

Positionnement relatif sur base des mesures de code du signal Galileo E5 AltBOC

Cécile Deprez
(cecile.deprez@ulg.ac.be)

Université de Liège

Résumé du mémoire (max. 300 mots)

Depuis une dizaine d'années, l'Europe développe son propre système de positionnement par satellites (ou Global Navigation Satellites System (GNSS) en anglais), connu sous le nom de Galileo.

À la pointe de la technologie, les horloges atomiques embarquées à bord de ses satellites ainsi que les signaux transmis par ces derniers sont extrêmement prometteurs dans beaucoup de domaines. Bien que toujours en phase de test à l'heure actuelle, ce système a déjà conduit à de premières mesures, notamment en matière de positionnement.

Parmi ces nouvelles technologies, un signal en particulier semble très prometteur : Galileo E5, aussi appelé Galileo E5a+b ou encore Galileo E5 AltBOC. Ce signal permet d'effectuer des mesures de code et de phase plus précises. Il est également moins sensible au multi-trajet. Grâce à ses caractéristiques innovantes, Galileo E5 devrait permettre d'estimer des positions avec une précision supérieure à tous les autres signaux utilisés aujourd'hui.

Une étude comparative des positions estimées avec les systèmes GPS (américain) et Galileo (européen) sur leurs différentes fréquences émises (GPS L1, GPS L2, GPS L5 pour GPS et Galileo E1, Galileo E5a, Galileo E5b et Galileo E5 AltBOC pour Galileo) a été menée dans ce mémoire. Pour ce faire, une combinaison d'observations appelée double différence (DD) est utilisée sous différentes configurations (ligne de base nulle (ZB), courte (SB) et moyenne (MB)) de récepteurs GNSS. Les récepteurs utilisés appartiennent à l'Université de Liège (2 récepteurs Trimble NetR9, 1 récepteur Septentrio XS et un récepteur Septentrio X4).

Il ressort de cette étude que Galileo E5 AltBOC présente les observations les plus précises (en ZB, toutes sources d'erreurs éliminées). L'analyse démontre également qu'une précision de l'ordre de quelques décimètres sur la position à déterminer peut être atteinte avec les codes transmis par le signal Galileo E5, et ce jusqu'à 25 kilomètres de distance.

Description du caractère innovateur et original (max. 300 mots)

Le positionnement par satellites repose sur deux principaux observables : les codes et les phases. Les premiers sont peu précis (de l'ordre de quelques mètres sur les positions) mais non ambigus alors que les seconds sont très précis (de l'ordre de quelques centimètres ou millimètres sur les positions) mais requièrent la résolution d'une ambiguïté initiale. Le signal Galileo E5, caractérisé par une grande résistance aux interférences et une sensibilité réduite aux erreurs de multi-trajets, devrait conduire à des mesures de codes et de phases plus précises et robustes, donc à un positionnement plus précis.

L'hypothèse testée dans ce mémoire consiste à déterminer s'il est possible d'utiliser les mesures de codes, habituellement peu précises, avec la fréquence Galileo E5 AltBOC afin de calculer des positions avec une précision de l'ordre de quelques décimètres.

Très peu de recherches ont été menées jusqu'à maintenant sur ce signal. En effet, le positionnement par satellites requiert l'observation simultanée d'un minimum de 4 satellites ce qui n'était pas possible avec Galileo jusqu'en mars 2013. Dès lors, de nombreuses recherches ont été effectuées sur base de données simulées et très peu sur des données réelles.

De plus, le peu de satellites disponibles les dernières années ne permettait le calcul de positions que pendant des périodes de seulement quelques heures par semaine.

Finalement, les positions résultantes étaient entachées de nombreuses erreurs dont une due à la géométrie de la constellation, apparaissant notamment lorsque peu de satellites sont visibles, et qui affecte grandement la précision des positions.

Avec le lancement de deux nouveaux satellites en mars 2015, 7 satellites Galileo étaient visibles durant l'étude, assurant de cette façon des périodes de visibilité de 4 satellites plus longues et des erreurs géométriques réduites. Il s'agit de la première étude exhaustive effectuée sur base de mesures réelles sur les codes Galileo.

Description des résultats concrets (max. 500 mots)

Afin de valider l'hypothèse du mémoire, plusieurs configurations de récepteurs ont été testées. En ZB, les deux récepteurs sont reliés à une même antenne au moyen d'un appareil appelé splitter. Cette configuration permet l'élimination des erreurs liées à la traversée de l'atmosphère, les erreurs de multi-trajet ainsi qu'une partie du bruit de mesure. Combinant à cela une double différence (DD) des observations (différence des observations simultanées de deux satellites depuis deux récepteurs), les erreurs d'horloges des satellites et des récepteurs ainsi que les délais hardwares sont également éliminés. Il ne reste alors qu'un faible bruit d'observation lié au récepteur qui est utilisé pour caractériser le bruit de chacun des signaux analysés. Cette configuration, rarement exploitée en pratique, permet d'obtenir la précision sur les observations.

Ces observations, combinées sous forme de doubles différences, sont utilisées dans un algorithme de moindres carrés permettant ainsi d'estimer une position. La précision de celle-ci dépend de la géométrie des satellites (PDOP).

Dès lors, en distinguant ces deux types de précision en ZB, il apparaît que :

- La précision sur les observations atteinte par le signal Galileo E5a+b est inégalée par les autres signaux, toujours moins précis.

- Le PDOP élevé lié au nombre réduit de satellites Galileo visibles dégrade la précision sur la position obtenue avec ce système. On observe cependant, sur les meilleurs récepteurs, que Galileo E5 est le seul signal du système Galileo permettant d'obtenir une précision identique à celle des signaux GPS L1 et L2.

Quant aux autres configurations testées, on distingue une ligne de base courte (5,177 mètres) (short baseline (SB) en anglais) et deux lignes de base moyennes (23 kilomètres et 87 kilomètres) (medium baseline (MB) en anglais). Ces dernières configurations sont influencées par un plus grand nombre d'erreurs que la ZB, des erreurs augmentant proportionnellement avec la distance séparant les récepteurs (les erreurs atmosphériques ainsi que le bruit d'observation) mais aussi des erreurs cumulées, tel le multi-trajet. Les résultats obtenus sont donc moins précis mais plus réalistes car il est courant d'utiliser deux stations distantes de quelques kilomètres lors des calculs de positionnement.

En SB, les résultats de positionnement conduisent à une précision sur les positions de l'ordre de 60 centimètres avec le signal Galileo E5. En MB, il permet d'obtenir des valeurs de l'ordre de quelques décimètres mais uniquement lorsque la géométrie des satellites est favorable (bas PDOP).

On en conclut donc que Galileo E5, dans toutes les configurations testées, est supérieur aux autres signaux Galileo. Une analyse similaire réalisée avec un nombre de satellites GPS volontairement limité à 4 prouve que, dans des conditions de visibilité de satellites identiques, Galileo E5 est également supérieur aux signaux GPS. De plus, il permet d'obtenir une précision de l'ordre de quelques décimètres dans toutes les configurations testées lorsque la géométrie des satellites est favorable. Avec le nombre de satellites croissant prévu dans les années à venir, on s'attend donc à des précisions encore meilleures dans toutes les configurations.

Description de l'accessibilité et de la convivialité (max. 500 mots)

Dans le cadre de ce travail, un logiciel développé sur Matlab a servi de base aux calculs de positions. Non publié, il n'est pas accessible au grand public et seuls les résultats présentés dans ce mémoire peuvent être consultés.

Il s'agit d'une recherche basée sur le traitement de signaux issus de satellites, signaux traqués par des récepteurs appartenant à l'Université de Liège et dont les données brutes sont traitées par un programme propriétaire créé par le professeur R. Warnant, promoteur du mémoire.

Dès lors, seul le mémoire est accessible dans les bibliothèques de l'Université de Liège avec les résultats qu'il contient. Il est donc difficile de parler d'accessibilité dans le cadre de cette étude, le projet n'ayant pas pour but l'implémentation d'une interface ou d'un logiciel de calcul public.

Cependant, ce logiciel sera utilisé à des fins pédagogiques en vue d'illustrer la matière enseignée dans le cadre des différents cours de GNSS dispensés à l'Université de Liège.

Description détaillée (max. 4000 mots)

La mise sur orbite de nouveaux satellites et des technologies de pointe embarquées à leur bord conduit progressivement à un positionnement par satellite de plus en plus précis, accessible à des récepteurs de moins en moins onéreux.

Parmi les méthodes de positionnement existantes, l'utilisation des ondes porteuses des signaux émis par les satellites, aussi appelées phases, est de loin la plus précise (estimation d'une position avec une précision allant de quelques centimètres à quelques millimètres suivant

l'application). Cependant, ce type d'observable requiert un matériel et des programmes sophistiqués (et donc plus onéreux) pour être utilisé mais surtout, la résolution d'une ambiguïté initiale.

Les codes, portés par ces mêmes signaux, sont loin d'égaliser la précision des phases (on observe généralement plusieurs mètres d'écarts sur les positions estimées). L'idée même d'un positionnement de précision sur base des codes est un réel challenge pour les ingénieurs du signal. Leur caractère non-ambigu leur confère cependant une aisance d'utilisation sans équivalent et c'est ainsi qu'on les retrouve dans toutes les applications grand public (le GPS de voiture, les applications de localisation des smartphones et tablettes ou encore les voitures à guidage autonome). Dès lors, concevoir des mesures de codes permettant de réaliser des calculs de positions précis en temps réel est un objectif que cherchent à atteindre nombre de concepteurs de telles applications.

En plus des caractéristiques intrinsèques de ces deux types d'observables, la précision des observations collectées par les récepteurs au sol est également influencée par la traversée du signal dans l'atmosphère. Certaines couches de l'atmosphère retardent ou accélèrent le signal tout en l'atténuant, si bien que des erreurs sont introduites dans les calculs de positionnement, ces derniers dépendant principalement de la mesure du temps de propagation des signaux depuis le satellite jusqu'au récepteur. D'autres erreurs, liées à la réflexion du signal sur des objets réfléchissants, à la non synchronisation des horloges internes aux récepteurs et satellites et à ce qu'on appelle le bruit d'observation engendrent encore d'autres biais dans les mesures.

Ces considérations sur le signal ayant été décrites, intéressons-nous au positionnement en soi. Il est également nécessaire, pour parvenir à estimer une position en 3 dimensions, d'observer, depuis le récepteur, un minimum de 4 satellites. La géométrie des satellites observés est d'une grande influence sur la précision lors du calcul de position. Elle est caractérisée par un paramètre communément appelé PDOP. Généralement, avec GPS ou avec le système russe GLONASS, ce paramètre reste très petit, et donc peu influent, grâce au nombre élevé de satellites visibles. En effet, le risque d'observer une configuration peu favorable au niveau géométrique diminue fortement dans ces conditions. En revanche, ce paramètre est très influent pour les systèmes de navigation par satellites (Global Navigation Satellites Systems (GNSS) en anglais) constitués de peu de satellites.

Le système de navigation européen Galileo, sachant qu'il est de conception récente, est à la pointe de la technologie spatiale. Parmi les signaux transmis par ce GNSS, il s'en trouve un présentant des particularités très prometteuses. Le signal Galileo E5a+b, aussi connu sous les noms Galileo AltBOC et Galileo E5, propose des caractéristiques d'un grand intérêt, particulièrement dans le domaine du positionnement. En effet, il a été prouvé que ce signal montre une résistance peu commune au multi-trajet subi par le signal. Par ailleurs, il permet d'effectuer des mesures de codes plus précises en se montrant moins sensible au bruit de mesure. Ces deux types d'erreurs étant de celles qui dégradent de façon importante la précision des codes par rapport aux phases, ce nouveau signal semble posséder le potentiel pour combler le vide entre les codes peu précis et les phases très précises mais ambiguës. C'est du moins l'hypothèse qui a été testée lors de ce mémoire, où l'on a supposé qu'il serait possible d'atteindre une précision sur les positions estimées de l'ordre de quelques décimètres en mode relatif à l'aide de Galileo E5a+b.

À cette fin, un programme de calcul de positions a été développé sur le logiciel Matlab. Une combinaison, connue sous le nom de double différence, a été utilisée dans le cadre de cette étude. Cette méthode consiste à combiner les observations simultanées de deux satellites par deux récepteurs. Cette méthode, appliquée aux codes uniquement, dans le but de démontrer l'innovation apportée par Galileo E5 par rapport aux autres signaux Galileo (Galileo E1, Galileo E5a, Galileo E5b) et GPS (GPS L1, GPS L2 et GPS L5), permet d'éliminer nombre d'erreurs relatives aux récepteurs et satellites. Une résolution par moindres carrés des positions a ensuite

été menée, époque par époque d'observation, et des statistiques et graphiques ont été tirés de ces résultats.

Différentes configurations des récepteurs ont été également envisagées. Afin de se défaire des erreurs d'atmosphère et de multi-trajet, ne conservant ainsi que l'effet du de bruit de mesure, une configuration particulière des récepteurs a été adoptée. Non appliquée dans la pratique, cette configuration, en ligne de base nulle (zero baseline (ZB) en anglais), consiste à connecter sur une même antenne deux récepteurs au moyen d'un dispositif nommé splitter. Elle nous a notamment permis d'évaluer la précision des observations brutes.

Dans la pratique, lorsqu'on fait usage d'une double différence en positionnement par satellites, un utilisateur reçoit les mesures de codes depuis une station de référence située à une certaine distance mais observant des satellites identiques et de façon simultanée. C'est dès lors ce qui a été testé dans ce mémoire, afin de pouvoir valider nos résultats sur des cas concrets. Une ligne de base courte (short baseline (SB) en anglais) de 5.177 mètres (Sart-Tilman - Sart-Tilman) ainsi que deux lignes de base moyennes (medium baseline (MB) en anglais) de 23 kilomètres (Sart-Tilman - Waremme) et 87 kilomètres (Sart-Tilman - Bruxelles) ont été utilisées dans ce travail. Avec l'augmentation de la distance, les erreurs d'atmosphère ne cessent d'augmenter. Les erreurs de multi-trajet et de bruit d'observation, au lieu de se supprimer, se combinent. L'idée était donc d'estimer jusqu'à quelle distance maximale les doubles différences testées pourraient engendrer des résultats d'une précision de l'ordre de quelques décimètres.

L'Université de Liège dispose de plusieurs récepteurs GNSS installés sur le toit d'un bâtiment. Ce sont ces récepteurs qui ont été utilisés dans le cadre de ce travail ainsi qu'un récepteur de Waremme et un récepteur de Bruxelles (pour les MB). Les couples de récepteurs utilisés étaient issus des mêmes fabricant, à savoir deux récepteurs Trimble NetR9 (ZB, SB au Sart-Tilman), deux récepteurs Septentrio X4 (MB entre Sart-Tilman et Waremme et entre Sart-Tilman et Bruxelles), un Septentrio XS et un Septentrio X4 (ZB, SB au Sart-Tilman). Le choix de paires de récepteurs de même type évite d'avoir à estimer de nouvelles erreurs liées à des différences intrinsèques aux différents récepteurs.

Les coordonnées des antennes auxquelles étaient rattachés les récepteurs étant connues, le calcul de précision des positions a pu être obtenu en faisant la différence des coordonnées obtenues suite au calcul des moindres carrés et des coordonnées connues.

Les résultats obtenus sur la zero baseline mettent en évidence d'importantes différences entre les types de récepteurs.

Les récepteurs Trimble fournissent une précision des observations brutes avec GPS L1, L2 et L5 d'approximativement 15 centimètres. Avec les signaux Galileo, cette précision est meilleure que 10 centimètres. Le signal Galileo E5 présente même 8 centimètres de précision.

En ce qui concerne la précision obtenue sur la position calculée, les récepteurs Trimble permettent d'obtenir 40 centimètres de précision avec GPS L1 et L2 mais seulement 1.5 mètres avec GPS L5. GPS L5 étant un nouveau signal de GPS, il n'est transmis que par quelques satellites de la constellation GPS, ce qui lui confère des valeurs de PDOP beaucoup plus élevée que les deux autres signaux et dégrade ainsi la qualité de la précision sur la position obtenue. Dans ce même ordre d'idées, les précisions obtenues avec Galileo tournent également autour du mètre, et ce en raison de valeurs de PDOP très élevées.

En ce qui concerne la ZB avec les récepteurs Septentrio, la précision sur les observations est comprise entre 4 centimètres pour GPS L5 et 8 centimètres pour GPS L1. Pour Galileo,

Septentrio permet d'atteindre 1 centimètre de précision sur Galileo E5 jusqu'à 5 centimètres sur Galileo E1.

Quant à la précision sur les positions estimées avec les Septentrio, on obtient 20 centimètres avec Galileo E5 lorsque Galileo E1 n'atteint que 80 centimètres. Pour GPS, 20 centimètres de précision sont observés pour tous les signaux.

On peut donc conclure que la précision sur le signal E5a+b (précision des observations) est bien meilleure que sur les autres signaux étudiés.

Au sujet des SB au Sart-Tilman (5.177 mètres), des précisions sur les positions de l'ordre de 60 centimètres ont pu être atteintes à l'aide du signal Galileo E5. Sur les deux MB, un positionnement à 40 centimètres de précision a été atteint avec Waremme mais seulement 1.15 mètres avec Bruxelles en utilisant Galileo E5. Cette différence est due notamment à l'écart plus important entre les stations (23 kilomètres – 87 kilomètres) qui engendre des erreurs plus importantes (atmosphère, multi-trajet, bruit).

Finalement, une comparaison entre les résultats obtenus en observant les 4 satellites de Galileo visibles simultanément et une constellation GPS volontairement réduite à 4 satellites à des fins de comparaison mène à la conclusion que Galileo E5 est significativement plus précis que les autres signaux, GPS ou Galileo. Cette comparaison avec un nombre de satellite GPS restreint permet de comparer les constellations avec des valeurs de PDOP relativement proches. De cette façon, les précisions sur les positions seront affectées de manière similaire.

En conclusion, nous avons pu mettre en évidence le fait qu'une précision de l'ordre de plusieurs décimètres peut être atteinte à l'aide du signal Galileo E5 en positionnement relatif simple-fréquence. Ces valeurs s'observent jusqu'à 25 kilomètres dans tous les cas mais peuvent apparaître également jusqu'à 90 kilomètres lorsque la géométrie de la constellation est favorable. Il faut donc s'attendre à ce que ces valeurs se confirment et s'améliorent avec l'augmentation du nombre de satellites Galileo dans les années à venir. Cela tendra notamment à réduire l'influence de la géométrie sur l'estimation des positions.