

Galileo High Accuracy Service Performances initiales

■ Camille PARRA - Urs HUGENTOBLE - Thomas PANY - Stefan BAUMANN

Le Service de Haute Précision Galileo (HAS) propose des corrections gratuites pour travailler en mode PPP via le signal E6b. Actuellement, HAS vise à fournir une précision à 68 % meilleure que 15 cm en horizontal et 20 cm en vertical. La précision actuelle des corrections HAS actuelles a été évaluée pendant deux mois en la comparant à des produits précis du GRGS (Groupe de recherche de géodésie spatiale), puis un PPP a été exécuté. Avec les corrections HAS ajoutées aux messages de navigation, l'erreur d'orbite a diminué jusqu'à 72 % pour Galileo et 81 % pour GPS. L'erreur d'horloge était également plus faible avec HAS. Par exemple, pour Galileo, elle a été réduite de 57 %. Une fois la qualité des produits attestée, la précision des corrections HAS a été validée par un positionnement PPP. L'utilisation d'un réseau européen a montré des précisions horizontale et verticale à 68 % de 12,8 cm et 15,2 cm, conformes aux performances ciblées du HAS.

MOTS-CLÉS

Galileo, High Accuracy Service, Precise Point Positioning

Introduction

Depuis de nombreuses années, la popularité du PPP ne fait qu'augmenter. En effet, grâce aux estimations précises des orbites et horloges satellites sur lesquelles repose cette technique, le *Precise Point Positioning* (PPP) permet aujourd'hui un positionnement précis au centimètre, en temps réel ou différé. Cependant, nos besoins continuent d'évoluer et un positionnement précis au centimètre n'est pas nécessaire pour toutes les applications. C'est pourquoi, trois constellations GNSS (QZSS, BeiDou et Galileo) ont créé des services gratuits transmettant des corrections d'orbite et d'horloge, permettant de répondre à ces besoins décimétriques. Le premier service de ce type est venu de la constellation nipponne QZSS avec le *Centimeter Level Augmentation Services* (CLAS). Aujourd'hui encore, CLAS est le seul service offrant aussi des corrections atmosphériques. Quelques années après, BeiDou a aussi lancé son service, nommé PPP-B2P, fournissant des corrections PPP via le signal B2b de ses satellites. Mais ces deux constellations ne fournissent les corrections que localement.

En janvier 2023, Galileo lance son service Galileo *High Accuracy Service* (HAS). Ce service est le premier à offrir les corrections PPP aux utilisateurs du monde entier. Il vise une position avec une précision à 95 % meilleure que 20 cm en horizontal et que 40 cm en vertical.

Après un bref aperçu du service de Galileo HAS, une analyse de la disponibilité et de la précision des corrections de HAS est réalisée. Une fois la qualité des corrections établie, un positionnement en mode PPP est réalisé. Enfin, l'article se conclut par une discussion et propose des perspectives pour de futures études.

Qu'est-ce que Galileo HAS ?

Galileo HAS est constitué de deux niveaux de service. Le premier (SL1), actuellement partiellement déployé, transmet des corrections d'orbite et d'horloge pour les satellites des constellations GPS et Galileo, ainsi que les biais (erreurs systématiques) de code pour les signaux L1, L2 et L5 pour GPS et E1, E5a, E5b et E6 pour Galileo. Le deuxième niveau de service (SL2) est prévu pour 2024. Il aura une couverture uniquement européenne, mais transmettra aussi des

corrections atmosphériques.

À l'origine, Galileo HAS visait une précision à 95 % meilleure que 20 cm en horizontal et 40 cm en vertical, pour les deux niveaux de service. La différence entre ces deux derniers devrait se faire dans le temps de convergence. En effet, avec l'utilisation des corrections atmosphériques, il devrait être inférieur à 100 secondes, soit trois fois plus rapide que sans ces corrections. Cependant lors de l'ouverture officielle du service, l'EUSPA (*European Union Agency for the Space Program*) a relâché les performances ainsi que la zone de couverture de Galileo HAS. Dans le *Service Definition Document* (SDD) [1], les performances annoncées sont maintenant 15 cm en horizontal et 20 cm en vertical, mais pour une précision à 68 % et non plus à 95 % et dans le cas d'un utilisateur statique. De plus, la zone de disponibilité du service a aussi été réduite pour exclure le Pacifique. De plus, les biais de code ne sont pas encore disponibles pour GPS L5 et les biais de phase ne sont pas transmis.

Actuellement, le réseau terrestre de Galileo HAS est constitué de 14 Galileo Sensor Stations (GSS) qui acquièrent les données GNSS, puis les envoient en Espagne afin de calculer les corrections HAS. Parmi ces stations, cinq d'entre elles reçoivent les corrections calculées et les transmettent aux satellites Galileo. Ces cinq stations, réparties dans le monde entier, possèdent quatre antennes *up-link* (montantes) chacune, ce qui leur permet d'envoyer les corrections à un maximum de 20 satellites en simultané. Les satellites transmettent ensuite les corrections PPP via le signal E6b. La génération des corrections HAS est schématisée *figure 1*.

Une fois décodées, l'utilisateur n'a plus qu'à ajouter ces corrections aux messages de navigation et à ces

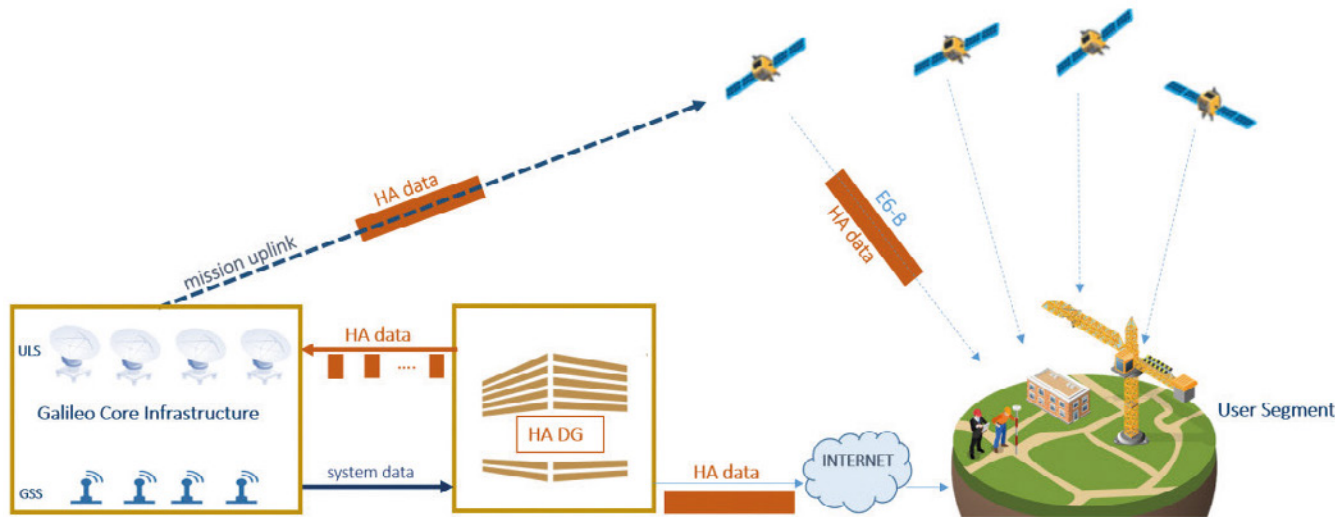


Figure 1. Génération des corrections de *Galileo High Accuracy Service* (HAS). Source : [2]

observations GNSS, moyennant un changement de coordonnées dans le repère *Earth-Centred Earth-Fixed* (ECEF) pour les corrections d'orbite qui sont transmises dans le système de coordonnées satellite NTW, avec ses composants radial (N), tangentiel (T), et normal (W) [3].

Analyse des corrections HAS

■ Disponibilité des corrections HAS

Cette section est dédiée à l'analyse de la disponibilité des corrections HAS. L'analyse est faite sur une période de deux mois, allant du DOY (jour de l'année) 091 au DOY 153 (d'avril à juin), de l'année 2023. Durant cette période, les messages HAS contiennent des corrections d'orbite et d'horloge, ainsi que les biais de code pour les fréquences L1 et L2 pour GPS, et E1, E5a, E5b et E6 pour Galileo. Au moment de l'étude, Galileo HAS était déjà officiellement en service,

cependant, les biais de phase n'étaient pas disponibles.

Lors de cette analyse, afin d'évaluer uniquement la disponibilité des corrections HAS, nous avons utilisé les fichiers de navigation combinés produits par l'International GNSS Service (IGS) [4].

Pour l'évaluation de la disponibilité des corrections d'orbite et d'horloge, nous avons vérifié toutes les 30 secondes si elles étaient présentes, cela pendant les deux mois étudiés. Certaines corrections avaient des valeurs aberrantes, selon l'*Interface Control Document* (ICD) [3], et ne sont donc pas prises en compte lors de l'évaluation. Les intervalles de valeurs considérées comme valides par l'ICD sont décrits dans le *tableau 1*.

Certains satellites sont aussi exclus pendant la totalité ou une partie de l'étude, car ils sont marqués comme

inutilisables par les gestionnaires de constellation. Ces exclusions sont résumées dans le *tableau 2*.

La disponibilité des trois types de corrections pour Galileo et GPS est présentée dans le *tableau 3*. Les pourcentages de disponibilité sont souvent communs entre les corrections d'orbite et d'horloge, mais les données d'horloge ont une disponibilité plus faible en raison de la plus petite période de validité (60 s pour les corrections d'horloge et 300 s pour les corrections d'orbite). De plus, les satellites GPS ont une disponibilité plus faible que les satellites Galileo. Cela peut être attribué, en partie, à certaines corrections inutilisables, hors intervalle de validité. Les biais de code sont les corrections avec les disponibilités les plus élevées. Ils sont presque constamment présents tout au long de la période d'analyse. Ils restent également relativement stables tout au long de la journée, aussi bien pour GPS que pour Galileo.

Pour l'ensemble de la période, la disponibilité moyenne est d'environ 96 % pour les corrections d'orbite et d'horloge de Galileo, 94 % pour les corrections d'orbite GPS et 91 % pour les corrections d'horloge GPS. De plus, à chaque instant, nous avons en moyenne environ 22 satellites Galileo disponibles et 27 satellites GPS, et nous

Corrections	Values interval [m]	Validity interval [s]
Orbit - radial	± 10.2375	300
Orbit - along-track	± 16.376	300
Orbit - cross-track	± 16.376	300
Delta clock	± 10.2375	60
Code bias	± 20.46	300

Tableau 1. Intervalle de validité des corrections d'éphéméride et d'horloge, et des biais de code de Galileo HAS.

Satellite	E01	E03	E09	E24	G02	G20	G27	G28	G29	G31
Unusable interval [DOY]	120-138	129-135	96-114	91	96-98	138-139	109	109-135	103-104	153-154

Tableau 2. Intervalle d'indisponibilité des satellites du DOY 091 au DOY 135 2023.



avons plus de 99,6 % du temps avec au moins 5 satellites Galileo et 5 satellites GPS disponibles.

En conclusion, bien que les satellites ne soient pas disponibles 99 % du temps, le service atteint cette disponibilité, même pour un positionnement avec une seule constellation.

Galileo mean availability [%]			GPS mean availability [%]		
Orbit	Clock	Code bias	Orbit	Clock	Code bias
97	96	100	94	91	100

Tableau 3. Disponibilité moyenne des corrections HAS.

■ Précision des corrections HAS

Dans cette section, qui se concentre sur la précision des corrections HAS, la même période est étudiée. Les fichiers de navigation combinés produits par l'IGS sont toujours utilisés. Pour l'évaluation de la précision, les éphémérides et les horloges précises fournies par le Groupe de recherche de géodésie spatiale (GRGS) sont prises en référence. Ces produits sont considérés comme l'une des options les plus précises et fiables actuellement disponibles.

De même que pour l'étude de la disponibilité, les corrections HAS et les satellites marqués comme inutilisables sont exclus.

Le tableau 4 donne un aperçu de la précision totale des produits sur l'ensemble des deux mois, à la fois avec et sans corrections HAS. En ce qui concerne les données d'éphéméride, comme prévu en raison de la fréquence de mise à jour, les améliorations sont plus marquées pour le GPS. Pour Galileo, la fréquence de mise à jour étant déjà élevée, les éphémérides brutes sont déjà de très bonne qualité. Les erreurs d'orbite GPS montrent des réductions d'environ 86 % pour chaque

Constellation	Radial [cm]	Along-track [cm]	Cross-track [cm]	Clock [cm]
GAL	3.5 (12.3)	9.5 (24.7)	10.3 (19.2)	11.5 (14.8)
GPS	4.8 (41.7)	11.7 (81.7)	10.3 (75.9)	23.2 (35.7)

Tableau 4. RMS des erreurs pour les composants orbitaux radial, along-track et cross-track, et l'erreur d'horloge pour les messages de navigation, GPS et Galileo, corrigés avec HAS. Toutes les valeurs sont en cm. Les valeurs entre parenthèses sont les valeurs non corrigées des messages de navigation.

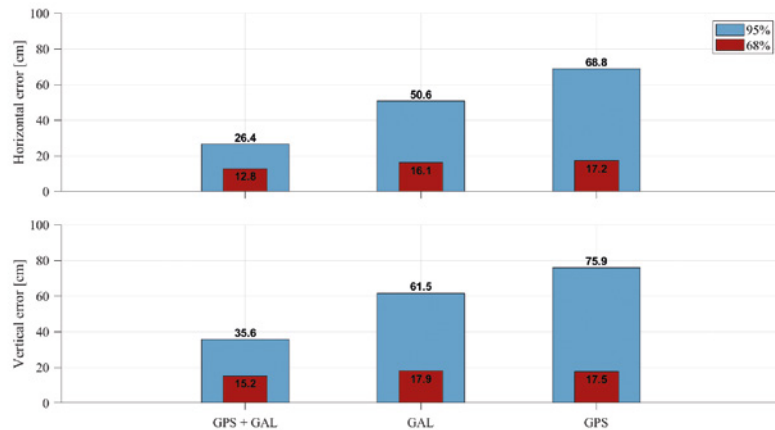


Figure 2. Performance du PPP.

composant. Bien que les améliorations pour Galileo soient relativement plus faibles, elles présentent tout de même une amélioration de 46 % à 72 % pour la composante radiale.

En ce qui concerne les erreurs d'horloge, on observe une amélioration avec l'utilisation de HAS, de 47 % pour le GPS et de 57 % pour Galileo. Les biais de code HAS sont comparés aux *Differential Code Bias* (DCB) de la *Chinese Academy of Sciences* (CAS) sur l'ensemble de la période. Les biais de code HAS sont transmis sous forme d'*Observation-Specific code Biases* (OSB), ils ont donc été différenciés pour obtenir les valeurs de DCB pour les combinaisons suivantes : Galileo C1C-C5Q, C1C-C7Q et C1C-C6C ; GPS C1C-C2L. Une valeur moyenne de -1,74 ns a été soustraite des différences de biais GPS. Pendant le positionnement de l'utilisateur, cette valeur moyenne de la constellation est absorbée par l'estimation de l'horloge récepteur, et par conséquent, elle n'a pas d'impact sur le résultat final du positionnement.

Les biais de code montrent une excellente stabilité au long de ces deux mois, avec des écarts compris entre -0,5 ns et +0,5 ns, sauf pour quelques valeurs aberrantes. Les valeurs RMS des quatre couples sont toutes infé-

rieures à 0,2 ns, avec C1C-C5Q à 0,19 ns, C1C-C7Q à 0,18 ns, C1C-C6C à 0,14 ns et C1C-C2L à 0,16 ns.

Performances PPP

Pour le calcul PPP, les messages de navigation combinés de l'IGS, corrigés avec les données HAS, sont toujours utilisés. Le PPP est exécuté en mode cinématique, en biconstellation, avec un échantillonnage à 30 secondes. Les observations sont traitées en mode double fréquence (L1/L2 pour GPS et E1/E5a pour Galileo), avec des mesures non combinées. Le retard troposphérique est estimé comme un retard zénithal et un gradient horizontal. Le calcul est effectué sur un réseau européen pendant les mois d'avril et mai 2023. Ce réseau est composé de 17 stations IGS, étant capables de recevoir les observations GPS et Galileo. Un calcul PPP de trois heures est effectué pendant 61 jours, soit huit sessions consécutives par jour et 488 sessions au total par station.

La figure 2 résume la précision du PPP à 68 % et 95 %. Comme le traitement HAS peut être long à converger, les précisions ne sont mesurées que pour la dernière heure des sessions. La précision à 68 % (respectivement à 95 %) est calculée en tant que quantile à 68 % (respectivement à 95 %) de l'erreur horizontale et verticale pour l'ensemble des sessions de chaque station. La figure 2 montre la moyenne de cette précision à 68 % (respectivement 95 %) sur l'ensemble des stations. Avec une précision de 68 % de 12,8 cm en horizontal et 15,2 cm en vertical,



en bi-constellation, le traitement HAS atteint les objectifs de la SDD en termes de précision. Cependant, la précision à 95 % du PPP HAS est de 26,4 cm et 35,6 cm respectivement en horizontal et vertical, ce qui montre qu'HAS n'est pas encore capable d'atteindre les premières précisions attendues.

En mono-constellation, les résultats sont dégradés. Mais à 68 %, la précision verticale définie par le SDD est bien atteinte, et la précision horizontale s'en approche. Cependant, comme l'indique la précision à 95 %, il y a bien plus de mauvaises séries avec un traitement en monoconstellation. Toutefois, comme la précision des produits le laissait supposer, les résultats sont meilleurs en utilisant uniquement Galileo plutôt que GPS.

Conclusion

Avec son nouveau service HAS, Galileo propose un service gratuit et mondial de PPP via le signal E6b. Il a été montré qu'au moins cinq satellites Galileo et cinq satellites GPS étaient disponibles pendant 99,6 % du temps. La comparaison des éphémérides et des horloges de navigation corrigées par rapport aux produits finaux du GRGS démontre de bonnes performances. Par exemple, les erreurs d'orbite diminuent de 40 % à 81 % selon le composant ou la constellation.

Un positionnement PPP a été réalisé en utilisant un réseau européen. Les résultats sont cohérents avec les précisions attendues, en effet, la solution Galileo et GPS atteint une précision à 68 % de 12,8 cm en horizontal et de 15,2 cm en vertical. Cependant, les précisions à 95 % attendues lors de la première annonce du service ne sont pas encore atteintes.

Des travaux futurs consisteront à acquérir de nouvelles données dès que les biais de phase seront diffusés, permettant une résolution d'ambiguïté et, possiblement, l'achèvement des précisions initiales. De plus, dans la mesure où Galileo HAS vise les utilisateurs mobiles, un test en condition réelle sera réalisé dans des conditions cinématiques.

Remerciements

Cette étude a été menée dans le cadre d'un PhD supervisé par la *Technische Universität München* et l'*Universität der Bundeswehr München*, et sponsorisé par *Industrieanlagen-Betriebsgesellschaft mbh* (IABG). ●

Références

- [1] EUSPA, "European GNSS agency Galileo High Accuracy Service Service Definition Document (HAS SDD)", European Union, Tech. Rep., 2023.
- [2] EUSPA. (2022) *Galileo High Accuracy Service (HAS)*. [Online]. Available: <https://www.gsc-europa.eu/galileo/services/galileo-high-accuracy-service-has>
- [3] EUSPA, "Galileo High Accuracy Service Signal-in-Space Interface Control Document", European Union, Tech. Rep., 2022.
- [4] IGS. (2022) *Real-time service (RTS)*. [Online]. Available: <https://igs.org/rts/>

Contacts

Camille PARRA PhD student à la Technische Universität München.
camille.parra@tum.de
Urs HUGENTOBLER
Thomas PANY
Stefan BAUMANN

ABSTRACT

The Galileo High Accuracy Service (HAS) offers free corrections for PPP via the E6b signal. Currently, HAS aims to provide horizontal and vertical accuracy of 68% within 15 cm and 20 cm. The current accuracy of HAS corrections has been evaluated for 2 months by comparing them to precise products from GRGS, and then a PPP was executed. With HAS corrections added to navigation messages, the orbit error decreased by up to 72% for Galileo and 81% for GPS. Clock error was also lower with HAS. For example, for Galileo, it was reduced by 57%. Once the quality of the products was confirmed, the accuracy of HAS corrections was validated through PPP positioning. The use of a European network showed horizontal and vertical accuracies at 68% of 12.8 cm and 15.2 cm, aligning with the targeted performance of HAS.

COMITÉ DE LECTURE D'XYZ

BOSSER Pierre, professeur associé, ENSTA Bretagne, Brest

BOTTON Serge, ingénieur, ENSG, Marne-la-Vallée

CLÉDAT Emmanuel, enseignant-chercheur, ENSG, Marne-la-Vallée

DURAND Stéphane, maître de conférences, ESGT, Le Mans

HULLO Jean-François, dr. ingénieur, EDF, Paris

KOEHL Mathieu, maître de conférences, INSA Strasbourg

LEQUEUX James, astronome émérite à l'Observatoire de Paris

MAINAUD DURAND Hélène, ingénieur topographe, CERN Genève

MISSIAEN Dominique, ingénieur topographe, CERN Genève

MOPIN Irène, ingénieur recherche, ENSTA Bretagne, Brest

MOREL Laurent, professeur des universités, ESGT, Le Mans

PANTAZIS N. Dimos, professeur, TEI Athènes

POLIDORI Laurent, directeur du CESBIO, Toulouse

REIS Olivier, ingénieur, traducteur, Sarreguemines

ROCHE Stéphane, professeur, Université Laval, Québec

TOUZÉ Thomas, dr. ingénieur géomètre, EDF, Grenoble

TROUILLET Michel, ingénieur topographe, Lyon

Font partie du comité de lecture les membres du comité de rédaction et la rédaction (la directrice des publications et son adjoint, le rédacteur en chef et son adjoint), voir la liste en page sommaire.