

Développement d'un simulateur de centrale inertielle dédié aux systèmes de navigation par satellites

Ing. C. DEMELENNE
Dr J. LECOINTRE
PIERRARD – Virton

Cet article présente la réalisation d'un simulateur de centrale inertielle à neuf degrés de liberté. Une centrale inertielle est un instrument utilisé en navigation, capable d'intégrer les mouvements d'un mobile pour estimer son orientation, sa vitesse linéaire, sa position et le champ magnétique ambiant. La centrale inertielle associe des capteurs tels que les gyromètres, les accéléromètres et les magnétomètres. Le simulateur présenté dans cet article va permettre de générer un signal simulant le comportement d'une « vraie » centrale inertielle. L'intérêt d'un simulateur de centrale inertielle est notamment de pouvoir tester l'hybridation de plusieurs systèmes de positionnement.

Mots-clefs : Centrale inertielle, simulateur GNSS (Global Navigation Satellite System), Signal GPS, Inertial Measurement Unit, Distance Measuring Equipment.

This article presents the implementation of a nine degrees of freedom inertial measurement unit. An inertial measurement unit is an electronic device that measures and reports a body's specific force, angular rate, and the magnetic field surrounding the body, using a combination of accelerometers, gyroscopes, and magnetometers. The simulator presented in this article will help to generate a signal simulating the behavior of a “real” inertial measurement unit. The purpose of such simulator is to test the hybridization of several positioning.

Keywords: Inertial Measurement Unit (IMU), GNSS simulator (Global Navigation Satellite System), GPS Signal, Inertial Measurement Unit, Distance Measuring Equipment.

1. Introduction

La géolocalisation est omniprésente dans la vie de tous les jours (GPS, objets connectés, etc.) mais aussi au niveau industriel (mouvement automatisé, transport de matériaux, etc.). La rentabilité d'une entreprise peut donc être influencée directement par ses services de localisation.

Dans le but de maintenir le meilleur service (haute précision et service constant) dans chaque composant essentiel d'une plateforme de géolocalisation, certaines sociétés se sont spécialisées dans la recherche et le développement de ces composés et les moyens de les expérimenter (par exemple : M3 Systems Belgium, Galaxia Business Park, Transinne).

Il s'agit ici de développer un simulateur GNSS (Global Navigation Satellite System) dans le but de simuler d'autres systèmes de positionnement. Les systèmes GNSS ont un rôle primordial dans le positionnement aussi bien terrestre qu'aérien. En effet, un récepteur compatible peut récupérer sa position et ainsi obtenir une localisation en trois dimensions (longitude, latitude et altitude). Cette géolocalisation est rendue possible grâce à un ensemble de satellites formant une constellation orbitale autour de la terre.

A l'heure actuelle, le système GNSS englobe quatre systèmes de positionnement par satellites globaux :

GPS : Système Américain

Galileo : Système Européen

GLONASS : Système Russe

Compass-Beidou : Système Chinois

De nos jours, seuls les systèmes GPS et GLONASS sont totalement opérationnels ; Galileo et Compass-Beidou étant en cours de développement. [1]

La géolocalisation satellitaire utilise des radiofréquences pour transmettre ces informations via une bande porteuse vers le récepteur. A l'origine, deux bandes étaient utilisées L1 (1575,42 MHz) et L2 (1227,60 MHz). Due à la modernisation du système, une nouvelle bande fut créée : L5 (1176,45 MHz).

L'utilisation d'un tel système de géolocalisation permet un transfert rapide entre émetteur et récepteur, mais la propagation du signal est entravée par tout obstacle entre ces derniers. Pour contrer toutes perturbations (tunnel, bâtiment, etc.), les entreprises de géolocalisation recherchent de nouvelles solutions.

Un exemple de solution est l'hybridation d'une centrale inertielle avec les systèmes utilisant le GNSS. Les centrales inertielles sont un moyen de définir la position d'un mobile de façon autonome (sans apport de signaux extérieurs), aussi bien pour les véhicules terrestres que les mobiles aéronautiques. Une fusion de données entre

GNSS et IMU (Inertial Measurement Unit) offre une solution de navigation plus robuste et permet d'en améliorer la continuité de fonctionnement (par exemple, lors du passage dans un tunnel). En effet, le système de centrale inertielle n'utilise que des capteurs internes (accéléromètre, gyromètre, etc.) n'est donc pas influencé par des erreurs externes. Mais ce type de capteurs engendre avec le temps des erreurs grandissantes demandant un recalibrage. Ces erreurs proviennent des mesures des rotations et des accélérations (biais, bruit, facteur d'échelle, etc.).

Une autre solution pourrait être via l'utilisation de signaux DME (Distance Measuring Equipment) dans le domaine de l'aviation. En effet, le système DME permet à un avion de mesurer sa distance (en trois dimensions) le séparant d'une station au sol, ceci en mesurant le temps d'émission aller/retour d'une impulsion radio (avion/station, station/avion). Cette approche offre une solution de positionnement indépendante améliorant le niveau global de sécurité par redondance.

L'objectif global est d'intégrer au simulateur GNSS, un simulateur IMU et/ou un simulateur DME afin de fournir un banc de tests pour divers systèmes de navigation, pour divers domaines (navigation terrestre ou aéronautique, domaine militaire, etc.).

Pour réaliser au mieux cet objectif, il est primordial que les simulateurs GNSS, IMU et/ou DME fonctionnent de manière harmonieuse. En effet, le positionnement calculé par les différents simulateurs se doit d'être similaire, quel que soit le choix ou la combinaison des capteurs, ceci entraînant une utilisation des mêmes données de base (vitesse, trajectoire, etc.), mais aussi un fonctionnement synchrone des différents simulateurs.

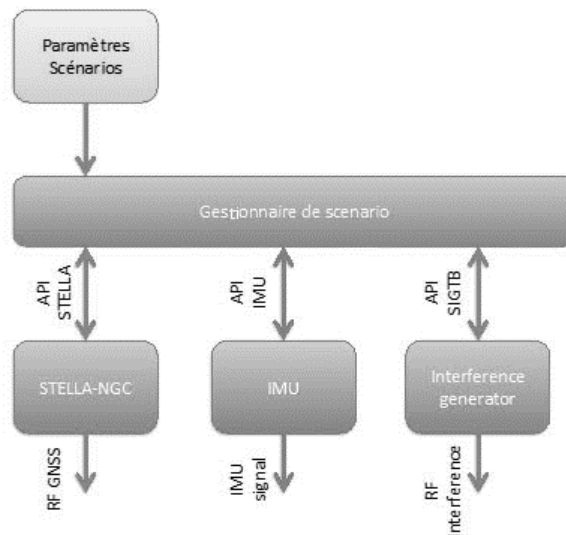


Figure 1 : Architecture du banc de test de navigation.

L'architecture souhaitée suit la figure 1. Le pilotage des différents simulateurs se fait via une « surcouche » logicielle appelée « Gestionnaire de scénario » et permet d'assurer la cohérence des données simulées. Elle prend en entrée divers paramètres qu'elle utilise pour piloter les divers simulateurs via leur API respective (Application Programming Interface) : STELLA est un simulateur GNSS (M3 Systems Belgium), et SIGTB, une plateforme GNSS (M3 Systems Belgium)

La partie développée dans cet article concerne essentiellement la partie IMU, suivie d'une partie pour le développement du gestionnaire de scénario.

Ceci se fera :

1. D'une part par la compréhension du fonctionnement intrinsèque des systèmes IMU, permettant le développement d'un simulateur de centrale inertielle réaliste. Le modèle IMU doit reproduire le comportement d'une centrale inertielle 9 axes (accéléromètre, gyroscope et boussole) fidèle à une trajectoire donnée en entrée.
2. Et, d'autre part, dans la participation au déploiement du gestionnaire de scénario. Ce dernier permet le pilotage synchrone et cohérent du simulateur IMU, du simulateur GNSS et d'autres simulateurs de positionnement.

Les spécifications techniques sont les suivantes :

- Le simulateur IMU prend en compte le bruit et le biais sur les neuf axes (a minima)
- Le simulateur IMU doit pouvoir fonctionner à 100 Hz
- Le pilotage du simulateur IMU peut être effectué à un rythme deux fois plus lent (50 Hz)
- Une API dédiée au simulateur IMU sera développée
- Le simulateur IMU est intégré au gestionnaire de scénario au moyen de son API spécifique
- Le Gestionnaire de scénario utilise en entrée les paramètres nécessaires au pilotage du simulateur GNSS, du simulateur IMU et du simulateur DME
- La synchronisation du simulateur GNSS et du simulateur IMU est inférieure à 0,02 seconde

2. Théorie

Pour mieux appréhender la création d'une centrale inertielle de type IMU, il est important de poser les bases d'un tel système.

Une centrale inertielle est un instrument de localisation ayant la capacité d'intégrer les mouvements d'un mobile (accélération, vitesse angulaire, etc.). Le principal avantage d'un tel instrument de mesure est dans son fonctionnement par capteurs internes ne demandant pas de signaux extérieurs, ceci limitant les perturbations ex-

ternes. Les désignations habituelles pour une centrale inertielle sont : Inertial Reference System (IRS), Inertial Navigation System (INS) et IMU. La centrale inertielle IMU est un système de capteurs sans calculateur. Le positionnement par système de centrale inertielle va donc permettre de déterminer la position, la vitesse et l'accélération d'un véhicule.

Les trois gyromètres permettent de mesurer les trois composants du vecteur vitesse angulaire (roulis, lacet et tangage). Les trois accéléromètres permettent de mesurer les trois composants du vecteur force spécifique. Cette dernière est l'addition de forces extérieures divisée par la masse du mobile. On peut donc qualifier cette valeur comme la dimension d'une accélération.

Les gyromètres et les accéléromètres sont, de manière générale, la base de prise de mesures d'une centrale inertielle. Pour améliorer la précision ou le nombre d'informations mesurées par une centrale inertielle, certains capteurs sont parfois ajoutés : par exemple, un ou plusieurs magnétomètres qui vont permettre de connaître l'altitude ou la position du mobile en fonction du champ magnétique terrestre, un baromètre pour connaître la pression ambiante, un capteur de température pour connaître la température ambiante, etc.

2.1. Capteurs

La précision des capteurs ainsi que leurs mensurations varient en fonction des technologies employées, le prix étant directement proportionnel à la précision voulue.

Accéléromètre

Un accéléromètre est un dispositif permettant de mesurer l'accélération linéaire d'un mobile sur lequel il est fixé. La norme SI (Système International) définit l'accélération en m/s^2 , tandis qu'un accéléromètre donne majoritairement ses mesures en « g » ($\approx 9,81 m/s^2$). De façon simplifiée, un accéléromètre se schématise comme un système de masse-ressort.

Il existe deux grandes familles d'accéléromètre : non-asservis et à asservissement.

Non-asservis

Ces capteurs fonctionnent en « boucle ouverte », c'est à dire que la mesure en sortie est une image directe du déplacement de la masse d'effort du capteur, pour atteindre une égalité entre la force de rappel et la force d'inertie. Il existe différents procédés de détection : piézo-électrique, piézo-résistif, capacitive, inductive, optique...

A asservissement

Dans le cas des accéléromètres asservis, l'objectif du système est de maintenir la masse d'effort en position, indépendamment de l'accélération subie. Pour ce faire,

une force de rappel est créée avec un actionneur électromagnétique commandé en courant (électrique). Lorsque la masse est en position d'équilibre, le courant nécessaire pour engendrer la force de maintien donne la force d'accélération. La force de rappel peut être de type électromagnétique ou électrostatique.

Gyromètre

Un gyromètre est un capteur mesurant une vitesse angulaire ; il est utilisé principalement dans les avions, les bateaux, sous-marins pour déterminer leur vitesse et leur position. Il y a deux grandes classes de gyromètres, utilisant soit l'effet Sagnac (fibre optique et laser), soit l'effet inertiel (force de Coriolis).

Magnétomètre

Un magnétomètre permet de mesurer l'intensité et/ou la direction d'un champ magnétique. Il utilise un capteur de champ magnétique qui, combiné à un dispositif électronique, permet d'extraire la mesure du champ magnétique. Plusieurs types existent suivant divers principes physiques.

L'utilisation principale des magnétomètres est dans un cadre géologique et lors de la détection d'anomalies magnétiques ou d'objets ferreux. Au cours des dernières années, les magnétomètres ont été miniaturisés au point de pouvoir être intégrés en tant que boussole à l'intérieur de composants (GPS, téléphone mobile, etc.).

Famille de magnétomètres

Un champ magnétique pouvant interagir de différentes manières avec un système physique, il existe une grande variété de magnétomètres. Cette interaction peut être sous la forme d'une force, mesurant ainsi le champ magnétique via le moment de cette force. Un champ magnétique peut aussi interagir avec un système électronique (effet hall, fluxgate, SQUID, etc.). Il peut également interagir avec les photons, utilisant divers effets (effet Zeeman, effet Kerr, effet Faraday) pour mesurer le champ magnétique. On recense ainsi plusieurs types de magnétomètres :

- Effet Hall
- Magnétomètres scalaires
- Magnétomètres à résonance de protons
- Magnétomètres à pompe optique
- Magnétomètres vectoriels (à induction magnétique, SQUID, etc.)

3. Développement du simulateur : partie théorique

Le simulateur IMU doit pouvoir donner les informations de déplacement du mobile suivant neuf degrés de liberté, communément appelé 9 DOF (Degrees of Freedom). Ces derniers sont répartis sur les trois capteurs et leurs trois axes (x, y et z). Les capteurs utilisés sont : (i) le gyromètre, (ii) l'accéléromètre et (iii) le magnétomètre.

Pour pouvoir convertir un déplacement en neuf degrés de liberté, il faut passer par quatre étapes principales (figure 2) :

1. Extraction et conversion du mouvement du mobile
2. Traitement et conversion des données
3. Introduction erreurs
4. Envoi des données

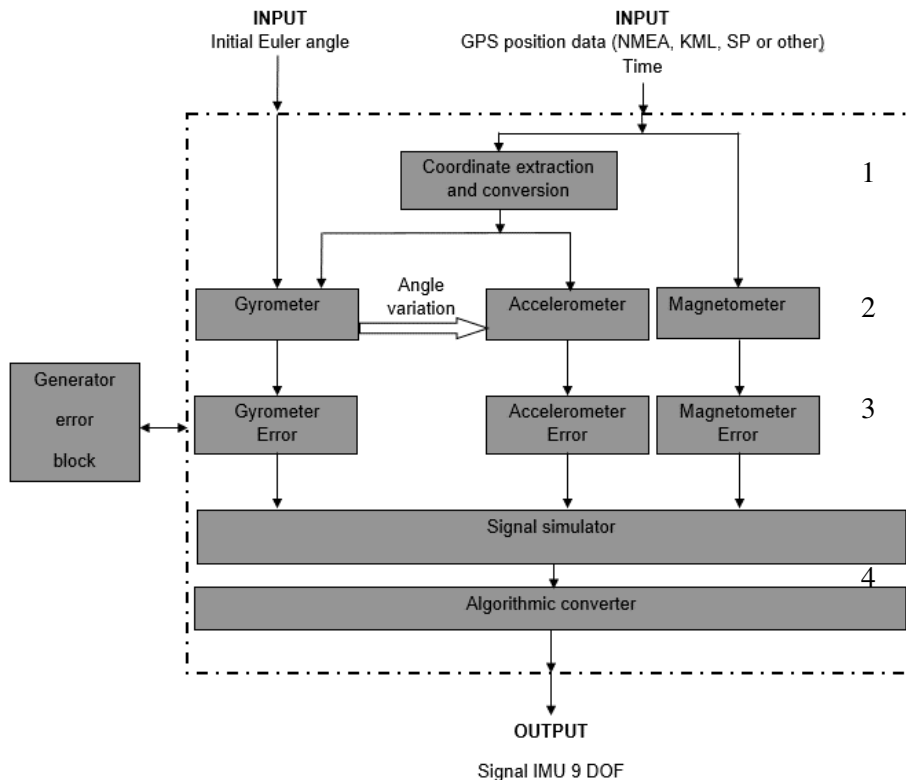


Figure 2 : Schéma général simulateur IMU

3.1. Extraction et conversion du mouvement du mobile

Extraction du mouvement du mobile

Avant de pouvoir convertir le mouvement du mobile suivant les différents capteurs, il faut commencer par définir ce mouvement. Pour ce faire, il faut utiliser les données du mobile réceptionnées en entrée, données pouvant avoir plusieurs formats et provenant du simulateur existant.

Le choix s'est porté sur le format d'entrée NMEA (National Marine Electronics Association), car ce dernier possède les informations de latitude, longitude, date, heure,

hauteur etc. Ces données permettent de passer d'une trame NMEA de positionnement de mobile à des données liées aux 3 axes de l'accéléromètre, aux 3 axes du gyromètre et aux 3 axes du magnétomètre (les autres informations ne sont pas utiles dans le cas présenté).

GGA	Système de positionnement global données Corrigées
123519	Correctif pris à 12 h 35 min 19 s UTC
4807.038, N	Latitude : 48 degrés 07.038' N
01131.000, E	Longitude : 11 degrés 31.000' E
1	Qualité du correctif : 1=GPS corrigé
08	Nombre de satellites poursuivis
545.4, M	Altitude en mètre par rapport au niveau de la mer

Tableau 1 : trame NMEA

La trame NMEA fonctionne selon le format suivant [2] :

\$ GPGGA, 123519,4807.038, N,01131.000, E, 1,08, 0.9, 545.4, M,46.9, M,,*47

Pour extraire les données, un programme Labview® a été réalisé pour lire le premier symbole de la trame (\$ GPGGA) puis aller à chaque « , » extraire la donnée suivante (figure 3). Ce programme permet de sortir la longitude, latitude etc. Ces données sont traitées dans les algorithmes aux points suivants.

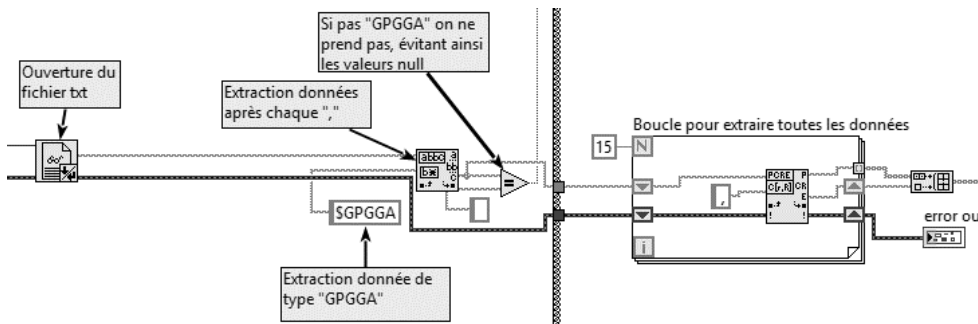


Figure 3 : Extraction NMEA-GPGGA

Conversion du mouvement du mobile

Une fois les données de latitude, longitude, date et heure extraites, il faut les convertir suivant les différents capteurs.

Notion de référentiel

En physique, un référentiel représente un système de coordonnées de l'espace permettant de repérer un point dans cet espace. Si on ajoute le facteur temps aux trois coordonnées d'espace, on peut quantifier la position, la vitesse et l'accélération du mobile suivant ce référentiel. Dans le cas présent, on quantifie les coordonnées suivant deux référentiels : le référentiel « fixe » et « mobile ».

Référentiel fixe

La conversion du mouvement du mobile permet de convertir les coordonnées du référentiel géodésique LLA (pour Latitude [°], Longitude [°] et Altitude [m ou km]) en coordonnées géodésiques cartésiennes (x,y,z) (aussi appelées ECEF-(Earth Centered Earth Fixed)) [3]. Ces données de localisation suivent un format spécifique (WGS84, GRS80, etc.) qui définit les différents paramètres de l'ellipsoïde de révolution. Les formules de passage du format LLA en ECEF sont reprises ci-dessous :

$$\begin{aligned} X &= (N + h) \cos \phi \cos \lambda & N(\phi) &= a / \sqrt{1 - e^2 \sin^2 \phi} \\ Y &= (N + h) \cos \phi \sin \lambda & f &= \frac{a - b}{a} \\ Z &= [N(1 - e^2) + h] \sin \phi & e^2 &= 2f - f^2 \end{aligned}$$

Où :

ϕ, λ, h sont la latitude géodésique, la longitude et l'altitude au dessus de l'ellipsoïde

X, Y, Z sont les coordonnées cartésiennes fixes centrées au centre de la Terre

N est le rayon de courbure en vertical

a est l'axe semi-majeur de la Terre (rayon équatorial de l'ellipsoïde)

b est l'axe semi-mineur de la Terre (rayon polaire de l'ellipsoïde)

f est l'aplatissement

e est l'excentricité

Dans le cadre de cette étude, le format utilisé est le WGS84, ce qui donne les valeurs de paramètres suivantes :

$$a = 6\,378\,137 \text{ m}, b = 6\,356\,752,314 \text{ m} \text{ et } f = 1/298,257$$

Le référentiel obtenu suit les référentiels géodésiques classiques : l'origine (0,0,0) est au centre de la terre, l'axe Z pointe vers le pôle nord, l'axe X pointe vers le croisement entre le méridien de Greenwich et l'équateur, et l'axe Y finit le repère ortho-normé.

Référentiel mobile

Le référentiel mobile est fixé au niveau de la centrale inertielle et suit l'orientation de cette dernière. De manière « classique », le centre de la centrale inertielle représente le point (0, 0, 0), l'axe X pointe vers l'avant du mobile, l'axe Z pointe vers le bas et l'axe Y pointe vers la droite.

Changement de référentiel

Pour pouvoir utiliser les données d'une centrale inertielle (analyse, hybridation avec un système GPS, etc.), il est important de respecter les référentiels utilisés. Pour passer d'un référentiel mobile à un référentiel fixe, et inversement, il faut passer par une matrice de rotation.

Pour chaque matrice de rotation, plusieurs notions sont utilisables : quaternion, angle d'Euler... Dans notre cas, seuls les angles d'Euler et les cosinus directeurs sont utilisés.

3.2. Traitement et conversion données

Simulation du gyromètre

La simulation du gyromètre permet de générer un signal de trois variations de vitesse angulaire. Cette génération se fait via quatre étapes.

Conversion coordonnée LLA en coordonnée cartésienne

Pour commencer, il est important de convertir les données latitude, longitude et hauteur en référentiel ECEF. Ceci permet de travailler avec des distances en mètres et non avec un mélange entre des données en degrés (latitude, longitude) et en mètres (hauteur).

Changement de référentiel

Pour pouvoir utiliser les coordonnées suivant le bon référentiel, il est important de faire passer ces coordonnées du référentiel fixe vers le référentiel propre au mobile. Dans le cas du gyromètre, ce changement de référentiel se fait via l'utilisation des angles d'Euler initiaux.

Ces angles d'Euler sont définis au début de la simulation du simulateur et restent fixes au cours de celle-ci. Cette initialisation simule le positionnement initial de la centrale inertielle.

Le changement de référentiel utilise la matrice de rotation [4] :

$$\begin{pmatrix} x'' \\ y'' \\ z'' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c(\phi)c(\Psi) & s(\phi)s(\theta)c(\Psi) + c(\phi)s(\Psi) & -c(\phi)s(\theta)c(\Psi) + s(\phi)s(\Psi) \\ -c(\theta)s(\Psi) & -s(\phi)s(\theta)s(\Psi) + c(\phi)c(\Psi) & c(\phi)s(\theta)s(\Psi) + s(\phi)c(\Psi) \\ s(\theta) & -s(\phi)c(\theta) & c(\phi)c(\theta) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$$

Avec :

- Φ : Angle d'Euler de rotation suivant l'axe X (Roulis)
- Θ : Angle d'Euler de rotation suivant l'axe Y (Tangage)
- Ψ : Angle d'Euler de rotation suivant l'axe Z (Lacet)
- c = cosinus et s = sinus
- (x, y, z) : Coordonnée dans le référentiel mobile
- (x'', y'', z'') : Coordonnée dans le référentiel fixe

Calcul de la variation de vitesse angulaire

Une fois les coordonnées passées dans le référentiel du mobile, il faut maintenant calculer les variations de vitesse angulaire. Ces variations permettent de définir l'attitude relative (par rapport au référentiel initial) du mobile en fonction du temps.

Cette dernière est importante pour pouvoir calculer la position relative du mobile au cours du temps.

Pour pouvoir déterminer la variation de vitesse angulaire au temps t , il est nécessaire de passer par plusieurs étapes :

- Calculer le vecteur pour les trois axes au temps t
- Calculer la norme de ce vecteur
- Calculer l'angle entre chaque axe (x , y et z initiaux) et le vecteur au temps t
- Calculer la variation d'angle entre le temps t et le temps $t - 1$.
- Calculer la variation de vitesse angulaire au temps t

Ajout d'erreurs

Une fois la variation de vitesse angulaire calculée, il faut maintenant ajouter diverses erreurs pour simuler le comportement d'un capteur réel. En effet, ce dernier ne représente jamais une valeur « parfaite ».

Simulation de l'accéléromètre

La simulation d'un accéléromètre réel se fait également via quatre étapes.

Conversion des coordonnées

La conversion des coordonnées se fait via les informations données dans la section 3.1.

Calcul des différentes accélérations

Le calcul des accélérations se fait sur base des formules de cinématique classiques.

Changement de référentiel

L'accélération calculée représente l'accélération du mobile dans le référentiel fixe (ECEF). Pour simuler l'accélération à chaque temps dans le référentiel du mobile et ainsi simuler un accéléromètre, il faut faire passer ces valeurs dans le référentiel du mobile au temps t . Le référentiel du mobile étant lié au corps en mouvement, il se modifie à chaque instant. Pour suivre ce changement de référentiel, il faut utiliser les valeurs du gyromètre calculées précédemment pour le changement de référentiel. Ceci donne comme matrice de rotation :

$$\begin{pmatrix} cy.cp - co.sp.sy & cy.sp + co.cp.sy & sy.so \\ -sy.cp - cp.sp.cy & -sy.sp - co.cp.cy & cy.so \\ so.sp & -so.cp & co \end{pmatrix}$$

Avec:

c = cosinus et s = sinus

p = Angle du gyroscope suivant l'axe x

α = Angle du gyroscope suivant l'axe y

β = Angle du gyroscope suivant l'axe z

Ajout d'erreurs

Comme pour le gyromètre, il faut maintenant ajouter diverses erreurs à l'accéléromètre pour simuler le comportement d'un capteur réel.

Simulation du magnétomètre

Contrairement aux précédents capteurs, le magnétomètre mesure le champ magnétique terrestre et non une valeur relative. Le champ magnétique terrestre est dû aux caractéristiques de la composition de la Terre. Pour quantifier ce dernier, différents modèles mathématiques ont été développés ; les plus connus sont le modèle WMM (World Magnetic Model) et le modèle IGRF (International Geomagnetic Reference Field). Le champ magnétique terrestre est variable dans le temps ; pour palier à cette variation, les modèles sont mis à jour tous les cinq ans. Les quatre étapes de travail sont les suivantes.1

Extraction coefficient WMM

Le modèle WMM utilise ses coefficients mathématiques propres [5]. Les fichiers correspondant à l'année voulue sont disponibles librement sur les différents sites officiels. L'extraction de ces fichiers suit la logique d'extraction des données de trajectoire des fichiers NMEA.

Conversion coefficient WMM

Une fois les coefficients extraits de la base de données du modèle voulu, on peut déduire le champ magnétique à un point voulu.

Formule pour le modèle WMM

Pour définir le champ magnétique terrestre comme un magnétomètre, il faut le calculer suivant les différents axes du repère fixe. Pour ce faire, il faut utiliser les formules :

$$X = -B_\theta \cos \varepsilon - B_r \sin \varepsilon$$

$$Y = B_\phi$$

$$Z = B_\theta \sin \varepsilon - B_r \cos \varepsilon$$

Avec : ε terme correcteur pour l'aplatissement de la terre.

V potentiel magnétostatique [6] : $\vec{B} = -\nabla V$

$$V = a \sum_{n=1}^k \left(\frac{a}{r} \right)^{n+1} (n+1) \sum_{m=0}^n (g_n^m \cos m\phi + h_n^m \sin m\phi) P_n^m(\theta)$$

B_θ, B_z et B_ϕ les forces du champ magnétique en coordonnées tangentielles :

$$B_r = \frac{-\partial V}{\partial r} = \sum_{n=1}^k \left(\frac{a}{r}\right)^{n+2} (n+1) \sum_{m=0}^n (g_n^m \cos m\phi + h_n^m \sin m\phi) P_n^m(\theta)$$

$$B_\theta = \frac{-1}{r} \frac{\partial V}{\partial \theta} = -\sum_{n=1}^k \left(\frac{a}{r}\right)^{n+2} \sum_{m=0}^n (g_n^m \cos m\phi + h_n^m \sin m\phi) \frac{\partial P_n^m(\theta)}{\partial \theta}$$

$$B_\phi = \frac{-1}{r \sin \theta} \frac{\partial V}{\partial \phi} = \frac{-1}{\sin \theta} \sum_{n=1}^k \left(\frac{a}{r}\right)^{n+2} \sum_{m=0}^n m (-g_n^m \sin m\phi + h_n^m \cos m\phi) P_n^m(\theta)$$

Avec g_n^m et h_n^m : Facteur Schmidt quasi-normalisé dans la forme récursive :

$$S_{0,0} = 1 \quad \text{et} \quad g^{n,m} = S_{n,m} g_n^m$$

$$S_{n,0} = S_{n-1,0} \left(\frac{2n-1}{n}\right) \quad h^{n,m} = S_{n,m} h_n^m$$

$$S_{n,m} = S_{n,m-1} \sqrt{\frac{(n-m+1)(\partial_m^l + 1)}{n+m}}$$

Avec ∂_m^l : delta de Kronecker défini tel que $\partial_m^l = 1$ si $l = m$ sinon $\partial_m^l = 0$ si $l \neq m$.

$P_n^m(\theta)$ et $\frac{\partial P_n^m(\theta)}{\partial \theta}$: coefficients de Gauss normalisés et dérivés avec Legendre :

$$P^{0,0} = 1 \quad \text{et} \quad \frac{\partial P^{0,0}}{\partial \theta} = 0$$

$$P^{n,n} = \sin \theta P^{n-1,n-1} \quad \frac{\partial P^{n,n}}{\partial \theta} = \sin \theta \frac{\partial P^{n-1,n-1}}{\partial \theta} + \cos \theta P^{n-1,n-1}, n \geq 1$$

$$P^{n,m} = \cos \theta P^{n-1,m} - K^{n,m} P^{n-2,m} \quad \frac{\partial P^{n,m}}{\partial \theta} = \sin \theta \frac{\partial P^{n-1,m}}{\partial \theta} + \sin \theta P^{n-1,m} - K^{n,m} \frac{\partial P^{n-2,m}}{\partial \theta}$$

Où le coefficient K est donné par :

$$K^{n,m} = 0, n=1 \quad \text{et} \quad K^{n,m} = \frac{(n-1)^2 - m^2}{(2n-1)(2n-3)}, n > 1$$

Variables :

- a : rayon de référence de la terre (6371.2km)
- θ, r et Φ : coordonnées géocentriques (r le rayon [km], θ la co-latitude (90°-latitude) [°] et Φ la longitude [°])
- n : degrés du facteur Schmidt quasi-normalisé
- m : ordre du facteur Schmidt quasi-normalisé

Ajout d'erreurs

Comme pour les capteurs précédents, il faut maintenant ajouter diverses erreurs au magnétomètre pour simuler le comportement d'un capteur réel.

3.3. Choix des erreurs

Pour simuler au mieux les capteurs réels, il convient d'ajouter aux différentes valeurs calculées diverses erreurs. Ces erreurs sont les suivantes :

- Bruits des différents capteurs aléatoires, blancs et gaussiens.
- Biais pour chaque capteur (erreurs fixes dans le temps).

Un bruit blanc est une réalisation d'un processus aléatoire dans lequel la densité spectrale de puissance est la même pour toutes les fréquences de la bande passante. Le bruit blanc gaussien est un bruit blanc qui suit une loi normale de moyenne et variance données. Des générateurs de signaux aléatoires (« signal de bruit ») sont utilisés pour des essais de dispositifs de transmission et, à faible niveau, pour l'amélioration des systèmes numériques. Dans notre cas, l'étude consiste à mesurer l'influence du bruit sans le filtrer.

La valeur des différentes erreurs provient de la constitution de chaque capteur. Si on prend comme exemple pour des valeurs réelles le capteur de type MEMS MAG, ce dernier possède les caractéristiques d'une IMU 9 DOF, le tout de dimension faible (18×18×12 mm). Les caractéristiques des trois capteurs sont données aux tableaux 2, 3 et 4.

Paramètres	Caractéristiques
Etendue de la mesure	$\pm 2 g$
Bande passante	0 - 50 Hz
Précision	$< 4 \mu g$
Bruit (X et Z)	$92 \mu g / \sqrt{Hz}$
Bruit (Y)	$110 \mu g / \sqrt{Hz}$
Gamme de Température	0°C à 70°C

Tableau 2 : Caractéristiques accéléromètre capteur MAG³ de MEMsense

Paramètres	Caractéristiques
Etendue de la mesure	$\pm 150 \text{ }^\circ/s$
Dérive	$< 0.01 \text{ }^\circ/h$
Bande passante	0 - 50 Hz
Densité de bruit	$0.1 \text{ }^\circ/s / \sqrt{Hz}$
Gamme de Température	0°C à 70°C

Tableau 3 : Caractéristiques gyromètre du capteur MAG³ de MEMsense

Paramètres	Caractéristiques
Etendue de la mesure	$\pm 1.9 \text{ Gauss}$
Bande passante	0 – 50 Hz
Densité de bruit	$0.14 \text{ mGauss}/\sqrt{\text{Hz}}$
Gamme de Température	0°C à 70°C

Tableau 4 : Caractéristique magnétomètre du capteur MAG³ de MEMsense

4. Développement du simulateur : partie pratique

Les différentes parties du programme Labview® final du simulateur IMU suivent le plan suivant.

4.1. Programme de contrôle général (Main)

But du programme Main

Le programme de contrôle général (communément appelé « main ») permet de gérer les différents programmes et sous-programmes.

Ce contrôle permet :

- D'exécuter les différents programmes suivant un ordre précis ; par exemple, convertir les coordonnées avant de calculer les accélérations, etc.
- De dispatcher les données à chaque programme ; par exemple, envoyer les coordonnées format LLA à la conversion, les coordonnées converties à l'accéléromètre, etc.
- D'activer ou non l'ajout d'erreurs : l'utilisateur peut activer ou non les erreurs à la sortie des capteurs.
- De choisir le modèle du magnétomètre : IGRF ou WMM.
- De choisir la fréquence de sortie : si l'utilisateur souhaite une fréquence de sortie supérieure à la fréquence d'entrée, le programme principal va boucler les valeurs de sorties pour générer diverses valeurs.

Entrée programme Main

Pour ce faire, le programme principal prend en entrée :

- La position du mobile en format LLA.
- Le fichier avec les coefficients WMM (toutes années confondues).
- Le fichier avec les coefficients IGRF (toutes années confondues).
- Le temps entre deux données.
- La date des données de positionnement.
- Les angles d'Euler initiaux.
- Une information pour connaître le choix de l'utilisateur sur l'activation ou non des erreurs sur les capteurs, ainsi que leurs valeurs.

- Une information pour connaître le choix de l'utilisateur sur le modèle du magnétomètre voulu (IRGF, WMM ou automatique).
- La fréquence d'entrée et de sortie des données.

Sortie programme Main

En sortie du programme main, on retrouve :

Les valeurs (avec erreurs ou non) des trois capteurs de l'IMU (accéléromètre, gyromètre, magnétomètre) avec leurs unités respectives.

4.2. Programme d'extraction coefficients WMM et IRGF

But du programme d'extraction

Le programme d'extraction des coefficients WMM et IRGF permet d'extraire des fichiers textes correspondants aux valeurs des coefficients de l'année voulue. Ils sont sauvegardés dans diverses variables pour être utilisés par le magnétomètre tout au long du cycle. L'intérêt d'extraire les données une seule fois permet de gagner du temps et de la puissance pour le programme.

Entrée programme d'extraction

Pour ce faire, le programme d'extraction des coefficients prend en entrée :

- Le fichier texte avec les valeurs pour chaque année (1900-2015 pour le modèle IRGF et 2000-2015 pour le modèle WMM).
- L'année voulue.

Sortie programme d'extraction

Le programme renvoie dans diverses variables les coefficients extraits pour chaque modèle suivant l'année en entrée.

4.3. Programme de conversion des coordonnées

But du programme de conversion

Le programme de conversion des coordonnées permet le passage des coordonnées LLA en coordonnées cartésiennes (ECEF) dans le référentiel fixe. L'appel de ce programme se fait à chaque nouvelle position en entrée pour permettre des calculs avec le bon format et référentiel des différentes positions.

Entrée programme de conversion

Pour convertir les données, le programme de conversion prend en entrée la position du mobile, en format LLA (Latitude [°] ; Longitude [°] et Altitude [m]) suivant la norme WGS84.

Sortie programme de conversion

En sortie, le programme de conversion fournit la position du mobile en format cartésien (x,y,z) avec comme unité le mètre.

4.4. Programme de simulation accéléromètre***But du programme simulation accéléromètre***

Le but du programme de simulation accéléromètre est de simuler le signal d'un accéléromètre « parfait ». En effet, il calcule l'accélération du mobile dans son référentiel propre sans compter les erreurs du capteur réel.

Entrée programme simulation accéléromètre

Pour calculer l'accélération du mobile dans son référentiel, le programme prend en entrée deux types de données :

- La position du mobile : en format cartésien (sortie du programme de conversion) avec le temps entre deux mesures (position [m] et temps [s])
- Les angles du gyromètre : les angles du gyromètre [rad] vont permettre le passage de l'accélération du repère fixe (ECEF) vers le repère.

Sortie programme simulation accéléromètre

En sortie de l'accéléromètre, on retrouve l'accélération du mobile dans son repère relatif [m/s²].

4.5. Programme de simulation gyromètre***But programme de simulation gyromètre***

Le programme de simulation du gyromètre permet de simuler le comportement d'un gyromètre « parfait » ; les erreurs sont rajoutées ultérieurement.

Entrée programme de simulation gyromètre

En entrée, le programme de simulation du gyromètre prend la position du mobile (sortie du programme de conversion) en mètre.

Sortie programme de simulation gyromètre

En sortie, le programme renvoie les données de variation de vitesse angulaire en rad/s. Ces données se limitent aux variations de tangage (axe y) et de lacet (axe z). En effet, il est impossible de définir une rotation du mobile sur lui-même avec des données GPS classiques. La valeur du roulis (axe x) est donc nulle.

4.6. Programme de simulation magnétomètre modèle WMM

But du programme de simulation magnétomètre WMM

Le magnétomètre WMM permet de simuler le champ magnétique d'un point quelconque sur la terre. Ce champ magnétique est basé sur le modèle mathématique WMM.

Entrée du programme de simulation magnétomètre WMM

Pour ce faire, le simulateur du magnétomètre WMM prend en entrée :

- Les coefficients WMM de l'année voulue (2000 à 2015)
- La position du mobile en formant LLA (Latitude [°], Longitude [°] et Altitude [m])

Sortie du programme de simulation magnétomètre WMM

En sortie, le magnétomètre fournit les valeurs du champ magnétique suivant les trois axes (x,y,z) en nano-tesla. Cette valeur est en format d'un simple point ou sous forme de vecteur (différence entre le point au temps t et t-1), les limites du simulateur étant les mêmes que les limites du modèle WMM.

4.7. Programme de simulation magnétomètre modèle IGRF

Comme pour le programme de simulation magnétomètre WMM, la simulation du magnétomètre IGRF reprend la même logique, mais avec les coefficients propres au modèle IGRF.

4.8. Programme d'ajout d'erreurs

But du programme d'ajout d'erreurs

Le programme d'ajout d'erreurs permet de simuler les erreurs de capteurs réels sur base des informations demandées par l'utilisateur.

Entrée du programme d'ajout d'erreurs

Le programme d'ajout d'erreurs prend en entrée les valeurs suivantes :

- Valeurs calculées pour chaque axe de chaque capteur (accéléromètre, gyromètre, magnétomètre).
- Valeurs d'erreurs : minimum et maximum du capteur, dérive et amplitude du bruit blanc gaussien.

Sortie du programme d'ajout d'erreurs

En sortie du programme, on retrouve la valeur d'entrée de chaque capteur ajoutée de leurs erreurs respectives. Ces erreurs sont calculées suivant les formules ci-dessous :

- $Si x < min \rightarrow x = min$

- $\text{Si } x > \text{max} \rightarrow x = \text{max}$
- $x' = x + \text{dérive} + \text{amplitude} \times \text{erreur gaussienne}$

Avec : x : valeur du capteur en entrée
 x' : valeur du capteur en sortie
 min : valeur que le capteur peut mesurer au minimum
 max : valeur que le capteur peut mesurer au maximum
 dérive : erreur constante dans le temps (par exemple accélération gravité sur l'accéléromètre)
 amplitude : valeur définie par l'utilisateur pour l'amplitude de l'erreur gaussienne
 Erreur gaussienne : bruit de gauss généré aléatoirement par Labview®.

4.9. Programme de génération valeurs

But du programme de génération valeurs

Comme demandé dans les spécifications, les capteurs de la centrale IMU doivent en sortie pouvoir générer des données suivant une fréquence supérieure ou égale à la fréquence en entrée. Pour ce faire, la même valeur calculée doit fournir plusieurs valeurs en sortie.

Entrée du programme de génération valeurs

Le programme génération de valeurs nécessite diverses informations :

- La valeur de sortie du capteur
- La fréquence des valeurs en entrée
- La fréquence des valeurs en sortie
- La sensibilité des valeurs à générer : cette valeur représente l'amplitude voulue des valeurs de sorties

Sortie du programme de génération valeurs

En sortie du programme, on retrouve la valeur en entrée suivant la fréquence voulue.

Le calcul est le suivant :

$$x' = x + \text{sensibilité} \times \text{valeur random}$$

Avec :

x' : Valeur de capteur en sortie
 x : Valeur de capteur en entrée
 sensibilité : valeur choisie par l'utilisateur
 valeur random : valeur générée aléatoirement entre -1 et 1

5. Gestionnaire de scénario

Le gestionnaire de scénario permet de paramétrer et contrôler les différents simulateurs. Le fonctionnement des différents simulateurs se déroule suivant les étapes suivantes.

5.1. Choix du/des simulateurs

Le gestionnaire de scénario peut travailler avec un ou plusieurs simulateurs. L'activation ou non d'un simulateur se fait au début du cycle. Un simulateur ne peut être activé pendant un cycle.

5.2. Définition des paramètres

Chaque simulateur possède ses propres paramètres, repris ci-dessous.

Paramètres IMU

Pour le simulateur de centrale inertielle, les différents paramètres sont ceux développés précédemment (fréquence d'entrée, fréquence de sortie, angles d'Euler initiaux, paramètres d'erreurs, etc.)

Choix différentes valeurs

Pour configurer la simulation, il faut définir certains paramètres d'entrée :

- Date de la simulation
- Durée de la simulation
- Vitesse de la simulation
- Choix des constellations activées
- Fichier des constellations activées
- Fichier trajectoire

Formation des trames

Une fois un paramètre défini, il faut le compiler en format lisible. Pour ce faire, une partie du gestionnaire de scénario a été programmée, ce qui permet de compiler chaque paramètre au bon format.

Connexion

Une fois l'envoi, la réception la lecture, des différentes trames, il convient de fermer la connexion. Le système complet est repris dans la figure 4.

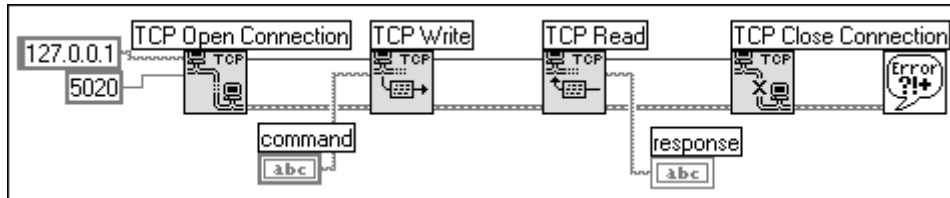


Figure 4 : TCP/IP

Lancement de la simulation

Une fois les différents paramètres et fichiers définis aux points précédents, la simulation peut se lancer. Pour se faire, chaque simulateur possède son lancement.

Exécution simulateur IMU

La simulation de la centrale inertielle fonctionne suivant les étapes suivantes :

- Calcul des variations angulaires et des vitesses angulaires (gyromètre)
- Calcul des accélérations en utilisant les coordonnées ECEF et les angles de l'étape 1 (accéléromètre)
- Calcul du champ magnétique (magnétomètre)
- Enregistrement des données dans un fichier texte (tableau 5).

Heure [hhmmss.ss]	Latitude [°]
Longitude [°]	Hauteur [m]
Position ECEF axe x [m]	Position ECEF axe y [m]
Position ECEF axe z [m]	Accélération axe x [m/s ²]
Accélération axe y [m/s ²]	Accélération axe z [m/s ²]
Variation vitesse angulaire axe x [°/s]	Variation vitesse angulaire axe y [°/s]
Variation vitesse angulaire axe z [°/s]	Champ magnétique axe x [nT]
Champ magnétique axe y [nT]	Champ magnétique axe z [nT]
Variation champ magnétique axe x [nT]	Variation champ magnétique axe x [nT]
Variation champ magnétique axe x [nT]	

Tableau 5 : Données issues de l'exécution du simulateur IMU

6. Validation et conclusion

6.1. Validation intermédiaire

La validation intermédiaire regroupe toutes les validations individuelles réalisées lors du développement du simulateur étapes par étapes. L'intérêt de procéder de telle façon permet un suivi des tests et des limites de chaque programme et sous-programme. Cette dernière se présente comme suit :

- Titre du programme ou sous-programme
- Descriptif du programme ou sous-programme

- Données en entrée
- Données en sortie
- Procédure des tests et formules
- Valeurs obtenues
- Conclusion

6.2. Validation globale

La validation globale permet de vérifier le bon fonctionnement du programme total et des différentes interactions entre chaque sous-programme. Pour ce faire, un plan de validation basé sur les spécifications, a été mis en place. Si on reprend les spécifications, on a les points principaux suivants :

- Simulation d'une centrale inertielle 9 DOF
- Simulation d'une centrale inertielle 9 DOF bruitée
- Pilotage en minimum 50hz
- Fonctionnement en minimum 100hz
- Fonctionnement centrale inertielle 9 DOF simulé avec une synchronisation inférieur à 0.02s

La simulation d'une centrale inertielle non bruitée permet de vérifier si les données générées permettent de calculer une position semblable à la position en entrée. Pour pouvoir vérifier le bon fonctionnement de la centrale inertielle, les données générées ont été utilisées pour calculer une position (figure 5).

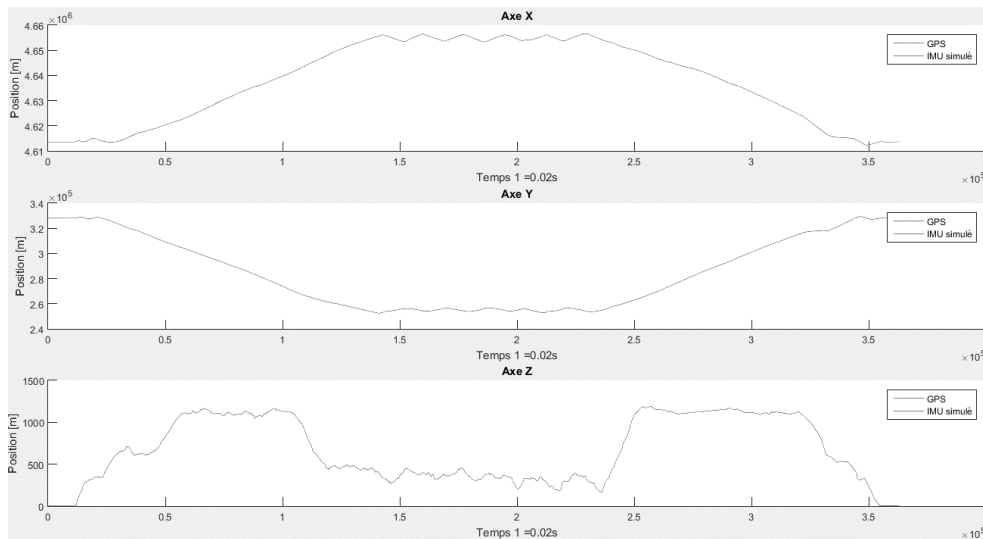


Figure 5 : Position non bruitée

Centrale inertielle non bruitée

Comme on peut l'observer, aucune différence visible n'apparaît sur les différents graphiques. La différence de position entre les données en entrée et les données calculées en sortie est de l'ordre du 10^{-9} mètre. Cette différence étant négligeable, le simulateur 9 DOF sans erreur est validé.

Centrale inertielle bruitée

La simulation d'une centrale inertielle 9 DOF bruitée doit reproduire les différents signaux d'une centrale inertielle ajoutée de bruit aléatoire Gaussien. La position calculée sur de telles données doit dériver dans le temps (les erreurs d'une centrale inertielle réelle augmentant avec le temps).

Comme pour le simulateur 9 DOF sans bruit, les données de sorties sont retransformées en trajectoires pour pouvoir être comparées avec les entrées (figure 6).

Pilotage en minimum 50hz

Lors des différents tests et génération de valeurs, le système a été piloté à son maximum pour un gain de temps. Ce maximum a comme valeur 1000Hz, ce qui valide le minimum de 50 Hz.

Fonctionnement en minimum 100hz

Comme pour le pilotage, le fonctionnement lors des tests a été poussé à son maximum qui correspond aussi à 1000 Hz ; la valeur de fonctionnement minimum de 100 Hz est donc validée.

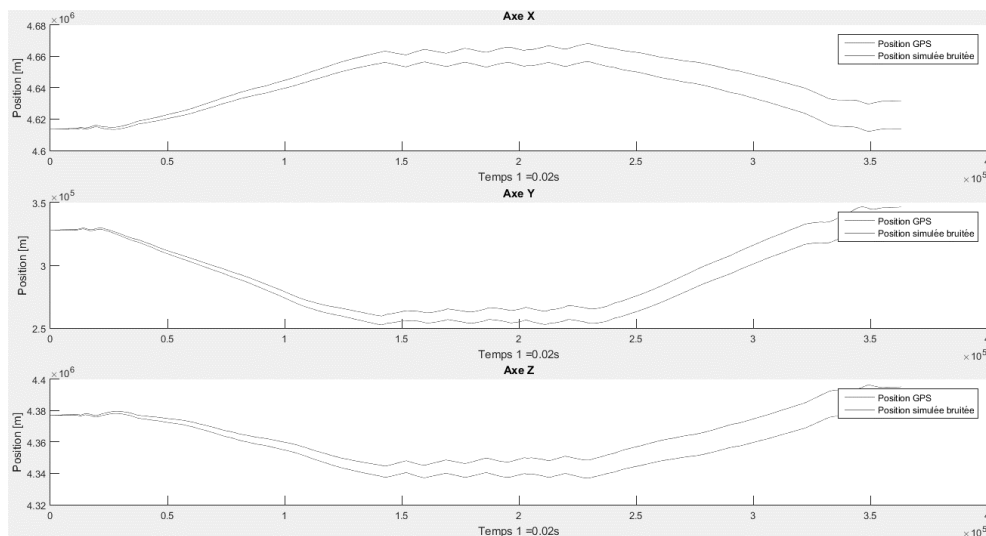


Figure 6 : Position bruitée

7. Sources

- [1] VAN DE VYVERE, L., *Détection des sauts de cycles en mode multifréquence pour le système Galileo*, Mémoire de master, Liège, Belgique : Université de Liège, juin 2015.
Adresse URL : <http://orbi.ulg.ac.be/handle/2268/184238>

- [2] DEPRIEST, D., (consulté le 3 mars 2016), *NMEA data*.
Adresse URL : www.gpsinformation.org/dale/nmea.htm

- [3] FEATHERSTONE, W. E.; CLAESSENS, S. J., *Closed-Form Transformation between Geodetic and Ellipsoidal Coordinates*
Stud. Geophys. Geod., 52 (1), 2008, pp. 1-18.

- [4] KWON, Y.-H., (consulté le 14 février 2016), *Orientation Angles*.
Adresse URL : www.kwon3d.com/theory/euler/euler_angles.html

- [5] NOAA, (consulté le 26 février 2016), *NCEI Geomagnetic Calculators*.
Adresse URL : www.ngdc.noaa.gov/geomag-web/?model=igrf#igrfwmm

- [6] WERTZ J. R., *Spacecraft Attitude: Determination and Control*
Dordrecht, Pays-Bas, D. Reidel Publishing Company, 1978, 858 p.