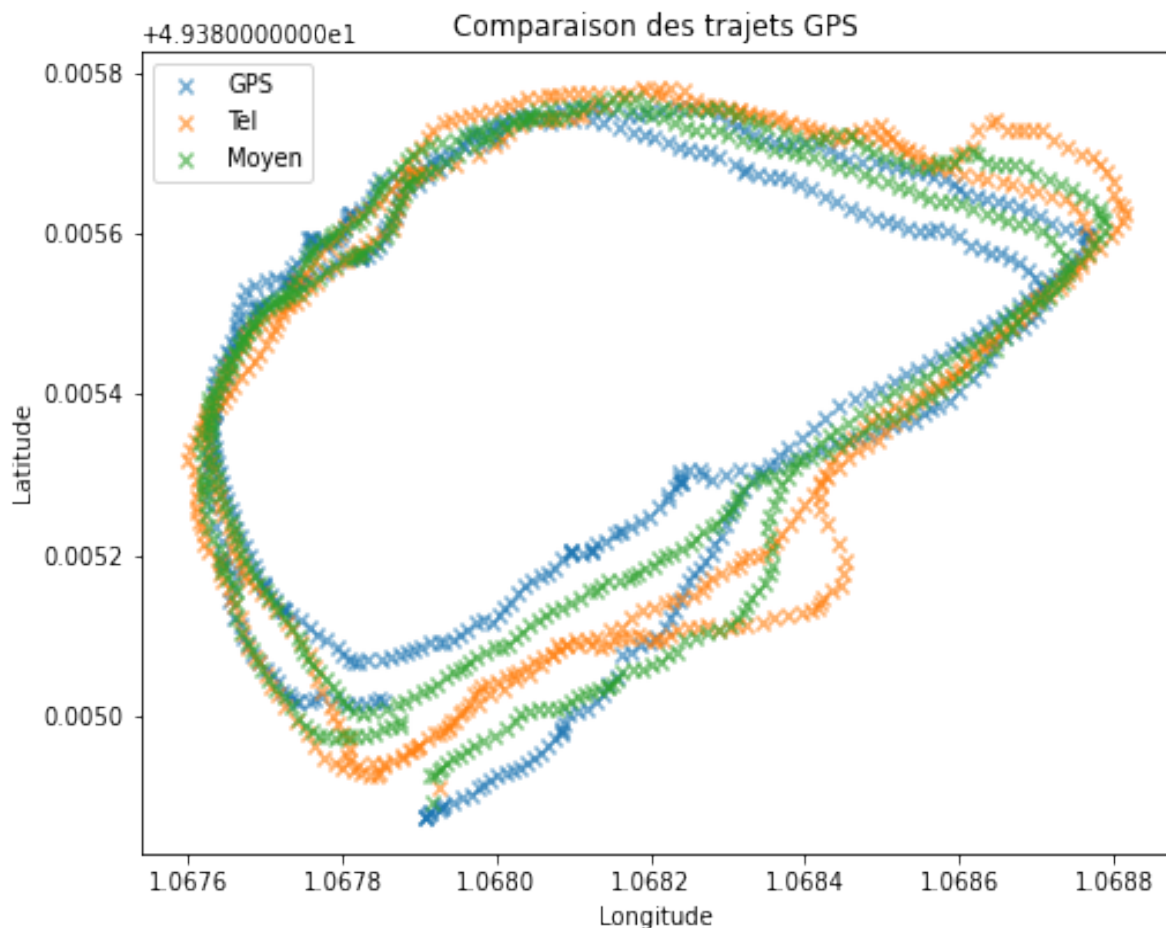


Figure 2 : Comparaison trajet mouvement extérieur 1 (Gps vs Téléphone)

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

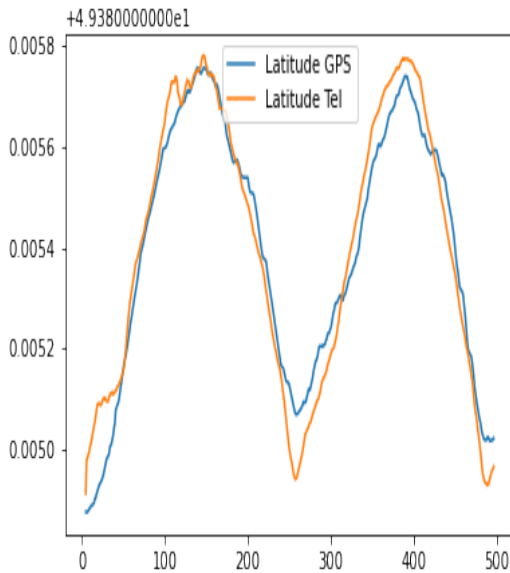


Figure 3 : Comparaison latitude (Gps vs Téléphone)

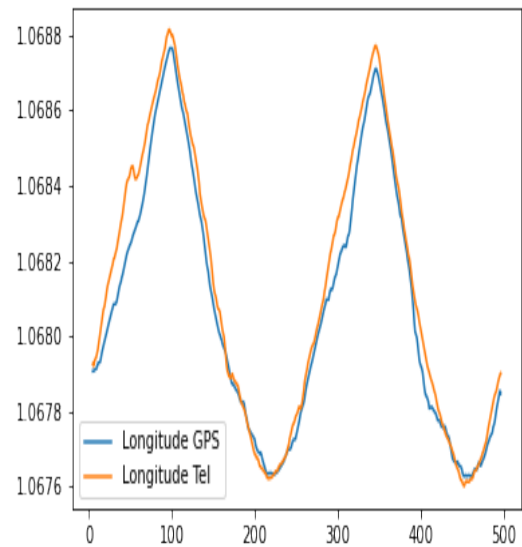


Figure 4 : Comparaison longitude (Gps vs Téléphone) mouvement extérieur1

Boîte à moustache vitesse / accélération

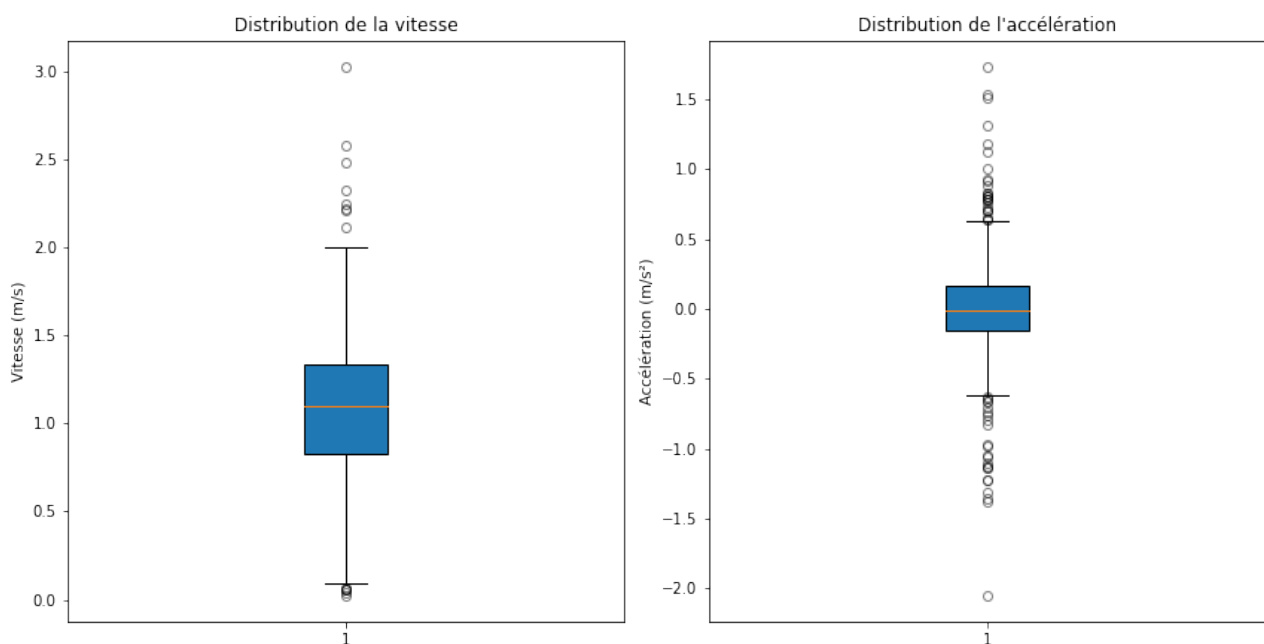


Figure 5 : Boîte à moustache

Evolution de l'erreur mouvement extérieur1

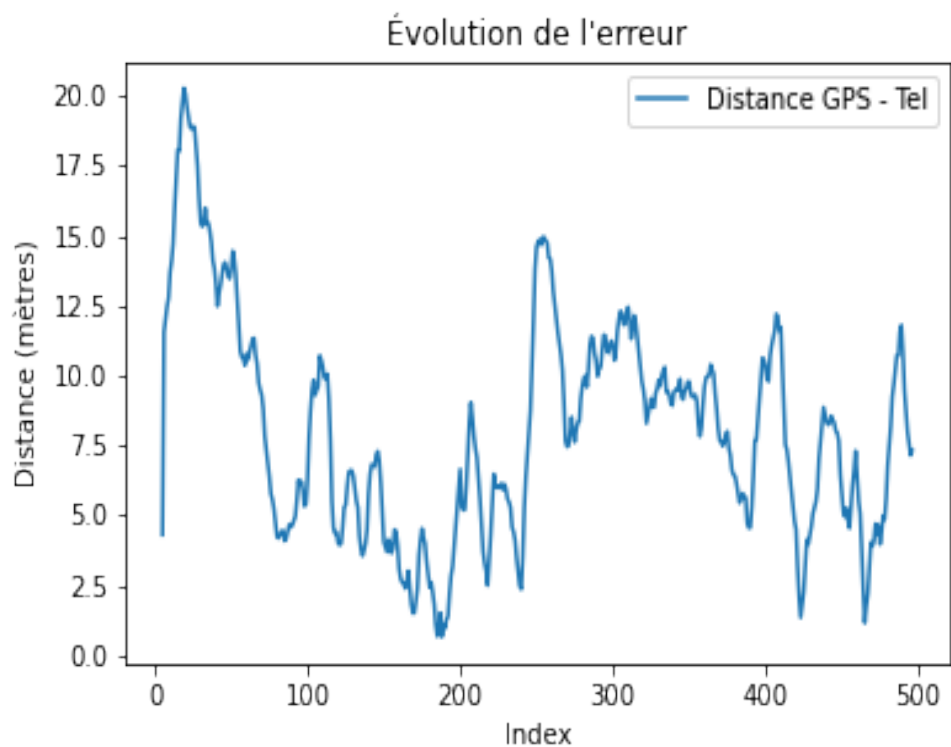


Figure 6 : Evolution de l'erreur en cours du temps

Valeurs aberrantes

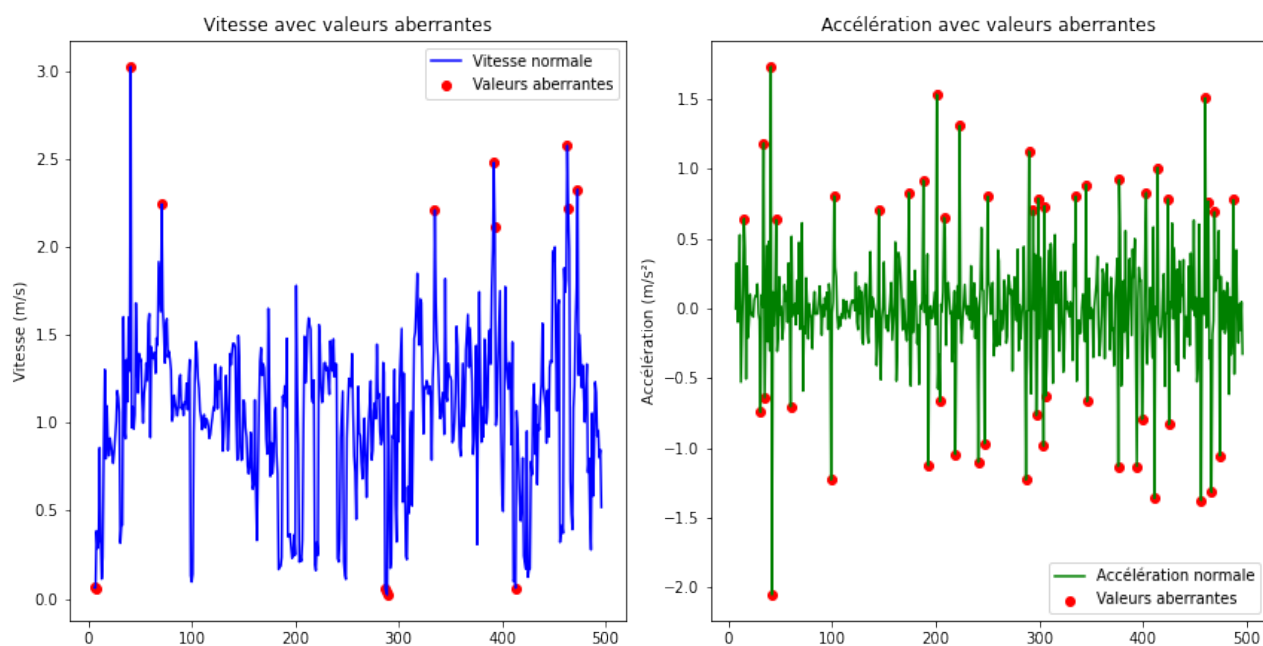


Figure 7 : Valeurs aberrantes

3.4 Analyse des résultats obtenus en cas de défaillance cap- teur

3.4.1 Acquisition immobile extérieur 1

Comparaison trajet Gps vs Téléphone

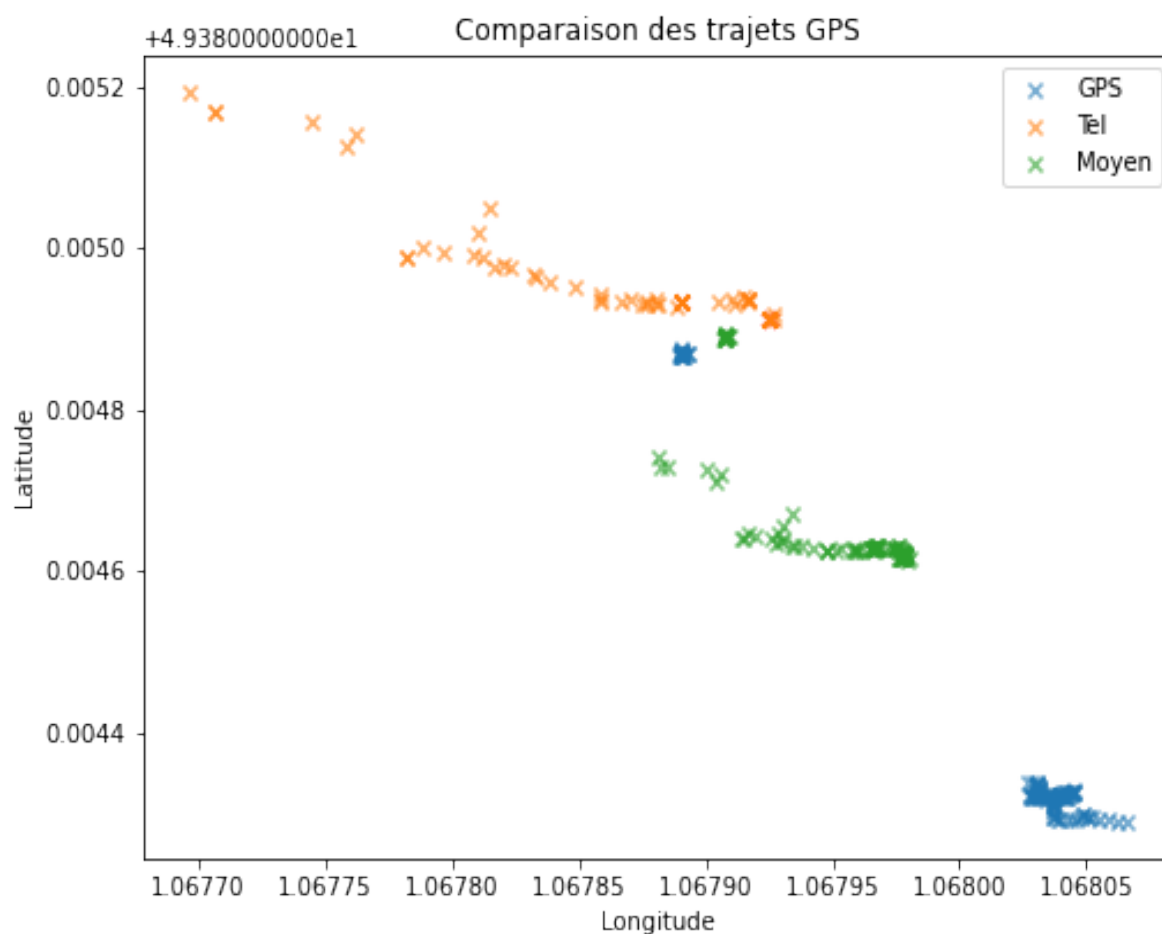


Figure 8 : Comparaison trajet immobile extérieur 1 (Gps vs Téléphone)

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.

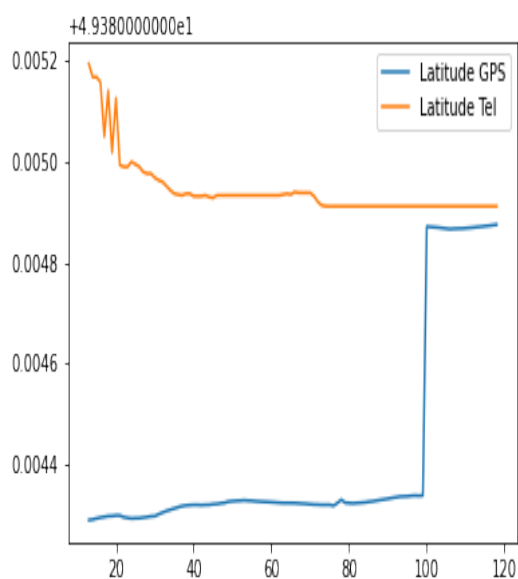


Figure 9 : Comparaison latitude (Gps vs Téléphone)

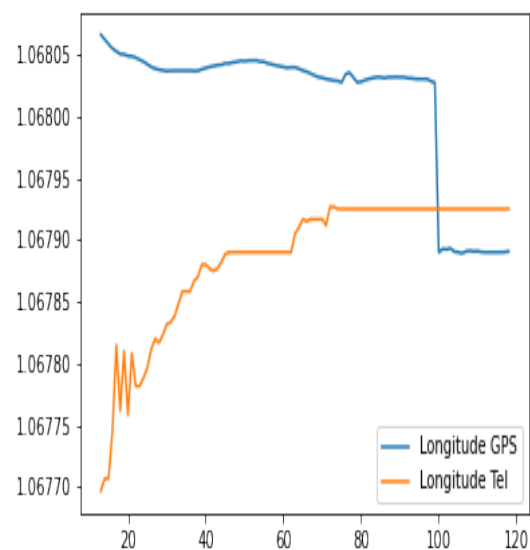


Figure 10 : Comparaison longitude (Gps vs Téléphone)

Comparaison latitude et longitude

Boîte à moustache vitesse / accélération

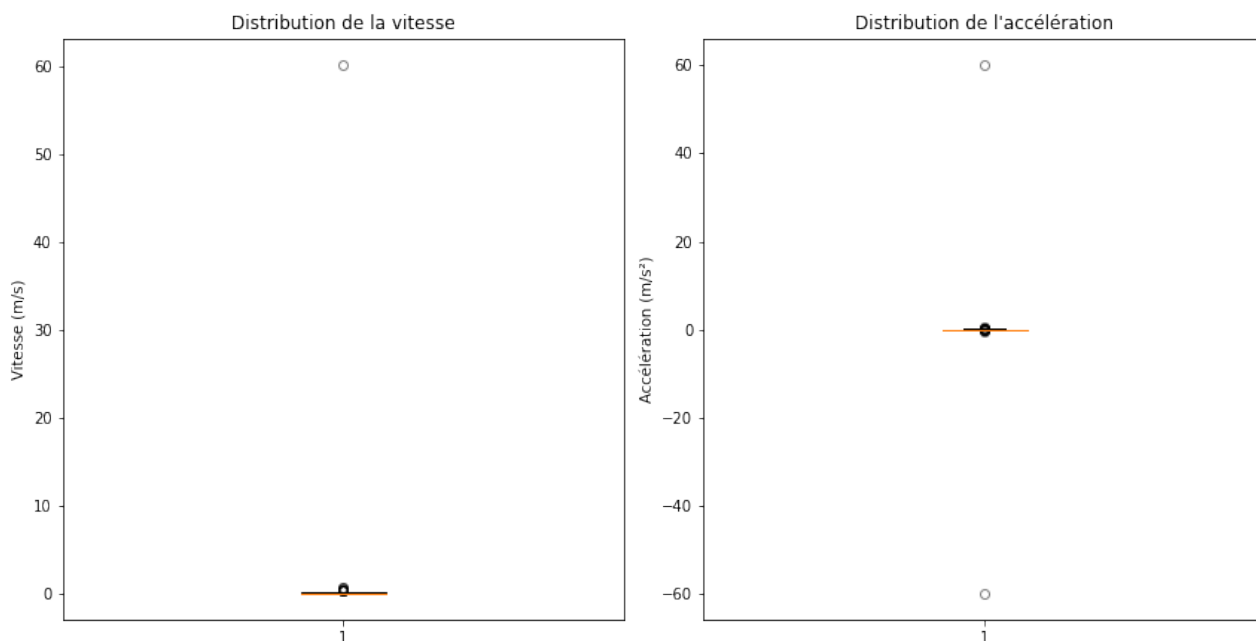


Figure 11 : Boîte à moustache

Evolution de l'erreur

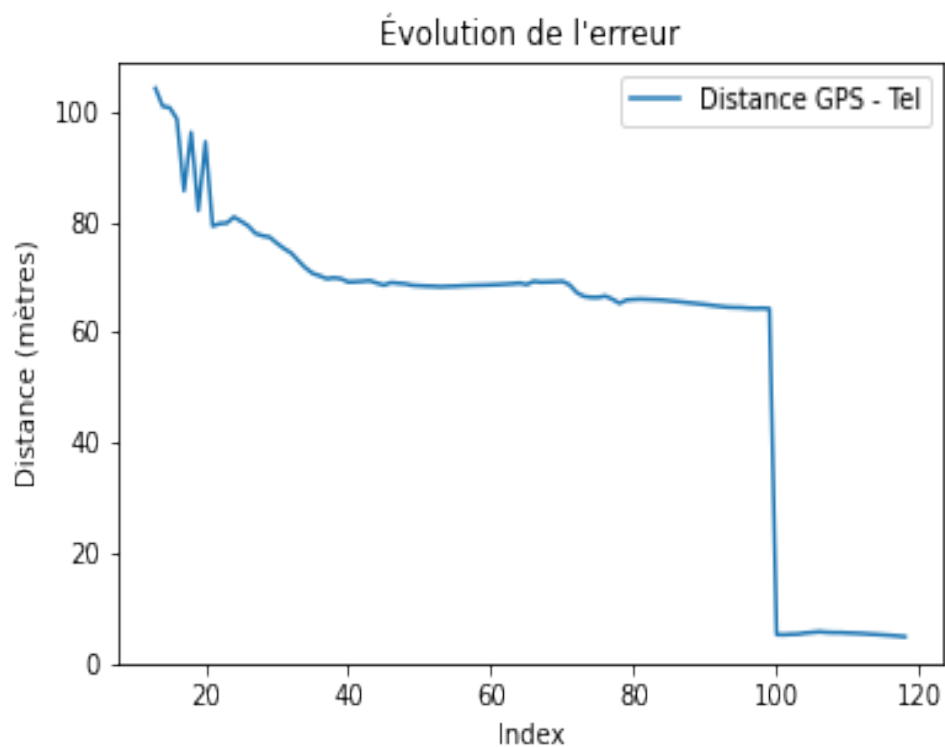


Figure 12 : Evolution de l'erreur en cours du temps

Valeurs aberrantes

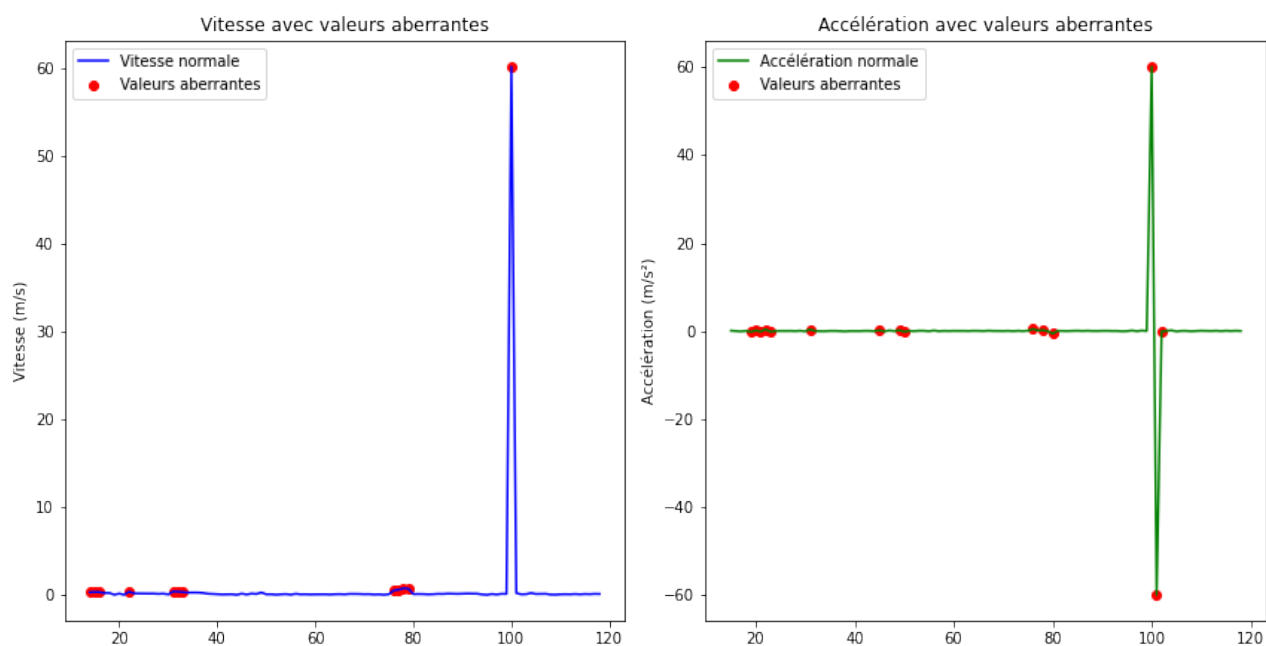


Figure 13 : Valeurs aberrantes

3.4.2 Acquisition immobile exterieur 2

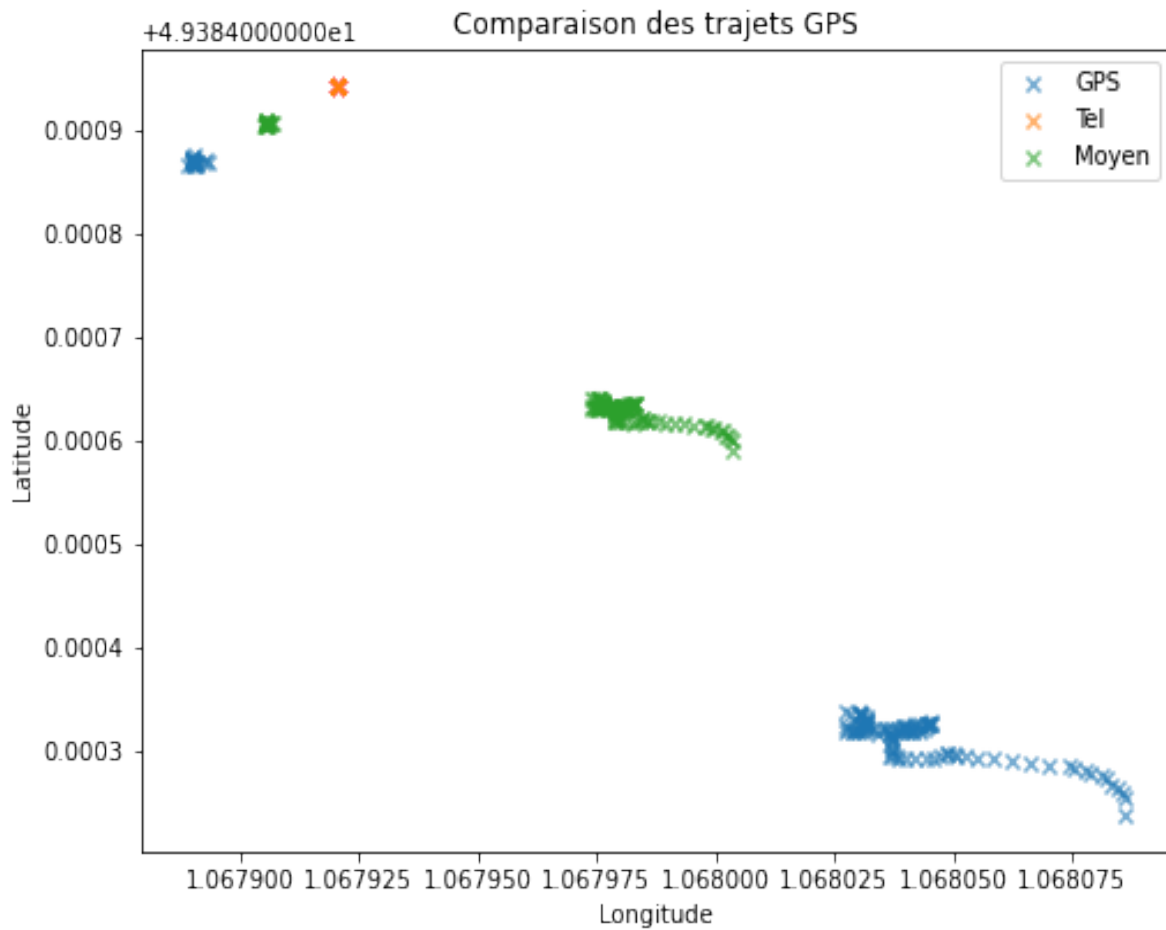


Figure 14 : Comparaison trajet immobile exterieur 2 (Gps vs Téléphone)

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

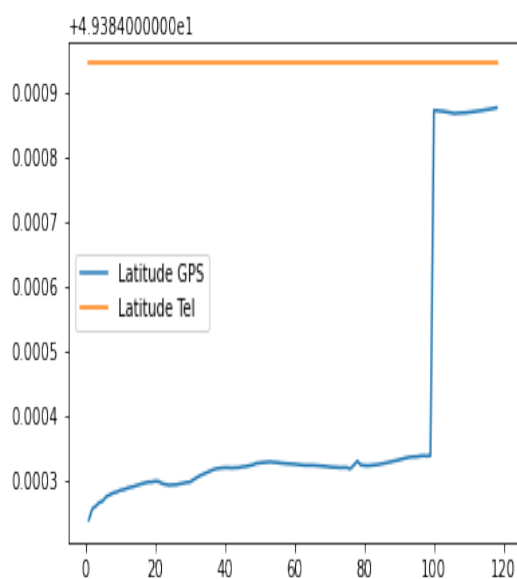


Figure 15 : Comparaison latitude (Gps vs Téléphone) immobile extérieur 2

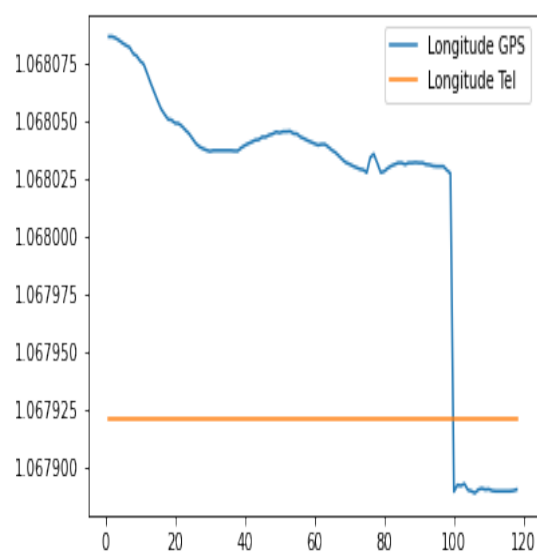


Figure 16 : Comparaison longitude (Gps vs Téléphone) immobile extérieur 2

Boîte à moustache vitesse / accélération

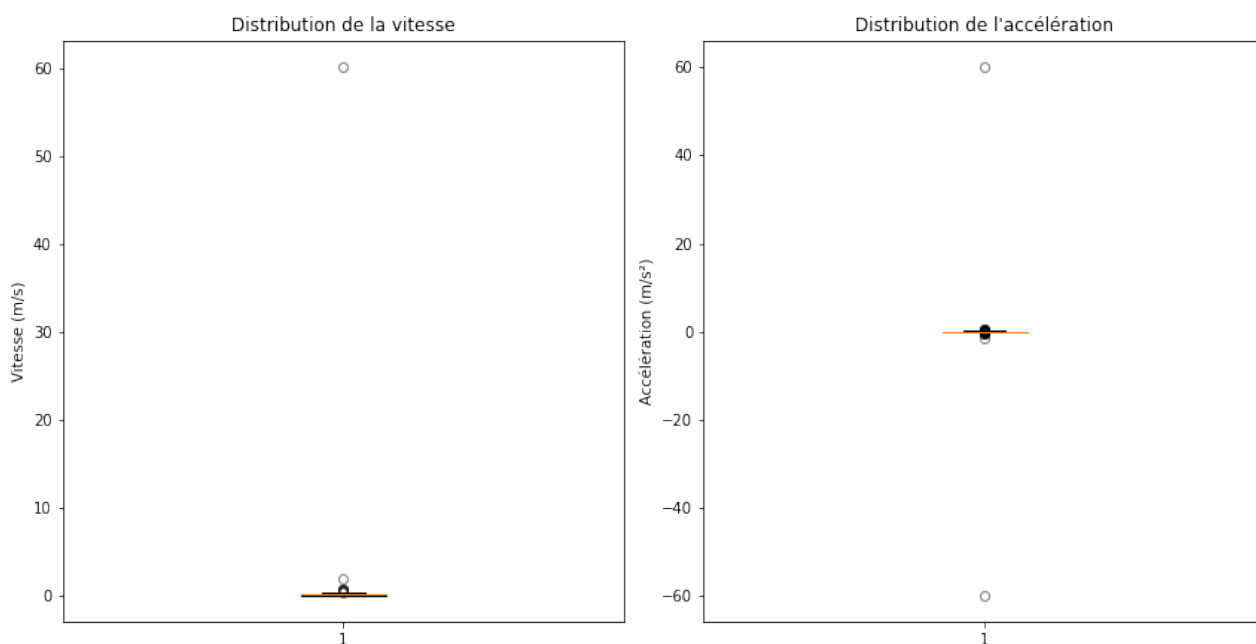


Figure 17 : Boîte à moustache

Evolution de l'erreur

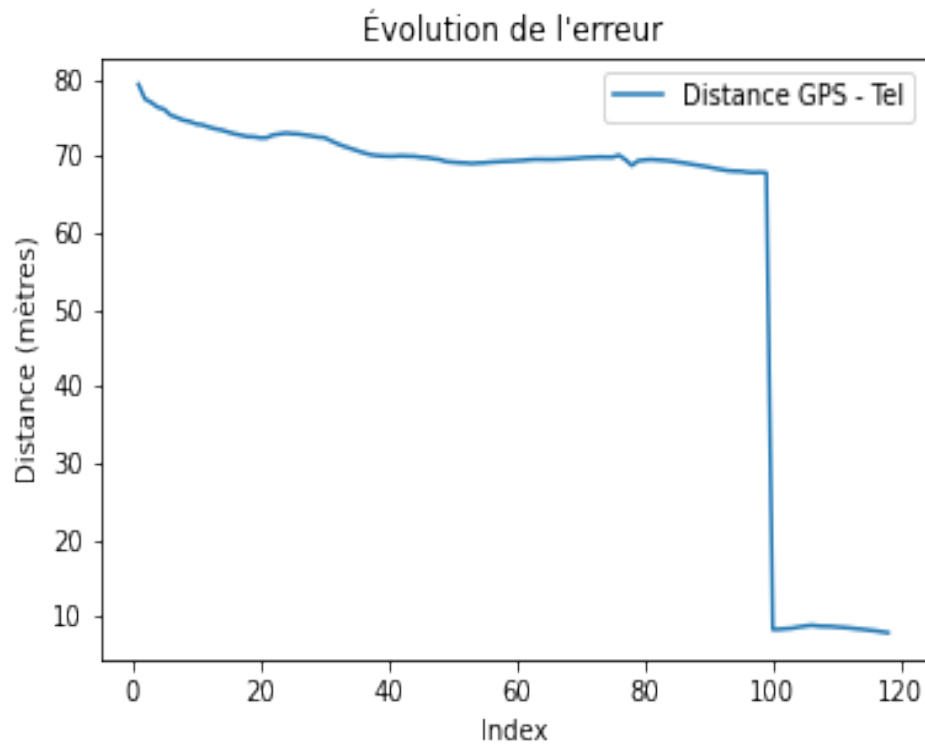


Figure 18 : Evolution de l'erreur en cours du temps

Valeurs aberrantes

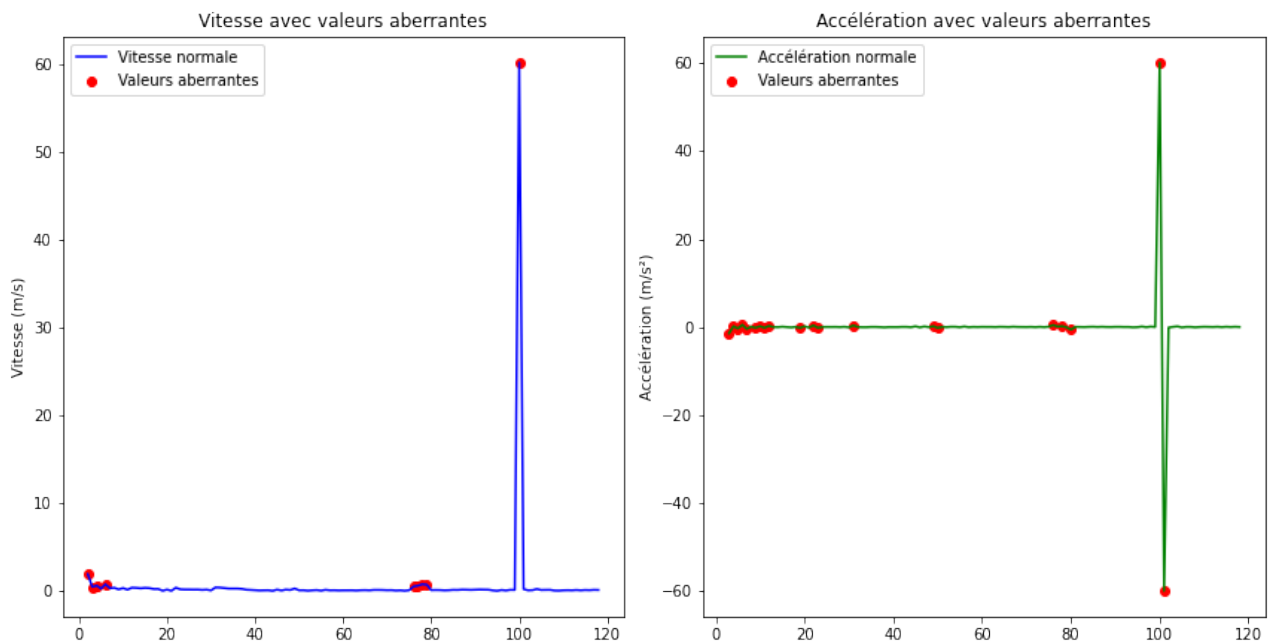


Figure 19 : Valeurs aberrantes

3.5 Filtrage des signaux bruts

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

3.5.1 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.

3.5.2 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 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)	8
2	Comparaison trajet mouvement extérieur 1 (Gps vs Téléphone)	12
3	Comparaison latitude (Gps vs Téléphone)	13
4	Comparaison longitude (Gps vs Téléphone) mouvement extérieur1	13
5	Boite à moustache	13
6	Evolution de l'erreur en cours du temps	14
7	Valeurs aberrantes	14
8	Comparaison trajet immobile extérieur 1 (Gps vs Téléphone)	15
9	Comparaison latitude (Gps vs Téléphone)	16
10	Comparaison longitude (Gps vs Téléphone)	16
11	Boite à moustache	16
12	Evolution de l'erreur en cours du temps	17
13	Valeurs aberrantes	17
14	Comparaison trajet immobile extérieur 2 (Gps vs Téléphone)	18
15	Comparaison latitude (Gps vs Téléphone) immobile extérieur 2	19
16	Comparaison longitude (Gps vs Téléphone) immobile extérieur 2	19
17	Boite à moustache	19
18	Evolution de l'erreur en cours du temps	20
19	Valeurs aberrantes	20