

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



THESE

Présentée pour l'obtention du **grade de DOCTEUR EN SCIENCES**

En : Télécommunications

Spécialité : Télécommunications

Par : TABTI Lahouaria

Sujet

Traitement des signaux GNSS Hybrides GPS et EGNOS avec des récepteurs mono-fréquence pour la localisation précise

Soutenue publiquement, le 14 /10 /2020, devant le jury composé de :

M. BORSALI Ahmed Riadh	Professeur	Univ. Tlemcen	Président
M. BENADDA Belkacem	Professeur	Univ. Tlemcen	Directeur de thèse
M. KAHLOUCHE Salem	Directeur de recherche	CTS/ASAL	Co- Directeur de thèse
M. GOURINE Bachir	MRA	CTS/ASAL	Examineur
M. IRID Mohamed Hadj	MCA	Univ. Tlemcen	Examineur

RESUME

Les systèmes GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) permettent de donner une position tridimensionnelle grâce à des constellations de satellites. Bien qu'ils soient utilisés pour plusieurs applications (terrestre, maritime, aviation), il reste des applications, notamment pour l'aviation civile, dans lesquelles les récepteurs GNSS ont des difficultés pour délivrer une solution de position en temps réel répondant aux critères de précision, d'intégrité et de disponibilité recherchés. C'est pourquoi des systèmes d'augmentation ont été développés afin d'améliorer les performances du positionnement par satellite. L'utilisation croissante de ces systèmes, dont le GPS est le premier système opérationnel, porte notamment sur l'amélioration de précision en temps réel.

EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay Service*), est un système d'augmentation développé par les Européens, il offre aux utilisateurs un service de navigation et de positionnement très performant, que ce qui est actuellement disponible par le GPS. Il permettra d'améliorer la précision du positionnement en corrigeant plusieurs sources d'erreurs affectant le système GPS et de fournir aux utilisateurs des informations sur l'intégrité des signaux GPS en temps réel. L'amélioration de la précision GPS par EGNOS repose essentiellement sur l'usage des différentes corrections, qui méritent d'être étudiés, testés et comparés.

Les travaux de cette thèse ont porté sur l'amélioration de la précision du GPS mono-fréquence à l'aide des corrections EGNOS, sans l'existence d'aucune station RIMS (Ranging and Integrity Monitoring Stations) en Algérie d'une part et d'autre part sur le choix optimal de sites pour la mise en place de stations RIMS d'EGNOS en Algérie.

La précision du positionnement sur quatre sites en Algérie, à savoir Oran, Alger, Bejaia et Ouargla (Bir Sbaa); a été analysée en terme des erreurs de position horizontale et verticale; la précision a été obtenue par comparaison avec les coordonnées exactes de chaque site. Par la suite, les corrections ionosphériques obtenues avec le système EGNOS ont été également comparées avec le modèle Klobuchar transmis dans le message GPS.

Les résultats ont révélé que la précision du GPS + EGNOS était nettement meilleure que celles du GPS uniquement, ceci est dû principalement aux corrections transmises par EGNOS, en particulier les corrections ionosphériques. La comparaison des résultats obtenus a permis de confirmer la fiabilité des corrections transmises par EGNOS.

Dans la deuxième partie de cette thèse, l'étude est menée sur la faisabilité de mise en place de deux stations RIMS d'EGNOS et le choix optimal d'une deuxième station au sud de l'Algérie, en considérant une station à Oran. Les résultats, montrent que les performances du système EGNOS en terme de disponibilité et de grille ionosphérique, deviennent meilleurs, en particulier dans la zone comprise entre $[0^\circ, 5^\circ]$ en longitude et de 25° en latitude. Ces résultats préliminaires, utiles particulièrement pour les applications de l'aviation civile, peuvent être étendus avec la disponibilité d'une couverture plus complète sur l'Algérie avec la mise en place de deux stations RIMS à Oran et à Adrar.

Mots clés : GPS, EGNOS, Précision, Station RIMS, Correction ionosphérique.

ABSTRACT

GNSS (Global Navigation Satellite Systems) systems permit to provide position information in three dimensions via constellations of satellites. While they are used for several applications (terrestrial, maritime, aviation), there are some applications, particularly in civil aviation, in which GNSS receivers have problems to deliver a real-time position solution that meets the required accuracy, integrity and availability criteria. For this reason, augmentation systems were developed in order to improve the performance of positioning using GNSS. The use of these systems, which GPS is the first operational system, becoming more and more used to improve real-time accuracy.

EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service), is an augmentation system developed by the Europeans, it offers to users a high performance navigation and positioning service, better than the currently available by GPS. It will improve position accuracy by correcting several sources of errors affecting GPS system and will provide users information on the integrity of GPS signals in real time. The improvement of GPS accuracy by EGNOS essentially based on the use of the various corrections, which merit to be studied, tested and compared.

The work of this thesis focused on accuracy improvement of GPS single-frequency by using EGNOS corrections, in the absence of RIMS (Ranging and Integrity Monitoring Stations) stations in Algeria, on the other hand on the optimal choice of sites for the setting up of EGNOS RIMS stations in Algeria.

The accuracy of positioning at four sites in Algeria, namely Oran, Algiers, Bejaia and Ouargla (Bir Sbaa), is analysed in terms of horizontal and vertical position errors; the accuracy is obtained by comparison with the exact coordinates of each site. The ionospheric corrections provided by the EGNOS system were also compared with the Klobuchar model transmitted in the GPS messages.

The results revealed that the accuracy of GPS + EGNOS is significantly better than GPS alone. This is mainly due to corrections provided by EGNOS, in particular the ionospheric corrections. The comparison of the results obtained by processing the data from each site without and with EGNOS corrections confirmed the reliability of the corrections transmitted by EGNOS.

In the second part of this thesis, the study is carried out on the feasibility of setting up of two EGNOS RIMS stations and the optimal choice of a second station in the south of Algeria, considering a station in Oran. The results show that the performances of EGNOS system in terms of availability and ionospheric grid are improved, in particular in the area between 0° and 5° in longitude and 25° in latitude. These preliminary results, which are particularly useful for civil aviation applications, can be extended with the availability of more complete coverage in Algeria, with the installation of two RIMS stations in Oran and Adrar.

Keywords: GPS, EGNOS, Accuracy, RIMS station, Ionospheric correction

تسمح أنظمة الملاحة العالمية عبر الأقمار الصناعية (GNSS) بتوفير معلومات الموقع في ثلاثة أبعاد عبر مجموعات من الأقمار الصناعية. بينما يتم استخدامها في العديد من التطبيقات (الأرضية ، والبحرية ، والجوية) ، هناك بعض التطبيقات لا سيما في مجال الطيران المدني، تواجه فيها مستقبلات GNSS مشاكل لتقديم إحدائيات الموقع في الوقت الحقيقي الذي يفى بمعايير الدقة والسلامة والتوافر المطلوبة. لهذا السبب، تم تطوير أنظمة التعزيز من أجل تحسين أداء تحديد المواقع باستخدام أنظمة الملاحة العالمية عبر الأقمار الصناعية. أصبح استخدام هذه الأنظمة مع النظام العالمي لتحديد المواقع GPS الذي يعتبر أول نظام تم تشغيله في هذه الفئة، أكثر وأكثر استخداماً لتحسين الدقة في الوقت الفعلي

نظام التعزيز عبر الأقمار الصناعية (EGNOS) ، هو نظام التحسين الذي طوره الأوروبيون، وهو يوفر للمستخدمين خدمة عالية الأداء للملاحة وتحديد المواقع، والتي تتسم بالكفاءة وفقاً لمطوره، وستحسن دقة تحديد المواقع عن طريق تصحيح العديد من مصادر الأخطاء التي تؤثر على النظام العالمي لتحديد المواقع وتوفير سلامة المعلومات من الإشارات التي ترسلها الأقمار الصناعية في الوقت الحقيقي. يعتمد تحسين الدقة بواسطة EGNOS على استخدام التصحيحات المختلفة التي يجب دراستها واختبارها ومقارنتها.

ركز العمل المقدم في هذه الأطروحة على دقة تحسين كفاءة GPS أحادي التردد باستخدام تصحيحات EGNOS ، دون وجود محطة مراقبة فعالية النظام (RIMS) في الجزائر ، من ناحية أخرى، يتم تحليل النتائج للاختيار الأمثل لمواقع محتملة لمحطات EGNOS RIMS في الجزائر. دقة تحديد المواقع في أربعة أماكن في الجزائر ، وهي: وهران، الجزائر العاصمة، بجاية و ورقلة (بئر السبع) ، تمت دراستها من حيث أخطاء الموقع الأفقية والرأسية ؛ يتم الحصول على دقة النظام بالمقارنة مع الإحدائيات الدقيقة لكل موقع. كما تم مقارنة التصحيحات الأيونوسفيرية التي يوفرها نظام EGNOS أيضاً بنموذج Klobuchar الذي يتم إرساله في رسالة GPS أحادي التردد.

كشفت النتائج أن دقة GPS+EGNO أفضل بكثير من GPS لوحده. ويرجع ذلك أساساً إلى التصحيحات التي يوفرها EGNOS ، ولا سيما التصحيحات الأيونوسفيرية. أظهرت النتائج أيضاً أن تصحيحات EGNOS حسّنت الإحدائيات الشرقية و الشمالية، وكذلك العمودية إلى حد كبير. أكدت المقارنة بين النتائج التي تم الحصول عليها عن طريق معالجة البيانات من كل موقع موثوقية التصحيحات المرسله من قبل EGNOS .

في الجزء الثاني من هذه الأطروحة ، تركزت الدراسة على جدوى إنشاء محطتي EGNOS RIMS والاختيار الأمثل لموقع المحطة الثانية في جنوب الجزائر ، من خلال تثبيت المحطة الأولى في وهران. أظهرت النتائج أن أداء نظام EGNOS من حيث التوافر وخطأ الشبكة الأيونوسفيرية قد تحسن ، خاصة في المنطقة التي تتراوح بين [0° ، 5°] في خط الطول و 25° في خط العرض. يمكن توسيع نطاق هذه النتائج الأولية، التي تعود بالنفع على الطيران المدني، مع توفر تغطية أكثر اكتمالا على الجزائر من خلال تركيب محطتي RIMS في وهران وأدرار.

الكلمات المفتاحية : GPS ، EGNOS، الدقة ، محطة RIMS ، التصحيح الأيونوسفيري

REMERCIEMENTS

En tout premier lieu, je remercie Dieu tout puissant, de m'avoir donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail, ainsi que la volonté pour dépasser toutes les difficultés.

Je tiens particulièrement à exprimer ma gratitude à mes directeurs de thèse, **M.BENADDA Belkacem**, Professeur à l'Université *Aboubekr Belkaid* de Tlemcen et **M. KAHLOUCHE Salem**, Directeur de recherche au Centre des Techniques Spatiales (CTS /ASAL) d'avoir accepté d'encadrer cette thèse et qui m'ont consacré de leur temps pour me guider et me conseiller.

Je tiens à leur exprimer toute ma reconnaissance de s'être beaucoup investi dans cette thèse et d'avoir toujours été présents pour répondre à mes questions tout au long de mon travail, et pour m'avoir incité et aidé à approfondir la partie modélisation et traitement des données GPS avec EGNOS. Grâce à eux et à leur grandes qualités humaines et techniques, j'ai eu la chance de pouvoir me réaliser et m'épanouir professionnellement.

Je tiens aussi à remercier, **M.BORSALI Ahmed Riadh**, Professeur à l'université de Tlemcen, avoir accepté de présider le jury de ma thèse, mes remerciements vont aussi aux examinateurs **M. IRID Mohamed Hadj**, Maitre de conférence de classe A à l'université de Tlemcen, et **M. GOURINE Bachir**, Maitre de recherche de classe A au Centre des Techniques Spatiales (CTS/ASAL) d'avoir accepté d'être membres de ce jury.

Je remercie tout particulièrement **M.DEIMOS Ibáñez** de l'équipe Glab de l'Université de Catalogne (Espagne) pour sa précieuse aide et ses clarifications et pour avoir pris le temps de répondre à toutes mes questions techniques quand j'en ai eu besoin.

Je remercie également **M. TAIBI Habib**, chef de service "positionnement et localisation par satellites" pour son soutien et pour les discussions enrichissantes qu'on a eues.

Je tiens à exprimer ma gratitude à tous mes amis qui m'ont soutenue jusqu'au bout: **M.BELDJILALI Bilal** et **Mme BOUHOUCHE Nadia** pour leur précieuse aide et pour avoir toujours essayé de me remotiver quand il le fallait tout au long de l'élaboration de ce travail, je n'oublierais pas **Mme ZEKKOUR Nesrine** et **Melle NAMAOUI Houaria** pour leur soutien.

Je remercie tous les enseignants qui ont contribué à ma formation, en particulier **MM. ZEGGAÏ Ali et GHEZALI Boualem.**

J'adresse mes sincères remerciements, et ma profonde reconnaissance à mes collègues du département de Géodésie Spatiale du CTS.

Je n'oublierais pas de remercier particulièrement **M.MAHI Habib**, Directeur du Centre des Techniques Spatiales, pour m'avoir permis de préparer cette thèse dans les meilleures conditions au CTS, sans omettre de remercier pour sa précieuse aide **M. BENHAMOUDA Fethi**, Directeur d'Etudes à l'Agence Spatiale Algérienne, chargé du suivi du projet EGNOS en Algérie.

Je tiens aussi à exprimer ma reconnaissance à la faculté de Technologie de l'Université *Aboubekr Belkaid* de Tlemcen pour m'avoir donné la possibilité de réaliser cette thèse de doctorat.

Enfin, je remercie ma famille et mes proches pour l'aide qu'ils m'ont fournie et pour leur compréhension; et je dédie cette thèse à la mémoire de ma grand-mère maternelle Allah yarhamha, c'est grâce à elle que je suis arrivée à ce stade. Que dieu la bénisse et son âme dans sa sainte miséricorde.

TABLES DES MATIERES

Résumé	i
Abstract	ii
Résumé arabe	iii
Remerciements	iv
Table des Matières	vi
Table des Illustrations	x
Liste des Tableaux	xiii
Liste des Abréviations	xv
INTRODUCTION GENERALE	1
Chapitre I. Contexte théorique : principes fondamentaux des systèmes GNSS.....	5
I.1.Introduction	6
I.2.Systèmes GNSS.....	6
I.2.1.GPS.....	8
I.2.2.GLONASS.....	10
I.2.3.GALILEO.....	10
I.2.4.Beidou.....	11
I.3.Modes de positionnement.....	12
I.3.1.Positionnement en mode absolu	12
I.3.2.Positionnement en mode différentiel.....	13
I.4.Systèmes de référence.....	14
I.5.Equation d'observation du positionnement standard par GPS(SPP)	15
I.6 .Erreurs affectant les mesures des pseudo-distances.....	18
I.6.1.Les erreurs d'éphémérides et horloge des satellites.....	18
I.6.2.Le récepteur.....	18
I.6.3.Les multi trajets.....	19
I.6.4.L'ionosphère.....	19
I.6.5. La troposphère.....	21
I.6.6.Le biais différentiel de code(DCB).....	22
I.6.7.La géométrie des satellites (GDOP).....	24
I.7.Performances et limitations des GNSS.....	25
I.8.Navigation par satellite pour l'aviation civile.....	25

I.9.Conclusion.....	28
Chapitre II. Systèmes d’augmentations spatiales & présentation du système EGNOS.....	29
II.1.Introduction	30
II.2.Systèmes d’augmentations terrestres.....	30
II.2.1.Les systèmes de renforcement GNSS par station sol (GBAS)	30
II.2.2.Les systèmes embarqués de renforcement GNSS (ABAS)	31
II.3.Systèmes d’augmentations spatiales (SBAS)	31
II.3.1.Le système d’augmentation Américain (WAAS).....	34
II.3.2.Le système Russe (SDCM).....	35
II.3.3.Le système Japonais (MSAS).....	35
II.3.4. Le système Indien (GAGAN).....	35
II.3.5.Le système Européen(EGNOS).....	35
II.3.5.1.Description du système EGNOS.....	36
II.3.5.2.Services proposés par EGNOS.....	38
II.3.5.2.1.Service ouvert.....	38
II.3.5.2.2. Service de sécurité de la vie	39
II.3.5.2.3.Service de distribution de données commerciales	39
II.4.Présentation des signaux SBAS.....	40
II.4.1.SBAS L1.....	40
II.4.2.SBAS L5.....	41
II.5.Messages transmis par SBAS.....	42
II.5.1.Transmission de données (IOD).....	43
II.5.2.Périodes de rafraîchissement et de validité.....	44
II.5.3.Masque PRN	45
II.5.4.Masque IGP.....	46
II.6.Conclusion	49
Chapitre III. Application des corrections EGNOS & Intégrité.....	50
III.1.Introduction	51
III.2.Application des corrections EGNOS.....	51
III.2.1.Application des corrections rapides.....	52
III.2.2.Application des corrections lentes.....	53

III.2.2.1. Correction d'horloge.....	53
III.2.2.2. Corrections d'éphémérides.....	54
III.2.3. Application des corrections ionosphériques.....	55
III.2.3.1. Calcul de latitude et de longitude pour chaque IPP (\varnothing et λ)...	55
III.2.3.2. Sélection des IGP utilisés dans l'interpolation.....	57
III.2.3.3. Calcul des délais ionosphériques verticaux aux IPP.....	57
III.2.3.4. Calcul des délais ionosphériques.....	58
III.2.4. Application des corrections troposphériques.....	58
III.3. Estimation de variance.....	61
III.3.1. Variance des corrections rapides et lentes.....	61
III.3.2. Variance liée à la correction ionosphérique.....	62
III.3.3. Variance liée à la correction troposphérique.....	64
III.3.4. Variance des erreurs du récepteur.....	64
III.4. Niveau de protection.....	65
III.5. Intégrité	67
III.6. Conclusion	68
Chapitre IV. Analyse des résultats : Amélioration de la précision par utilisation des corrections EGNOS.....	70
IV.1. Introduction	71
IV.1.1. Présentation du logiciel gLAB 5.4.4.....	71
IV.1.2. Fichiers utilisés dans le traitement.....	72
IV.2. Traitement et analyse des résultats en positionnement absolu temps réel.....	72
IV.2.1. Analyse des performances EGNOS pour un récepteur géodésique.....	73
IV.2.2. Analyse des performances EGNOS pour un récepteur mono-fréquence.....	74
IV.3. Amélioration de la qualité du positionnement absolu temps différé.....	75
IV.3.1. Description des données GPS utilisées.....	75
IV.3.2. Traitement et analyse des résultats en composante horizontale et verticale.....	77
IV.3.3. Traitement et analyse des résultats en 3 D(X, Y, Z)	81
IV.4. Modélisation des corrections transmises par EGNOS.....	82
IV.4.1. Impact des Corrections rapides sur la précision de positionnement.....	83
IV.4.2. Impact des corrections lentes sur la précision de positionnement.....	86
IV.4.3. Impact des corrections ionosphériques sur la précision de positionnement.....	87

IV.4.4.Impact de biais de code différentiel (DCB) sur le GPS+EGNOS.....	90
IV.5.Performance temporelle du site 305 à Oran.....	91
IV.6.Conclusion.....	92
Chapitre V. Etude de faisabilité & choix optimal de stations RIMS d'EGNOS en Algérie.....	93
V.1.Introduction	94
V.2.Réseaux de stations RIMS.....	94
V.2.1.Types et fonctions des stations RIMS.....	96
V.2.2.Conditions d'installation d'une station RIMS.....	97
V.3.Choix optimal d'une station RIMS en Algérie.....	98
V.3.1.Site à Tamanrasset.....	98
V.3.2.Site au centre de l'Algérie.....	99
V.3.3.Site à Oran.....	100
V.4.Simulations et résultats pour la mise en place de deux stations RIMS en Algérie.	101
V.4.1.Paramètres utilisés.....	102
V.4.2.Sites choisis.....	103
V.4.3.Disponibilité du système.....	104
V.4.4.Erreur sur la précision verticale de la grille ionosphérique.....	106
V.5.Analyse des performances du système EGNOS à partir des données réelles collectées sur les deux sites Oran et Adrar.....	109
V.5.1.Analyse de la précision pour les deux sites Oran et Adrar.....	109
V.5.2.Analyse de l'intégrité pour les deux sites Oran et Adrar.....	110
V.6.Conclusion.....	113
CONCLUSION GENERALE.....	114
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	117
ANNEXES.....	127
Annexe 1 : Exemple d'un fichier SBAS "output"	128
Annexe 2 : Format du fichier RINEX.....	130
Annexe 3 : Format de fichier de corrections EGNOS RINEX-b.....	133
Annexe 4 : Publications.....	133

TABLE DES ILLUSTRATIONS

FIG. I.1. Infrastructure du système GNSS.....	6
FIG.I.2. Satellites GPS.....	8
FIG.I.3. Localisation des différentes stations de contrôle GPS.....	9
FIG.I.4. Positionnement absolu.....	12
FIG.I.5. Principe du positionnement différentiel.....	13
FIG.I.6. Coordonnées géocentriques et topocentriques.....	15
FIG.I.7. Mesure de code sur un signal GNSS.....	16
FIG.I.8. Erreur de position en appliquant uniquement le pseudo range.....	17
FIG.I.9. Principales sources d'erreur impactant la précision du positionnement GNSS.....	18
FIG.I.10. Erreurs horizontale et verticale du site d'Alger avec et sans corriger le DCB le 9 avril 2018.....	23
FIG.I.11. Valeurs des dilutions de précision (DOP) calculées pour le site d'Alger le 9 Avril 2018 (DoY 099).....	24
FIG.I.12. Différentes phases de vol.....	26
FIG.II.1. Architecture du GBAS.....	31
FIG.II.2. Architecture générale simplifiée d'un système SBAS.....	32
FIG.II.3. Couverture des systèmes SBAS.....	33
FIG.II.4. Architecture et fonctionnement du système WAAS.....	34
FIG.II.5. Architecture et fonctionnement du système EGNOS.....	36
FIG.II.6. Statut des satellites EGNOS (2 Janvier 2019).....	37
FIG.II.7. Couverture des satellites géostationnaires d'EGNOS, PRN 136(Orange) et PRN 123 (Rouge).....	38
FIG.II.8. Disponibilité du service ouvert (HNSE < 3 m et VNSE < 4 m).....	39
FIG.II.9. Distributions du groupe RIMS pour le service commercial.....	40
FIG.II.10. Codeur convolutionnel pour SBAS L1.....	41
FIG.II.11. Structure des Messages.....	41
FIG.II.12. Message type 2 donné par le satellite GOE 123 du système EGNOS, le 09 avril 2018.....	41
FIG.II.13. Messages et relations entre les types de messages du système EGNOS.....	43
FIG.II.14. Relations des IOD des messages SBAS.....	44
FIG.II.15. Distribution des messages transmis par le satellite GEO 123, le 9 avril 2018.....	45
FIG.II.16. Masque PRN transmis par EGNOS le 9 Avril 2018.....	46

FIG.II.17. Grille globales des IGP	47
FIG.II.18. Masque de la grille ionosphérique.....	47
FIG.II.19. Format de message MT18 (masque IGP).....	48
FIG.II.20. Masque de la grille ionosphérique transmis par EGNOS le 9 Avril 2018 ; tous les points représentent les IGP dans le masque et les points marron représentent les IGP non surveillé par EGNOS.....	48
FIG.III.1. Messages nécessaires pour corriger un satellite GPS (entre 6 et 12 messages sont nécessaires pour former une correction complète).....	52
FIG.III.2. Format des messages MT 2 à 5 (Corrections rapides).....	52
FIG.III.3. Format de message MT25 (Corrections lentes).....	54
FIG. III.4. Format de message MT26 (corrections ionosphériques).....	55
FIG. III.5. Géométrie de point de pénétration de l'ionosphère.....	56
FIG. III.6. Principe d'interpolation des IPP.....	57
FIG. III.7. Niveau de protection.....	65
FIG. III.8. Diagramme de Stanford.....	68
FIG. IV.1. Interface du logiciel gLAB et modes de positionnement.....	72
FIG. IV.2. Visualisation globale des sites 305 et 305 b sous Google Earth (à gauche) avec la mise en place du matériel sur le site 305 b (à droite) lors du test effectué sur le toit du CTS (13 mars 2018).....	73
FIG.IV.3. Propriétés des positions données par GPS Pathfinder.....	74
FIG.IV. 4. Localisation des sites utilisés dans cette étude.....	76
FIG. IV.5. Visualisation des erreurs de position entre le GPS et le GPS+EGNOS sur les composantes Nord et Est pour les quatre sites (a: Oran, b: Alger, c: Bejaia, d: BirSbaa).....	79
FIG.IV.6. Comparaison de l'erreur de position verticale entre le GPS et le GPS+EGNOS pour les quatre sites (a: Oran, b: Alger, c: Bejaia, d: BirSbaa).....	80
FIG.IV.7. Positions absolues pour chaque site en utilisant GPS uniquement (bleu) et GPS+EGNOS (rouge) (a : Oran, b : Alger, c : Bejaia, d : BirSbaa).....	81
FIG.IV.8. Nombre de satellites utilisés pour la solution de navigation EGNOS (en rouge) par rapport au nombre de satellites utilisés dans la solution GPS (en bleu) au site d'Alger.....	83
FIG.IV.9. Impact des corrections rapides sur l'erreur horizontale (a) et verticale (b).....	84
FIG.IV.10. Valeur des corrections rapides en mètres pour chaque satellite GPS.....	85
FIG.IV.11. Etat de surveillance de chaque satellite GPS par EGNOS (Vert : satellite surveillé, gris : satellite n'est pas surveillé ou n'est pas dans le masque, rouge : satellite n'est pas utilisé).....	85
FIG.IV.12. Impact des corrections lentes sur l'erreur horizontale (a) et verticale (b).....	86
FIG. IV.13. Valeur des corrections lentes en mètres pour chaque satellite GPS.....	87

FIG.IV. 14. Corrections ionosphériques pour tous les satellites GPS obtenues à partir du modèle Klobuchar (bleu) d'une part et à partir des corrections diffusées par EGNOS (rouge)	88
FIG.IV.15. Délai ionosphérique pour les satellites PRN 1, 12, 18, 20, 27 et 28.....	90
FIG.IV.16. Erreur horizontale (a) et verticale (b) relativement à la position exacte du site d'Oran 305 durant 2017 et 2018.....	91
FIG.V.1. Distribution géographique des stations RIMS.....	95
FIG.V.2. Antenne RIMS B à Alexandrie (Egypte) & Antenne RIMS and VSAT à Las Palmas (Iles Canaries / Espagne).....	96
FIG.V.3. Site RIMS avec 3 récepteurs ; Iles Canaries.....	97
FIG.V.4. Durée d'installation d'une station RIMS.....	98
FIG.V.5. Emplacement des sites pour un choix optimal d'une station RIMS en Algérie.....	99
FIG. V. 6. Disponibilité horizontale en % avec 39 stations RIMS à gauche et 39 stations RIMS incluant le site d'El Goléa à droite.....	100
FIG.V. 7. Disponibilité verticale en % avec 39 stations RIMS à gauche et 39 stations RIMS incluant le site d'El Goléa à droite.....	100
FIG.V.8. Distribution géographique des 39 stations RIMS avec le site d'Oran.....	101
FIG.V.9. Ajout de stations RIMS.....	102
FIG.V.10. Distribution géographique des 39 stations RIMS du système EGNOS ainsi que les sites choisis (encadrés en bleu) pour cette étude.....	103
FIG.V.11.Sites choisis pour cette étude.....	104
FIG.V.12.EGNOS APV-I disponibilité horizontale et verticale, le 1er août 2019.....	105
FIG.V.13.Sigma GIVE en mètre avec 39 stations RIMS incluant le site d'El Goléa.....	107
FIG.V.14.Sigma GIVE en mètre avec 39 stations RIMS incluant le site d'Oran et Adrar.....	108
FIG.V. 15. Sigma GIVE en mètres avec 39 stations RIMS.....	108
FIG.V.16.Nombre de satellites utilisés dans la solution EGNOS (rouge) en comparaison avec le nombre de satellites utilisés dans la solution GPS (bleu) au site Adrar.....	110
FIG.V.17.Évolution du niveau de protection PL et de l'erreur de position PE pendant toute la durée d'observation au niveau du site d'Oran.....	110
FIG.V.18. Évolution du niveau de protection PL et de l'erreur de position PE au niveau du site d'Adrar, (a) correspond à toute la durée d'observation et (b) présente un zoom sur une période où $PL > AL$	111
FIG.V.19.Seuil de protection horizontal et vertical représenté par le diagramme de Stanford pour le site d'Oran.....	112
FIG.V.20 .Seuil de protection horizontal et vertical représenté par le diagramme de Stanford pour le site d'Adrar.....	113

LISTE DES TABLEAUX

TAB.I.1.Fréquences et longueur des ondes porteuses du système GPS.....	9
TAB.I.2.Références temporelles et géographiques des systèmes GNSS.....	15
TAB.I.3.Précision horizontale(HPE) et verticale (VPE) en fonction du modèle ionosphérique appliqué.....	21
TAB.I.4.Précisions horizontale (HPE) et verticale (VPE) en fonction du modèle troposphérique appliqué.....	22
TAB.I.5.Erreur horizontale et verticale (95%) du site d'Alger avec et sans corriger le DCB.....	23
TAB.I.6. Exigences opérationnelles pour l'aviation civile.....	27
TAB.II.1.Segment spatial du système EGNOS.....	37
TAB.II.2.Description du contenu du message SBAS.....	42
TAB.II.3.Masque PRN.....	45
TAB.II.4.Exemple de masque PRN pour le GPS.....	46
TAB.III.1.Messages de correction différentielle	51
TAB.III.2.Tableau de référence du modèle EGNOS pour la correction troposphérique : valeurs moyennes pour les différents paramètres météorologiques.....	59
TAB.III.3. Tableau de référence du modèle EGNOS pour la correction troposphérique : variation saisonnière pour les différents paramètres météorologiques.....	59
TAB.III.4.Indicateur de précision.....	62
TAB.III.5.Conversion de GIVEI à $\sigma_{I,GIVE}^2$	63
TAB.III.6.Classes pour le risque d'intégrité.....	67
TAB.IV.1.Erreurs horizontale en (m) (HPE : Horizontal Positioning Error) et verticale (VPE : Vertical Positioning Error) (95%) rapportée aux coordonnées approchées du fichier RINEX.....	73
TAB.IV.2.Erreurs verticale et horizontale pour les deux sites 305 et 305 b en utilisant le récepteur mono-fréquence Juno.....	74
TAB.IV.3.Id, longitude et latitude de chaque site utilisé.....	75
TAB.IV.4.Précision des coordonnées pour chaque site (en mètres).....	77
TAB.IV.5.Erreur de position horizontale et verticale.....	78
TAB.IV.6.Écart-type (en mètres).....	82

TAB.IV.7 Impact des corrections rapides sur l'erreur de position en mètres.....	84
TAB.IV.8.Impact des corrections lentes sur l'erreur de position en mètres.....	86
TAB.IV.9.Erreur horizontale et verticale (95%) sans correction du DCB.....	90
TAB.V.1. Liste des stations RIMS actuelles.....	95
TAB.V. 2.Classes pour la disponibilité.....	104
TAB.V.3.Disponibilité horizontale ($HPL < HAL = 40$ mètres) avec 39 stations RIMS incluant le site d'Oran et un site choisi en %.....	105
TAB.V.4.Disponibilité verticale ($VPL < VAL = 50$ mètres) avec 39 stations RIMS incluant le site d'Oran et un site choisi en %	106
TAB.V.5.Sigma GIVE avec 39 stations RIMS incluant le site d'Oran et un site choisi en mètres	107
Tab V. 6. Performance du système EGNOS en termes de précision pour les deux sites (Oran et Adrar).....	109

LISTE DES ABREVIATIONS

AAIM	Aircraft Autonomous Integrity Monitoring
ABAS	Aircraft Based Augmentation System
APV	APproach with Vertical guidance
BDS	Beidou Navigation Satellite System
bps	Bits Per Seconde
BPSK	Binary Phase Shift Keying
C/A	Coarse Acquisition code
CAT	CATegory
CDMA	Code Division Multi Access
CGM	Center of Global Monitoring
CPF	Central Processing Facility
DCB	Differential Code Bias
DGPS	Differential Global Positioning System
DOP	Dilution Of Precision
DOY	Day Of Year
ECAC	European Civil Aviation Conference
ECEF	Earth-Centered Earth-Fixed
EDAS	EGNOS Data Access Service
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service
ENU	East-North-Up
ESA	European Space Agency
EWAN	EGNOS Wide Area Network
EWF	Evil Wave Form
FC	Fast Corrections
FDMA	Frequency Division Multi Access
GAGAN	GPS And GEO Augmented Navigation
GBAS	Ground Based Augmentation System
GDOP	Geometric Dilution of Precision
GEO	Geostationary Satellite
GIOVE	Galileo In-Orbit Validation Element
GIVE	Grid Ionospheric Vertical Error
GIVEI	GIVE Indicator
GLONASS	GLObalnia NAVigationnaia Spoutnikovaia Sistéma
GMS	Ground Monitoring Station
GNSS	Global Navigation Satellite Systems
GPS	Global Positioning System

GRS	Geodetic Reference System 1980
GST	Galileo System Time
GTRF	Galileo Terrestrial Reference Frame
GUS	Ground Uplink Station
HAL	Horizontal Alarm Limit
HPE	Horizontal Position Error
HPL	Horizontal Protection Level
ICAO	International Civil Aviation Organization,
IGP	Ionospheric Grid Point
IGS	International GNSS Service
INLUS	Indian Land Uplink Station
INMCC	Indian Master Control Centre
INRES	Indian Reference Stations
IOD	Issue Of Data
IONEX	IONosphere EXchange
IPP	Ionospheric Pierce Point
IRNSS	Indian Regional Navigation System (NaviC)
ITRF	International Terrestrial Reference Frame
LPV 200	Localizer Performance with Vertical guidance at 200 feet
LTC	Long-term corrections
MCC	Mission Control Centre
MCS	Master Control Station
MOPS	Minimum Operational Performance Standards
MSAS	Multi Satellite Augmentation System
MT	Message Type
MTSAT	Multi-functional Satellite Augmentation System
NLES	Navigation Land Earth Stations
NPA	Non-Precision Approach
OS	Open Service
PA	Precision Approach
PPP	Precise Point Positioning
PPS	Precise Positioning Service
PR	Pseudo Range
PRC	Pseudo Range Correction
PRN	Pseudo Random Noise (satellite identifier)
QZSS	Quazi-Zenith Satellite System
RIMS	Ranging and Integrity Monitoring Stations
RINEX	Receiver Independent Exchange Format
RRC	Range-Rate Corrections

RSS	Root Sum Squared
RTCA	Radio Technical Commission for Aeronautics
SBAS	Satellite Based Augmentation Systems
SDCM	System of Differential Correction and Monitoring
SOL	Safety-of- Life
SPP	Single Point Positioning
SPS	Standard Positioning Service
sps	symboles per second
SSF	Standard Storage Format
TAI	International Atomic Time
TBC	Trimble Business Center
TEC	Total Electron Content
TTA	Time To Alarm
UDRE	User Differential Range Error Indicator
UIRE	User Ionospheric Range Error
UIVE	User Ionospheric Vertical Error
UTC	Universal Time Coordinated
VAL	Vertical Alert Limit
VHF	Very High Frequency
VPE	Vertical Position Error
VPL	Vertical Protection Level
WAAS	Wide Area Augmentation System
WGS84	World Geodetic System
WMS	Wide Area Master Station
WRS	Wide Area Reference Station

INTRODUCTION GENERALE

Le positionnement par GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) subit une évolution croissante pour répondre aux exigences de précision, d'intégrité, de continuité et de disponibilité requises par un éventail sans cesse plus grand d'utilisateurs potentiels. Initialement, le système GPS (*Global Positioning System*) premier GNSS opérationnel, permettait de positionner avec une précision d'une dizaine de mètres sur la surface terrestre. Puis, des techniques différentielles utilisant simultanément plus d'un récepteur GPS ont été développées afin d'améliorer la précision de positionnement; ces techniques nécessitent au minimum deux récepteurs, ce qui implique des coûts additionnels et une logistique plus complexe (observation simultanée des mêmes satellites à chaque site, multiples opérateurs, etc.) comparativement à l'utilisation d'un récepteur unique. Même le développement récent de la méthode PPP (*Precise Point Positioning*) hormis la précision centimétrique atteinte, ne permettait pas de répondre aux exigences du temps réel ni de l'intégrité des solutions fournies.

Dans ce contexte, des systèmes d'augmentations spatiales SBAS (*Satellite Based Augmentation Systems*) ont été développés afin d'atteindre un niveau de précision plus élevée comparativement à l'utilisation d'un seul récepteur GPS, en particulier GPS mono-fréquence.

Les systèmes d'augmentations spatiales, utilisent un réseau de stations de référence pour prendre des mesures et modéliser l'ionosphère en temps réel. Les mises à jour des corrections sont transmises par des satellites géostationnaires en continu afin de permettre à l'utilisateur de corriger sa position.

Il existe divers systèmes d'augmentation, pratiquement un sur chaque continent. Pour la région d'Afrique du Nord, elle est couverte par le système Européen d'augmentation appelé EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay Service*).

Ce système, sur lequel est basé ce travail, s'appuie sur un segment spatial de 3 satellites géostationnaires et un réseau de stations terrestres comprenant plus de 40 stations RIMS (*Ranging and Integrity Monitoring Stations*) dont une station RIMS est située à Agadir (Maroc), ajoutée en fin de 2013 et une autre à Djerba (Tunisie), opérationnelle depuis 2009, des stations de calcul MCC (Mission Control Centre) et des stations de transmission NLES (Navigation Land Earth Stations).

EGNOS augmente la précision du GPS et GLONASS; pour parvenir à cette fin, les erreurs dégradant la précision du positionnement absolu en temps réel sont corrigées en appliquant les corrections transmises par EGNOS, une précision inférieure à 3 mètres et 4 mètres sur le plan horizontal et vertical respectivement peuvent être obtenues dans la zone de service d'EGNOS [ESA, 2019 (a)].

Buts et objectifs de la recherche

EGNOS offre aux utilisateurs un service de navigation et de positionnement très performant en temps réel, meilleur que ce qui est actuellement disponible en utilisant le GPS mono-fréquence. Le système permettra d'améliorer considérablement le service standard du GPS, en termes de précision et de garantie de service par la diffusion d'un signal d'intégrité. Cette amélioration est possible grâce à la diffusion des corrections différentielles sur les éphémérides, sur les horloges et sur les délais ionosphériques.

La problématique de ce travail de thèse portant sur l'apport d'EGNOS et de sa capacité à améliorer la précision du GPS mono-fréquence en Algérie sans station RIMS, et de pallier les faiblesses de ce système.

Ainsi, l'objectif principal recherché est de comparer, analyser et étudier la précision du GPS et GPS + EGNOS, en portant une attention particulière aux impacts des corrections lentes, rapides et des corrections ionosphériques transmises par EGNOS sur la précision de positionnement.

Pour atteindre cet objectif, une étude expérimentale a été effectuée sur quatre sites en Algérie, à savoir Oran, Alger, Bejaia et Ouargla (Bir Sbaa) pour différentes dates de l'année 2018. Le choix de ces 4 sites et dates réside principalement dans la disponibilité des données. Une façon de répondre à la problématique présentée, une analyse comparative a été menée selon deux approches:

- La première approche est de calculer une solution en utilisant les observations de code en mode absolu sur la fréquence L1 du GPS. C'est le cas d'un GPS mono-fréquence.
- La seconde approche possède à la fois ces observations du GPS, mais aussi des corrections différentielles transmises par EGNOS, téléchargées à partir du site de CNES (*Centre national d'études spatiales*).

Le deuxième objectif de cette thèse est d'analyser les performances du système EGNOS en considérant la dernière proposition de la Commission Européenne (août 2019), qui porte sur la mise en place de deux stations RIMS en Algérie, une première à Oran et par la suite une deuxième à Adrar. Les performances du système ont été analysées en termes de disponibilité à travers les niveaux de protection basés sur des alarmes limites et l'analyse de l'erreur ionosphérique. Afin d'atteindre ce but, quelques actions spécifiques ont été développées :

- Choix optimal de mise en place de deux stations RIMS en Algérie.
- Analyse des performances réelles du système EGNOS sur les deux sites (Oran et Adrar) suivant les exigences de l'aviation civile internationale afin de confirmer l'impact de l'éloignement de l'utilisateur par rapport à la zone de service d'EGNOS.

Contenu de la thèse

Cette thèse se compose de cinq (5) chapitres et de quatre (4) annexes. L'introduction générale de ce travail de thèse est constituée par une mise en contexte de ce travail en le situant dans son cadre et également la présentation du but principal de ce travail, de ses objectifs, de la méthodologie mise en œuvre ainsi que des différentes expérimentations effectuées pour atteindre les objectifs.

Le chapitre I contient une description des systèmes de positionnement GNSS ainsi que les systèmes de référence dont lesquelles les positions sont exprimées. Une partie de ce chapitre est consacré à la description détaillée de l'équation du positionnement absolu en approche SPP (*Single Point Positioning*), ainsi que toutes les sources d'erreurs qu'il faut modéliser avec les algorithmes associés pour corriger l'erreur ionosphérique et troposphérique.

Ce chapitre donne aussi quelques indications sur les performances et les limitations des systèmes GNSS et évoque aussi la navigation par satellite pour l'aviation civile. Les différentes notions liées aux exigences de l'aviation civile sont définies. Chaque phase de vol, et plus particulièrement chaque catégorie d'approche, y est également décrite ainsi que les niveaux de performance associés.

Le chapitre II contient une présentation des systèmes d'augmentations terrestres et spatiaux (SBAS) ainsi que le principe de fonctionnement de ces systèmes. Une présentation du système EGNOS est évoquée dans ce second chapitre, ainsi qu'une description détaillée des messages transmis par EGNOS. Ces messages contiennent des corrections nécessaires pour obtenir une meilleure précision de positionnement et des informations sur l'intégrité.

Les corrections transmises par EGNOS peuvent être classées en trois types: corrections rapides, lentes et corrections ionosphériques. Ces corrections sont décrites en détail dans le chapitre III.

Le chapitre III porte sur l'aspect utilisation et exploitation du système EGNOS; il est dédié aux principes et application des corrections d'EGNOS. Ce chapitre contient, d'une part une présentation des notions théoriques concernant les équations mathématiques utilisées pour calculer une position par EGNOS, et d'autre part, les principales étapes pour calculer les niveaux de protection, ainsi que les différentes variances associées aux différentes corrections permettant de borner les mesures de pseudo-distance.

Dans ce chapitre, le concept d'intégrité est expliqué tel que défini pour l'aéronautique et fourni par le système d'augmentation EGNOS. Ce concept est différent d'une approche à une autre. L'intégrité permet de garantir la fiabilité des informations transmises par les systèmes de positionnement.

Le chapitre IV discute les *résultats obtenus* dans le cadre de cette recherche pour l'amélioration de la précision GPS en utilisant les corrections EGNOS. La première partie de ce chapitre, présente l'analyse des données collectées sur quatre sites en Algérie, dont des données complémentaires du système EGNOS sont disponibles, afin de comparer la précision de positionnement sans et avec prise en compte des corrections provenant de système EGNOS. L'impact de chaque correction transmise par EGNOS sur la précision a été aussi analysé et discuté dans la deuxième partie.

Les résultats présentés dans ce chapitre ont montré que l'utilisation des corrections fournies par EGNOS améliore sensiblement la précision du positionnement, ces résultats ont été obtenus sans station RIMS en Algérie, et ils indiquent que le service ouvert d'EGNOS est disponible pour les quatre sites étudiés, seulement avec le réseau Européen.

Le dernier chapitre présente les résultats des simulations de faisabilité et le choix optimal de la mise en place de deux stations RIMS en Algérie. Cette étude fait suite à la sollicitation de la Commission Européenne, dont l'objectif est d'analyser les performances du système EGNOS en considérant deux stations RIMS en Algérie (Oran + un site au sud).

Ce chapitre se conclut par l'analyse des performances du système en termes de précision et d'intégrité, afin de montrer l'effet de la proximité géographique par rapport aux réseaux actuels de stations RIMS en utilisant des données réelles collectées sur les deux sites potentiels d'Oran et d'Adrar.

Enfin, en **conclusion**, sont présentées une synthèse de tous les résultats de cette étude et des **perspectives** pour la suite de ce travail, en citant quelques axes à développer dans le futur.

Chapitre I

Contexte théorique :

Principes fondamentaux des systèmes GNSS

I.1. Introduction.....	6
I.2.Systèmes GNSS.....	6
I.2.1. GPS.....	8
I.2.2.GLONASS.....	10
I.2.3.GALILEO.....	10
I.2.4.BeiDou.....	11
I.3.Modes de positionnement.....	12
I.3.1.Positionnement en mode absolu.....	12
I.3.2. Positionnement en mode différentiel	13
I.4.Systèmes de référence.....	14
I.5.Equation d'observation du positionnement standard par GPS(SPP).....	15
I.6. Erreurs affectant les mesures des pseudo-distances.....	18
I.6.1.Les erreurs d'éphémérides et horloge des satellites.....	18
I.6.2.Le récepteur.....	18
I.6.3.Les multi trajets.....	19
I.6.4.L'ionosphère.....	19
I.6.5.La troposphère.....	21
I.6.6.Le biais différentiel de code(DCB).....	22
I.6.7.La géométrie des satellites (GDOP)	24
I.7.Performances et limitations des GNSS.....	25
I.8.Navigation par satellite pour l'aviation civile.....	25
I.9.Conclusion.....	28

I.1 Introduction

Les GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) sont des systèmes de positionnement par satellites, dont l'objectif est de fournir une solution de position à l'utilisateur. Celle-ci doit être la plus fiable possible, en particulier pour des applications critiques, telle que l'aviation civile pour lesquelles les contraintes d'intégrité sont importantes. La position est calculée sur la base de mesures fournies par les satellites. Or ces mesures peuvent parfois devenir erronées (dysfonctionnement des satellites, propagation dans l'atmosphère, présence de multi-trajets...), entraînant une dégradation de la position calculée. Ce chapitre a pour but de présenter les principes du positionnement par satellites, les différents systèmes GNSS, ainsi que les limitations qui leurs sont associées. Le chapitre se termine par les exigences opérationnelles des systèmes GNSS appliqués à l'aviation civile.

I.2 Systèmes GNSS

Les GNSS sont des constellations de satellites en orbites terrestres, qui diffusent des signaux sur plusieurs fréquences vers la terre dans le but est de permettre aux utilisateurs de déterminer à n'importe quel moment et en n'importe quel lieu, la position en trois dimensions avec une précision métrique en temps réel. Les différents GNSS actuels se basent tous sur le même principe que le système GPS. L'infrastructure du système GNSS est représentée par la figure I.1 et qui s'articule, sur trois segments; spatial, terrestre et utilisateur [Jeffrey C., 2010].

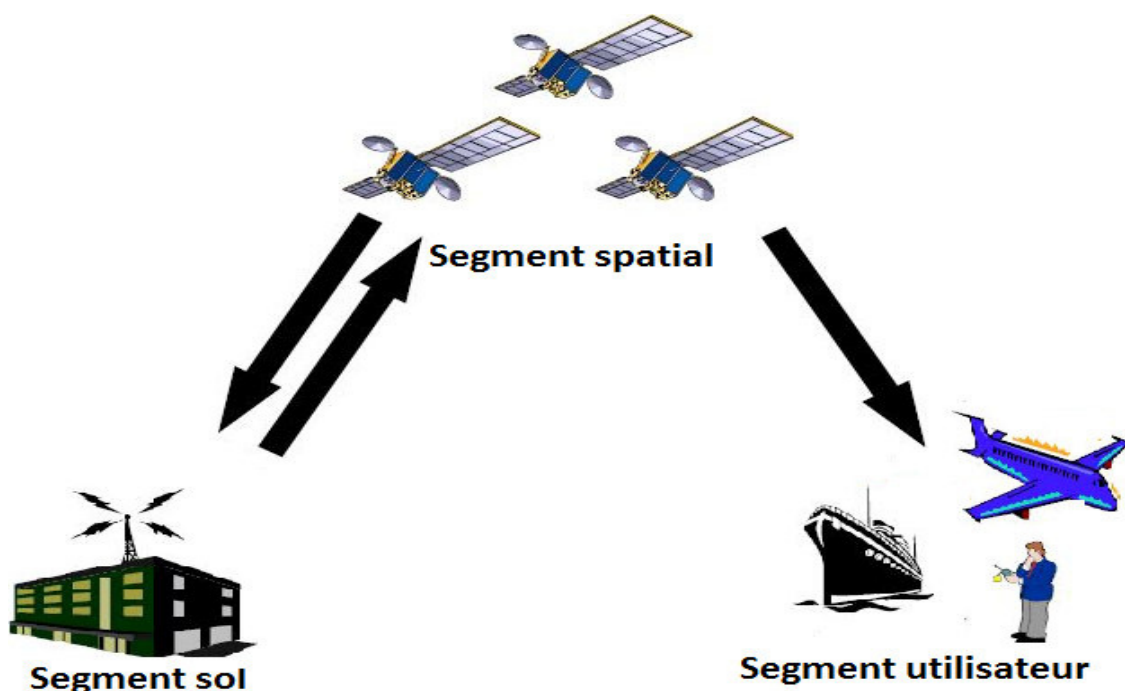


FIG. I.1. Infrastructure du système GNSS

Le segment spatial correspond à la constellation de satellites qui permet de générer et de transmettre les signaux GNSS au moyen d'horloges ultra-stables, et de fournir aux utilisateurs les messages de navigation qui comportent [Hofmann-Wellenhof B. et al, 2008]:

- Ephémérides : Un jeu de 16 paramètres comprenant les éléments képlériens de l'orbite des satellites et leurs dérivées premières temporelles, permettant à l'utilisateur de calculer la position des satellites.
- Corrections d'horloges : Un modèle polynomial caractérisant le fonctionnement des horloges embarquées et les paramètres de correction au temps GNSS.
- Almanach : Nécessaire pour indiquer de façon approximative la position de tous les satellites de la constellation.
- Correction ionosphérique : Les coefficients du modèle ionosphérique global simplifié permettant de calculer le délai ionosphérique.

Le segment sol ou de contrôle a pour objectif de surveiller le fonctionnement des satellites et de corriger en permanence les erreurs d'horloge et d'éphémérides [Tsui J B-Y., 2005]. Ces informations sont transmises aux utilisateurs, via les signaux émis par les satellites dans le message de navigation [Jin S. et al, 2014]. Il est nécessaire de rafraîchir régulièrement les données collectées sur les satellites, afin d'assurer la précision des mesures.

Enfin, le segment utilisateur comprend les récepteurs utilisés pour se positionner. Ces récepteurs passifs ne font que recevoir les signaux transmis par les satellites GNSS. Ils ont pour fonctions de mesurer des distances entre l'antenne-récepteur et les satellites-émetteurs, de décoder les messages radiodiffusés qui contiennent les corrections d'horloges des satellites et les éphémérides servant aux calculs de la position des satellites au temps d'observation, et de calculer les coordonnées spatiotemporelles de l'utilisateur.

Actuellement, les GNSS sont constitués de deux systèmes mondiaux pleinement opérationnels: le système mondial des États-Unis GPS (*Global Positioning System*) et le système mondial de satellites de navigation de la fédération de Russie GLONASS (*GLOBAL NAVIGATION Satellite System*), ainsi que d'autres systèmes mondiaux ou régionaux, à savoir le système Européen de navigation par satellite (*GALILEO*), le système Compass/BeiDou lancé par la Chine, le système régional indien de navigation par satellite IRNSS (*Indian Regional Navigation System*) et le système satellitaire Quasi-Zénith (*QZSS*) du Japon [Jin S. et al, 2014].

Il existe des systèmes d'amélioration satellitaire SBAS (*Satellite Based Augmentation Systems*), comme le système WAAS (*Wide Area Augmentation System*) au des États-Unis, le système Européen de navigation par recouvrement géostationnaire EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay Service*), le système Russe de correction et de surveillance différentielles SDCM (*System of Differential Correction and Monitoring*), le système géostationnaire de navigation renforcée assistée par GPS GAGAN (*GPS And GEO Augmented Navigation*) lancé par l'Inde et le MSAS (*Multi Satellite Augmentation System*) du Japon.

Ces systèmes d'augmentation ne permettent pas seulement l'accès à la précision de la position mais assurent la fiabilité et l'intégrité. Ces systèmes d'augmentation de positionnement seront largement développés dans le chapitre suivant (chapitre II).

I.2.1 GPS

Le système GPS est le premier système à être pleinement opérationnel, il a été développé par l'armée Américaine dans les années 70 pour des fins militaires. Le segment spatial est constitué d'au moins 24 satellites répartis sur six plans orbitaux avec une inclinaison de 55° par rapport à l'équateur. Ces satellites, à une distance d'environ 20560 km de la surface de la terre, effectuent un tour complet à chaque 11 heures et 58 minutes. La configuration de la constellation assure, en moyenne, qu'entre 4 à 7 satellites sont visibles peu importe la position sur la surface de la terre, et jusqu'à 11 dans certains cas [Capderou M., 2012].

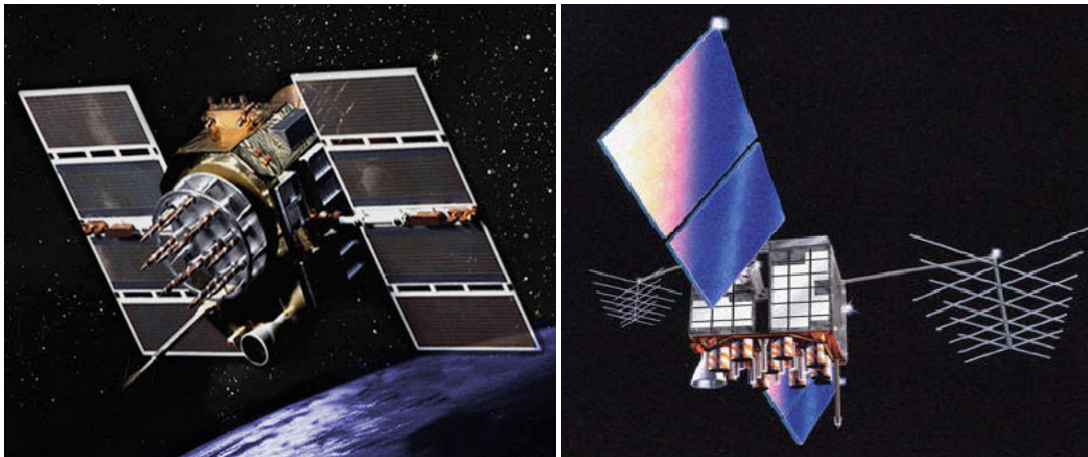


FIG. I.2. Satellites GPS

Actuellement, la constellation comporte 31 satellites opérationnels contrôlés par le segment sol. Le GPS fournit aux utilisateurs civils et militaires deux services pour le positionnement en mode absolu :

- Le SPS (*Standard Positioning Service*) permet le positionnement en temps réel, destiné à tous les utilisateurs du GPS à tout moment et en tout lieu sur la terre. Le SPS est fourni par la fréquence L1 qui contient un code C/A et un message de navigation.
- Le PPS (*Precise Positioning Service*), est une version plus précise de SPS destiné aux utilisateurs militaires et civils habilités. L'accès au service est contrôlé par le ministère de la défense Américain. En plus de la fréquence L1 accessible aux civils, le PPS exploite des données transmises sur une autre fréquence L2 [Chen X. et al, 2012].

Les signaux GPS consistent en des ondes porteuses sur lesquelles sont transmis le code C/A d'accès libre, le code P ainsi que le message du satellite. La modernisation des signaux GPS permet d'ajouter un nouveau signal civil (L2C) à la bande de fréquence L2, l'utilisation de ce code combinée au signal L1 C/A permet de s'affranchir des termes ionosphériques du premier ordre, améliorant ainsi le positionnement temps réel. En 2005, une nouvelle fréquence L5a été ajoutée aux satellites GPS [Sanz Subirana J. et al, 2013], l'intérêt majeur de cette modernisation pour les applications civiles est d'assurer une plus grande redondance des observations ainsi que de faciliter la résolution des ambiguïtés sur la phase, les fréquences du GPS sont présentées par le tableau I.1.

TAB.I.1. Fréquences et longueur des ondes porteuses du système GPS

Porteuse	Fréquence(MHz)	Longueur d'onde (cm)
L1	1575.42	19.0
L2	1277.60	24.4
L5	1176.45	25.5

L'expression du signal L1 est la suivante [Tsui J B-Y., 2005]:

$$S_{L1} = A_p \cdot P(t)D(t) \cdot \cos(2\pi f_1 \cdot t + \phi) + A_c \cdot C(t) \cdot D(t) \cdot \sin(2\pi f_1 \cdot t + \phi) \quad (I.1)$$

Où A_p est l'amplitude du code P, $P(t)$ représente la phase du code P, $D(t)$ est le message de navigation, f_1 est la fréquence L1, ϕ est la phase initiale, A_c est l'amplitude du code C/A, $C(t)$ représente le code C/A.

Le système GPS fonctionne sur le principe de l'accès multiple à répartition de code CDMA (Code Division Multi Access), en utilisant la technique d'étalement de spectre par séquence directe. A chaque satellite correspond un code d'étalement, pseudo aléatoire, qui lui est propre [Chen X. et al, 2012]; le récepteur, qui connaît les codes des satellites, effectue un calcul de corrélation entre les signaux reçus et le signal recherché.

Les stations de poursuite du système sont équipées, entre autres, de récepteurs GPS stationnés sur des points géodésiques dont les coordonnées sont précisément connues. Les cinq stations de poursuite du GPS sont situées sur les îles d'Ascension (océan Atlantique), de Diego Garcia (océan Indien), de Kwajalein et d'Hawaii (océan Pacifique) ainsi qu'à Colorado Springs (station-maîtresse) [Tsui J B-Y., 2005]. La répartition des stations sol à travers le monde est donnée à la figure I.3.

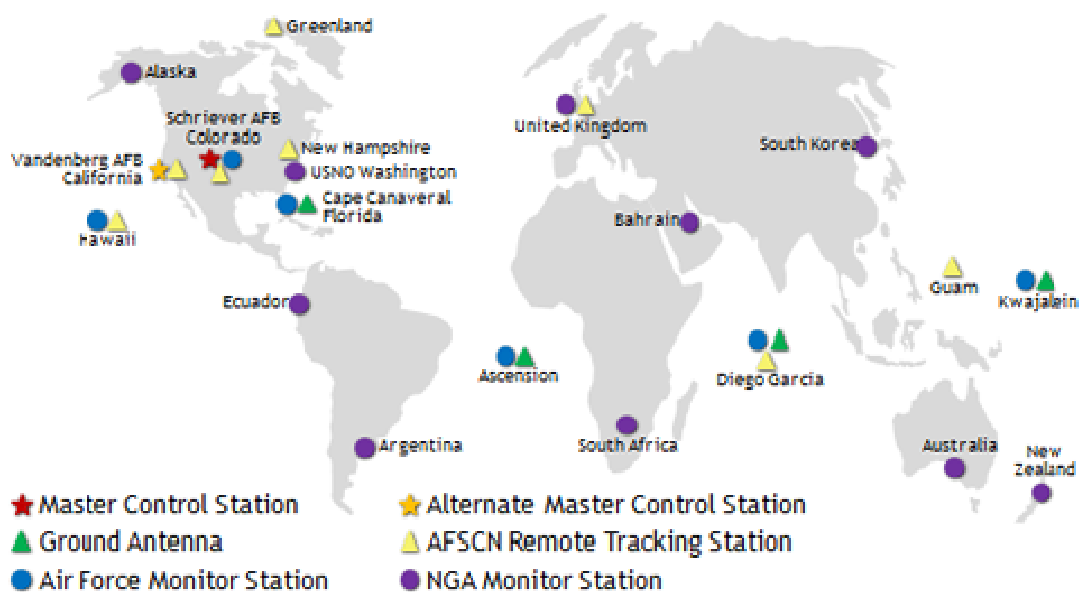


FIG.I.3. Localisation des différentes stations de contrôle GPS

I.2.2 GLONASS

Le système de navigation GLONASS, développé par l'armée Russe dans les années 1980, est l'équivalent du système Américain GPS. Ce système a été pleinement fonctionnel en 1993 avec une constellation de 24 satellites en orbite, répartis sur trois plans orbitaux inclinés à 65° , et à 19100 km d'altitude. GLONASS émet un signal avec deux fréquences, qui diffèrent d'un satellite à l'autre, centrées autour de $G1 = 1609$ MHz et $G2 = 1252$ MHz. Les satellites de la nouvelle génération GLONASS-K émettent une troisième fréquence, $G3 = 1205$ MHz [Capderou M., 2012].

Les satellites GLONASS utilisent une autre technique d'accès multiple, dite à répartition de fréquences FDMA (*Frequency Division Multi Access*). Chaque satellite émet le même code mais sur des fréquences qui lui sont propres. Le récepteur détermine l'origine du signal grâce à la fréquence de ce dernier [Jin S. et al, 2014].

I.2.3 GALILEO

L'augmentation des applications de navigation par satellites, le manque de garantie de la disponibilité du service des systèmes GPS et GLONASS gérés par les armées Américaines et Russes, ainsi que le souci d'indépendance technologique et stratégique vis à vis des Etats-Unis et de la Russie ont poussé l'Union Européenne à créer son propre système de navigation par satellites baptisé GALILEO. Le système Européenne GALILEO est constitué d'une constellation de trente satellites placés sur trois orbites circulaires avec un rayon d'orbite égale à 29,600 Km [Leick A. et al, 2015], dont le premier satellite expérimental GIOVE-A a été lancé en décembre 2005 et le second satellite GIOVE-B en avril 2008 (*Galileo In-Orbit Validation Element*) pour valider les caractéristiques du système dans l'espace et tester le segment de contrôle au sol [Nurmi J. et al, 2015], ses premiers services, sont disponibles depuis décembre 2016 et doivent être utilisés en complément avec d'autres systèmes comme le GPS Américain [Sitruk A.,and Plattard S., 2017].

Les satellites de GALILEO sont à une altitude de 23616 Km, inclinées à 56° sur l'équateur, permettant ainsi une couverture des régions de haute latitude jusqu' à 75° . Sur chacun des trois plans d'orbite, neuf satellites sont régulièrement répartis plus un en réserve, prêt à prendre la place d'un satellite défaillant. À cette altitude, la période de révolution des satellites sur leur orbite est de 14 heures et 21 minutes.

Contrairement au GPS et GLONASS qui offrent deux services, GALILEO prévoit cinq services différents dont les performances dépendront de l'usage de chacun :

- Le service ouvert (*Open service*), similaire à celui offert par le système GPS civil, avec une meilleure précision, il est destiné aux applications grand public (position, vitesse et date), il sera gratuit et couvrira toute la terre.
- Le service commercial (*Commercial Service*), de même performance que le service ouvert auquel seront ajouté des données de correction et une information sur l'intégrité. Son accès est restreint par cryptage aux services d'exploitation commercial.

- Le service de sûreté de la vie (*Safety Of Life*), de même performance que le service de base avec une information additionnelle de son intégrité élevée. Il sera restreint aux groupes d'utilisateurs spécifiques tels que les hôpitaux, les pompiers, les transports....
- Le service public régulé (*Public Regulated Service*), ce service offrira une garantie sur la continuité des applications de sécurité et de défense des Etats Européens et leurs alliés. Il sera contrôlé par l'Union Européenne et les gouvernements des Etats membres. Crypté par des codes spécifiques, son accès sera autorisé par les Etats membres de l'Union Européenne.
- Le service d'aide à la recherche et au sauvetage (*Search And Rescue*), ce service permettra la diffusion et la localisation de messages de détresse [Prasad R. and Ruggieri M., 2005].

Les satellites Galileo émettront, en permanence, sur plusieurs fréquences voisines de celles du GPS, voire en superposé avec elles : elles sont notées E1 (superposée à L1), E5a (superposée à L5), E5b (1207,14 MHz) et E6 (1278,75 MHz). Les satellites Galileo utiliseront le même principe que les satellites GPS CDMA (*Code Division Multi Access*), en recourant à la technique d'étalement de spectre par séquence directe.

I.2.4 BeiDou

Le système chinois BeiDou, appelé officiellement BDS (*BeiDou Navigation Satellite System*) et appelé anciennement COMPASS, développé par la Chine depuis le milieu des années 1980. BeiDou-COMPASS, s'est accéléré ces dernières années en effectuant une transition d'un système de positionnement par satellite régional vers un système mondial [OACI, 2012].

Ce système compte cinq satellites géostationnaires et 30 satellites non géostationnaires à une altitude de 21150 km [Chen X. et al, 2012]. Les satellites géostationnaires sont respectivement situés aux longitudes 58° 45' Est, 80° Est, 110° 30' Est, 140° Est et 160° Est. Deux types de services seront disponibles, l'un est civil, l'autre est destiné uniquement à des utilisateurs autorisés par le gouvernement Chinois, par exemple, l'armée Chinoise [Santerre R. et al, 2014].

Les satellites actuels de la constellation BeiDou transmettent des signaux sur 3 ondes porteuses (B1 à 1561.098 MHz, B2 à 1207,14 MHz et B3 à 1268,52 MHz), ainsi que trois codes qui modulent les différentes porteuses du système [Georges G., 2016]. Les signaux de BeiDou utilisent la technique CDMA [China Satellite Navigation Office, 2011].

Pour clore la liste des systèmes de positionnement, citons le système régional de positionnement par satellite IRNSS (*Indian Regional Navigational Satellite System*) développé par l'Inde, il est accessible sur le pays et aux alentours jusqu'à 1500 km [Mukesh R. et al, 2019], l'IRNSS a été renommé par une appellation officielle NaviC (*Navigation Constellation*), et utilise un signal dans la bande L5 (1164,45-1188,45 MHz) et la bande S (2483,5-2500 MHz) avec une fréquence porteuse de 1176,45 MHz (f1) et 2492,08 MHz (f2) respectivement [Desai MV. and Shah SN., 2019].

Le Japon développe également le système satellitaire Quasi-Zénith QZSS (*Quasi-Zenith Satellite System*) qui est un système régional spatial de positionnement et de navigation. Il couvre l'Asie de l'Est et l'Océanie. Le QZSS émet quatre signaux interopérables (L1 C/A, L1C, L2C et L5) et deux signaux (L1-SAIF et LEX) complémentaires destinés à renforcer sur la zone couverte, la disponibilité et les performances du GPS actuel [Xie W. et al, 2019].

I.3 Modes de positionnement

Au cours des dernières années, de nombreuses méthodes ont été proposées pour exploiter les systèmes GNSS, on les classe en deux grandes catégories :

I.3.1 Positionnement en mode absolu

Le positionnement absolu ou par point unique SPP (*Single Point Positioning*) est le mode de base des systèmes GNSS (Figure I.4). L'idée est de calculer la position et la vitesse du récepteur dans un repère global.

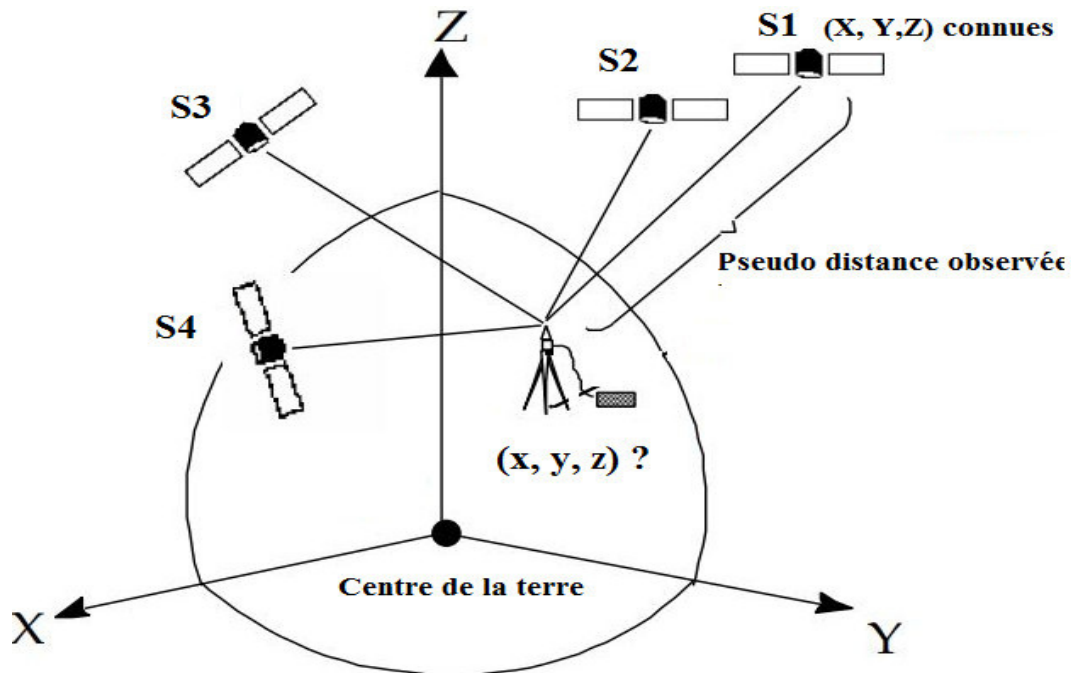


FIG. I.4. Positionnement absolu

On distingue alors deux méthodes pour obtenir la mesure de pseudo-distance :

- soit en exploitant la mesure de code (code C/A), qui permet un positionnement métrique et quasi-instantané.
- soit en exploitant la mesure de phase, l'utilisation de la mesure de phase permet une estimation plus précise de la position, elle nécessite cependant cinq mesures pour résoudre les ambiguïtés.

Dans le cadre de ce travail, l'amélioration de positionnement a été effectuée à partir de mesures de code C/A en considérant la fréquence L1 seulement.

I.3.2 Positionnement en mode différentiel

Un moyen efficace permettant de réduire l'effet des erreurs inhérentes au GNSS est le positionnement différentiel, dit aussi DGPS (*Differential GPS*), il s'appuie sur des stations de référence, dites stations de base. La figure I.5 fournit le schéma du principe différentiel.

Le principe consiste à recueillir simultanément des observations d'une station de référence dont les coordonnées sont connues [Delaporte T., 2009]. Les mesures de distance sont comparées aux distances théoriques calculées à partir des coordonnées connues de la station [Specht C. et al, 2019]. Ces différences de distance représentent les erreurs de mesure calculées pour chaque satellite. Par la suite, ces différences deviennent des termes correctifs (aussi appelés corrections différentielles) qui sont appliqués aux mesures de distance du récepteur, de ce fait les erreurs d'observations communes de la station de référence et du récepteur sont éliminées. Les erreurs sont d'autant plus identiques lorsque les deux récepteurs sont plus rapprochés.

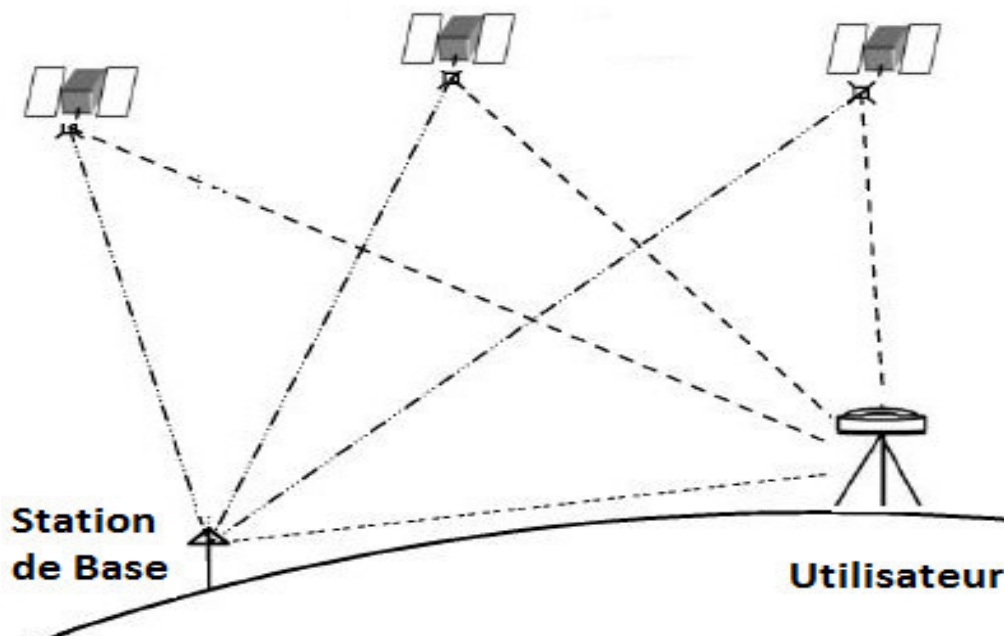


FIG. I.5. Principe du positionnement différentiel

La précision du positionnement différentiel avec des mesures de pseudo-distance en temps réel est métrique [Cui J. et al 2019]. Elle est fonction de la qualité des mesures de pseudo-distance, de la géométrie des satellites et de la distance entre les récepteurs qui peut facilement aller jusqu'à quelques centaines voire milliers de kilomètres.

Le principal problème réside dans la nécessité de maintenir une communication entre la station de base et le récepteur afin de transmettre les messages de correction. Les corrections ne sont valables que localement sur quelques centaines de kilomètres autour de la station fixe. Au-delà, il y a décorrélation entre les erreurs de la station fixe et de la station mobile. Il est possible d'améliorer la qualité des corrections par utilisation d'un réseau de stations de référence [Specht C. et al, 2019].

En général, le DGNSS constitué d'un réseau permet la diffusion de données différentielles pour améliorer la précision de la position, bien que l'intégrité ne soit pas assurée [Paparini C., 2013].

I.4 Systèmes de référence

Les systèmes de positionnement par satellites nécessitent deux types de systèmes de référence, un système terrestre dans lequel sont exprimées les coordonnées [Prasad R. and Ruggieri M., 2005], et un système temporel afin de pouvoir dater l'instant de réception du signal. Ceci correspond au fait qu'ils permettent de se positionner dans l'espace et dans le temps. Les systèmes de référence définis par le système GPS seront présentés en détail, ce système est utilisé dans le cadre de ce travail.

La représentation d'une position sur la terre nécessite trois axes, il y a donc trois inconnues de position à identifier. À ces trois inconnues, s'ajoute celle de la synchronisation connue sous le nom de biais d'horloge. La position du récepteur est donc représentée par quatre variables (X, Y, Z, t); donc chacune de ces variables doit avoir une référence sur la terre.

Le système de référence peut différer d'un système GNSS à un autre. Le système de référence terrestre du GPS est appelé WGS84 (*World Geodetic System 1984*). Ce système est associé à un ellipsoïde global GRS 80 (*Geodetic Reference System 1980*) et d'un système de coordonnées géocentriques ECEF (*Earth-Centered Earth-Fixed*).

Une position dans un tel système de référence peut être caractérisée, soit par des coordonnées tridimensionnelles (X, Y, Z) soit par des coordonnées sphériques ou ellipsoïdales en termes de latitude, longitude et altitude ellipsoïdique (φ, λ, h).

Les axes définissant le système ECEF sont fixes par rapport à une position terrestre. L'origine est le centre de masse de la terre; l'axe Z est la direction du pôle de référence; l'axe X est l'intersection de méridien de référence et le plan passant par l'origine et perpendiculaire à l'axe Z; l'axe Y complète le système de coordonnées orthogonales.

Le système de coordonnées local est centré sur une position à la surface de la terre. Les axes de ce système peuvent se définir par:

- l'axe Nord, situé à l'intersection entre le plan horizontal et le méridien local, dans la direction Nord (N) ;
- l'axe Est situé dans le plan horizontal et il est perpendiculaire à l'axe Nord, dans la direction Est(E)
- et l'axe Up est perpendiculaire aux axes N et E et pointe vers le zénith.

Remarquons que les axes N et E sont compris dans un plan tangent à la terre au point d'observation. On parle également de système NEU (North East Up).

La figure ci-après (FIG I.6) présente la superposition d'un système de coordonnées local (NEU) sur un système de coordonnées géocentriques (ECEF).

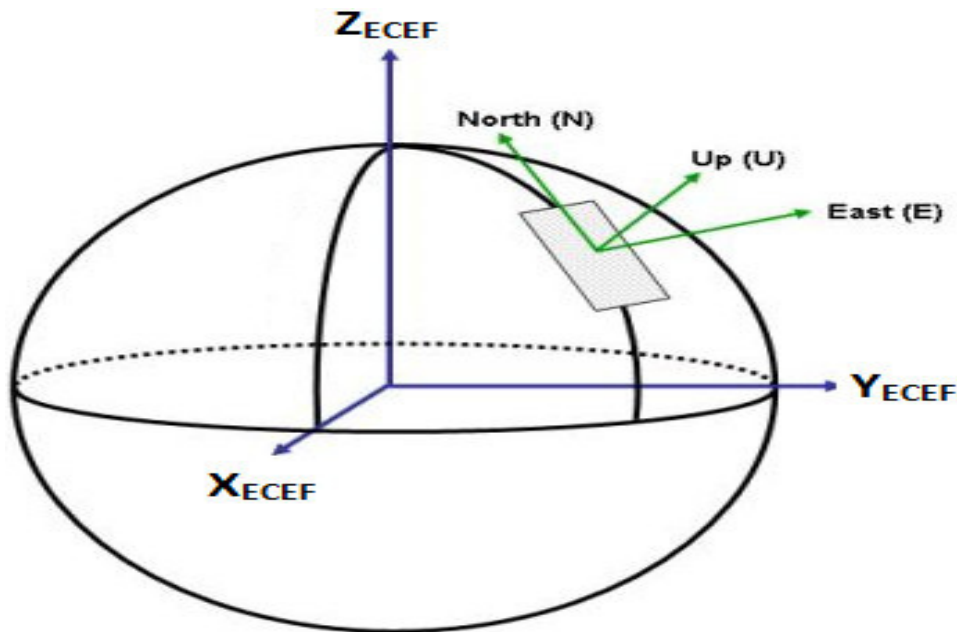


FIG. I.6. Coordonnées géocentriques et topocentriques

Les échelles de temps des GNSS sont définies par rapport au Temps Atomique International TAI (*International Atomic Time*), sauf GLONASS. Le temps du système GPS, commence le 6 janvier 1980 à 0 h Temps Universel Coordonné UTC (*Universal Time Coordinated*), tel que le temps du système GPS a une différence avec UTC de 19 secondes, $\text{TAI} - \text{GPS} = 19 \text{ s}$ [Leick A. et al, 2015]. Les utilisateurs GPS obtiennent cette différence à partir de l'un des paramètres dans le message de navigation GPS.

Le tableau I.2 qui suit résume les différentes références utilisées par les systèmes GNSS.

TAB. I.2. Références temporelles et géographiques des systèmes GNSS

Constellation	Référence géodésique	Référence temporelle
GPS	WGS-84	GPST
GLONASS	PZ-90	UTC(SU)
GALILEO	GTRF	GST
COMPASS	Beijing 1954	China UTC
SBAS	WGS-84	GPST

I.5 Equation d'observation du positionnement standard par GPS (SPP)

La mesure de pseudo-distance est une estimation de la distance satellite-récepteur déduite de la mesure du temps de propagation du signal entre le satellite et le récepteur. Ce temps est mesuré par l'intercorrélacion entre la réplique du code PRN (C/A ou P) généré par le récepteur et le code PRN transmis par le satellite, la figure I.7 illustre la détermination du temps de propagation.

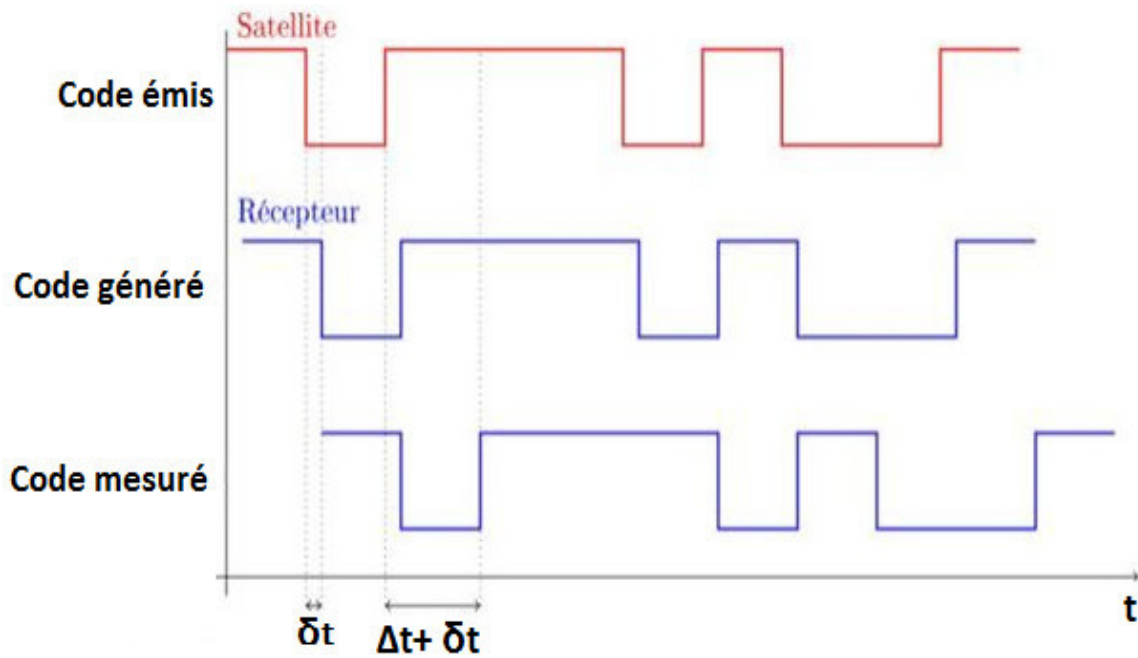


FIG.I.7. Mesure de code sur un signal GNSS

La mesure de pseudo-distance P entre le récepteur et le satellite à l'instant t est déduite du temps de propagation Δt multiplié par la vitesse de l'onde C [Prasad R. and Ruggieri M., 2005]:

$$P = c(t_r - t_e) \quad (I.2)$$

Le modèle mathématique de pseudo-distance s'écrit, de manière simplifiée, de la façon suivante [Kozuba J. et al, 2018] [Jafarnik H. et al, 2017]:

$$P = \rho + c(dt_r - dt_s) + Ion + Trop + Rel + RDCB_L + SDCB_L + \varepsilon \quad (I.3)$$

Où:

- P est la mesure du code C/A à la fréquence L1 pour le système GPS;
- ρ représente la distance géométrique entre la position du satellite au temps de transmission et la position du récepteur au temps de réception (m);

$$\rho = \sqrt{(x - X)^2 + (y - Y)^2 + (z - Z)^2} \quad (I.4)$$

Dans cette équation, les composantes (x, y, z) font référence à la position d'un satellite GPS sur l'orbite au temps de transmission du signal dans le système géocentrique ECEF (en mètre), tandis que (X, Y, Z) sont les coordonnées du récepteur au temps de réception dans le système géocentrique ECEF (en mètre).

- c : vitesse de la lumière dans le vide (m/s);

- dt_r : erreur d'horloge du récepteur (s);
- dt_s : erreur d'horloge du satellite (s);
- Ion : erreur de distance causée par la réfraction ionosphérique (m);
- $Trop$: erreur de distance causée par la réfraction troposphérique (m);
- Rel : correction relativiste
- $RDCB_L, SDCB_L$: erreur instrumentale du récepteur et du satellite pour l'observation de code L1-C/A (m);
- ε : bruit de mesure et multi trajets (m).

Les inconnues étant au nombre de quatre (X, Y, Z, t), pour déterminer la position à un instant t , le récepteur doit effectuer au moins quatre mesures de pseudo-distances simultanées sur quatre signaux GNSS provenant de quatre satellites différents [Das PP. and Nakamura. S, 2016].

Le calcul de la position consiste à résoudre un système de n équations, correspondant à n satellites observés, à quatre inconnues ($n \geq 4$). Les paramètres du modèle, tels que la position des satellites, la correction d'horloge satellite, la correction ionosphérique et l'erreur instrumentale du satellite, sont déterminés à l'aide de données de navigation à partir des éphémérides radiodiffusés. Les paramètres inconnus (x, y, z, t) de l'équation sont déterminés à l'aide de la méthode des moindres carrés ou du filtre de Kalman pour chaque époque [Jafernik H. et al, 2017].

La figure I.8 illustre le résultat du traitement des données au site d'Alger par le traitement de pseudo-distance. On peut remarquer que l'erreur de position, notamment sur la composante Up, varie de -6 à 9 mètres.

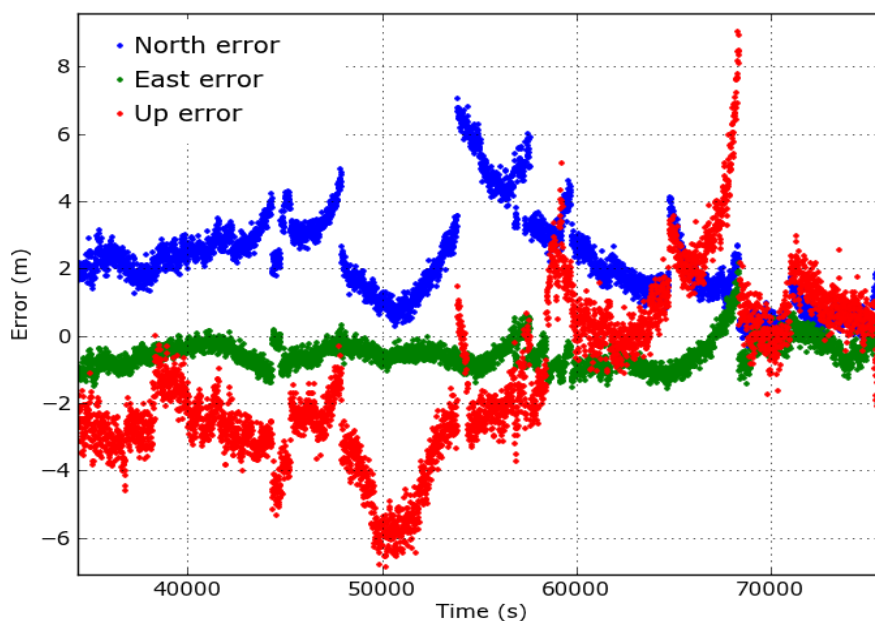


FIG.I.8. Erreur de position en appliquant uniquement la mesure de pseudo-distance

I.6 Erreurs affectant les mesures de pseudo-distance

La précision de positionnement est dépendante des erreurs que l'on commet sur la position du satellite, ainsi que des erreurs sur la mesure du temps entre les horloges embarquées et celles au sol. Lorsque le signal se propage entre le satellite et le récepteur il traverse un milieu atmosphérique qui n'est pas homogène. Lors de son passage dans les couches de l'ionosphère et de la troposphère, il subit des déformations qui affectent les mesures. Des obstacles proches du sol (bâtiments, relief, structure porteuse du récepteur, comme sur les avions ou les bateaux...) produisent également des déformations appelées trajets multiples [El-Rabbany A., 2002], ces erreurs sont illustrées à la figure I.9.

Un deuxième élément influençant la précision est la géométrie de la constellation, c'est à dire la distribution des satellites dans l'espace ou dilution géométrique de la précision GDOP (*Geometric Dilution of Precision*) [Das PP. and Nakamura S., 2016].

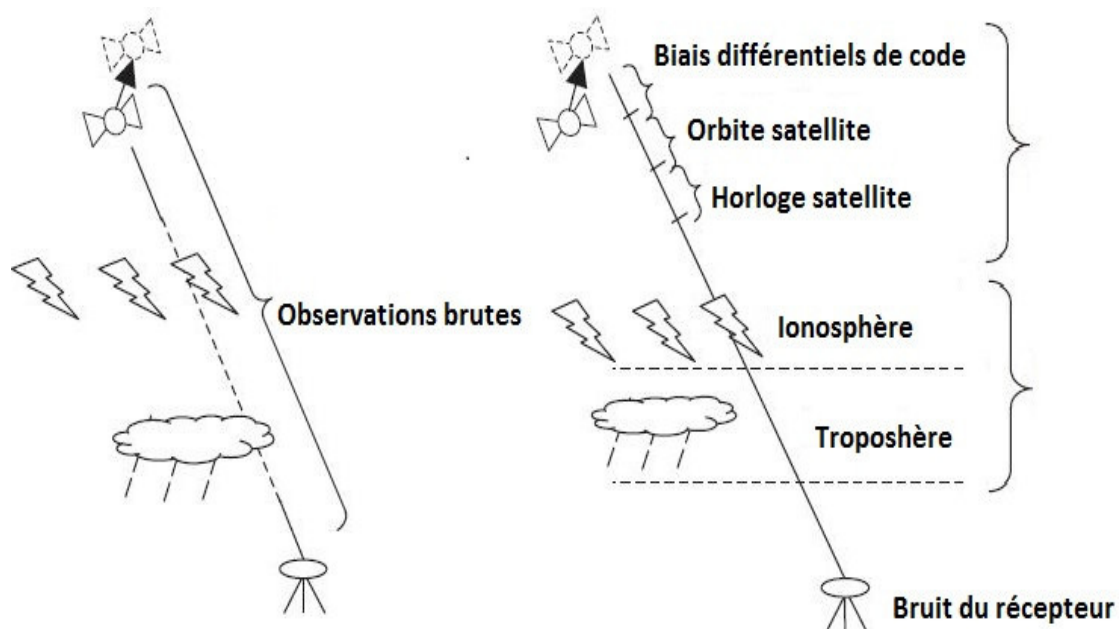


FIG.1.9. Principales sources d'erreurs impactant la précision du positionnement GNSS

I.6.1 Les erreurs d'éphémérides et horloge des satellites

Elle concerne l'incertitude sur la position du satellite sur son orbite (altitude, vitesse, etc.), elle est exprimée par la différence entre la position vraie du satellite et sa valeur calculée [Ma L. and Wang M., 2013]. Malgré que le biais d'horloge des satellites soit connu et modélisé par les stations sol, il reste un résidu d'erreur après que la correction du biais est effectuée, principalement due aux incertitudes sur le temps d'émission. L'impact des erreurs d'orbite et d'horloge satellite sur le positionnement temps réel est métrique.

I.6.2 Le récepteur

Une autre source perturbant le calcul des pseudo-distances est le récepteur GNSS lui-même. En effet, le bruit thermique induit une incertitude additionnelle sur la mesure, il est dû aux

différents composants électroniques qui constituent le récepteur. Le bruit du récepteur pouvant être réduit en améliorant ces composants. L'erreur d'horloge du récepteur est généralement estimée comme un paramètre inconnu avec les trois coordonnées. Sinon, l'erreur d'horloge du récepteur peut être éliminée si les observations entre les satellites sont différenciées (différence simple entre satellites).

I.6.3 Les multi trajets

Les signaux émis par les satellites peuvent être réfléchis par divers objets (bâtiments, voitures, sol, etc.) avant d'arriver au centre de phase de l'antenne réceptrice. Ainsi, cette dernière reçoit des signaux directs et des signaux réfléchis (appelés multi trajets), ce qui peut entraîner une erreur d'intervalle de plusieurs mètres ou plus.

L'erreur de multi trajets est estimée à 5 mètres en code C/A [Georges G., 2016]. Elle dépend, des conditions autour de l'antenne, du type d'antenne, et de l'élévation des satellites, les signaux les plus bas étant les plus sensibles aux trajets multiples.

I.6.4 L'ionosphère

L'ionosphère est une région de l'atmosphère située environ entre 60 km et 800 km d'altitude. L'ionosphère est une couche dispersive de l'atmosphère, elle est fortement ionisée sous l'action du rayonnement solaire. Les effets ionosphériques dépendent d'un grand nombre de variables reliées entre elles, notamment le cycle solaire (cycle de 11 ans), la période de l'année, l'heure, la situation géographique et l'activité géomagnétique.

L'erreur de l'ionosphère sur les signaux GPS est fonction du contenu électronique total TEC (*Total Electron Content*) mesuré sur le trajet satellite-récepteur, elle varie proportionnellement à l'inverse du carré de la fréquence. L'approximation de l'erreur ionosphérique du premier ordre pour la mesure de code est exprimée en mètres par [Bijjahalli S. et al, 2019] [Liua Z. et al, 2016]:

$$Ion = \frac{40.3}{f^2} \int N_e dl = \frac{40.3}{f^2} TEC \quad (I.5)$$

Où N_e est la densité d'électrons totaux (électrons /m³), f est la fréquence de l'onde (Hz), TEC est le nombre total d'électrons tout le long du trajet entre un satellite et un récepteur où le TEC est exprimé en el/m², (1 TECU = 10¹⁶ électrons /m²). Il est important de noter que l'ionosphère accélère la phase, mais ralentit le code, donc le signe de la correction à appliquer est différent pour chaque type d'observation.

L'erreur du premier ordre peut atteindre quelque dizaines de mètres et constitue de ce fait une source d'erreur importante en cas d'utilisation de récepteurs mono-fréquence [Sanz Subirana J. et al, 2013]. Afin de corriger une partie de cette erreur, un modèle d'ionosphère est transmis dans le message de navigation du système GPS; il s'agit du modèle mono-fréquence de Klobuchar pour la correction ionosphérique.

La prise en compte de ce modèle permet de réduire l'erreur du positionnement d'environ 50% [Kaplan E.D. and Hegarty C.J. 2006] [Hofmann-Wellenhof B. et al, 2008], l'ionosphère est modélisée par une couche ionisée infiniment mince située à 350 km d'altitude [Sanz Subirana J. et al, 2013], ce modèle est utilisé dans le cadre de ce travail.

Le modèle de Klobuchar est basé sur une fonction à 8 paramètres, calculé à partir d'observations du segment sol, puis envoyé aux satellites qui le retransmettent aux utilisateurs via le message de navigation, et généralement actualisé une fois par jour [Rovira-Garcia A. et al, 2015]. La procédure appliquée par le récepteur, en utilisant les paramètres α_i et β_i diffusés est la suivante [Benoît L., 2014] [Arbesser-Rastburg B., 2002], [Lesouple J., 2019]:

1. Calcul de l'amplitude et la période du délai ionosphérique zénithal à partir des coefficients α_i et β_i qui sont contenus dans l'en-tête des fichiers RINEX (*Receiver Independent Exchange*) de navigation. Ces coefficients correspondent aux champs ION ALPHA et ION BETA. L'amplitude A_{iono} en seconde et la période du délai ionosphérique P_{iono} en seconde sont alors données par :

$$A_{iono} = \sum_{n=0}^3 \alpha_n \varphi_{m,IPP}^n \quad (I.6)$$

$$P_{iono} = \sum_{n=0}^3 \beta_n \varphi_{m,IPP}^n \quad (I.7)$$

Tel que $\varphi_{m,IPP}$ est la latitude géomagnétique du point de percée ionosphérique IPP (*Ionospheric Pierce Point*), calculée par l'équation (I.8). L'IPP est le point d'intersection entre le signal satellite- station avec la couche ionosphérique.

$$\varphi_{m,IPP} = \varphi_{IPP} + 0.064 \times \cos(\lambda_{IPP} - 1.617) \quad (I.8)$$

Avec φ_{IPP} et λ_{IPP} présentent la latitude et la longitude de l'IPP respectivement.

Si $\varphi_{IPP} > 0.416$, alors $\varphi_{IPP} = 0.416$, et si $\varphi_{IPP} < -0.416$, alors $\varphi_{IPP} = -0.416$.

2. Calcul du temps local au point de percée de l'ionosphère IPP :

$$t_{IPP} = 43200 \times \lambda_{IPP} + t_{GPS} \quad (I.9)$$

Avec t_{IPP} , est le temps local à l'IPP et t_{GPS} l'instant (exprimé en temps GPS) pour lequel on calcule la correction. Si $t \geq 86400$, $t = t - 86400$; Si $t < 0$, $t = t + 86400$.

Les angles $\varphi_{m,IPP}$, φ_{IPP} et λ_{IPP} sont exprimés en demi-cercle (*1 demi-cercle = π rad*)

3. Calcul de la phase du délai ionosphérique ϕ_{iono} (sans unité)

$$\phi_{iono} = 2\pi \times \frac{t - 50400}{P_{iono}} \quad (I.10)$$

4. Calcul de coefficient d'inclinaison F (sans unité)

$$F = 1 + 16 \times (0.53 - E)^3 \quad (I.11)$$

Avec E est l'élévation du satellite

5. Calcul du délai ionosphérique I_{L1GPS} pour la pseudo-distance considérée

$$I_{L1GPS} = \begin{cases} -5.10^{-9} \times F \times c \text{ si } |\phi_{iono}| \geq 1.57 \\ -\left(5.10^{-9} + A_{iono} \times \left(1 - \frac{\phi_{iono}^2}{2} + \frac{\phi_{iono}^4}{24}\right)\right) \times c \times F \text{ si } |\phi_{iono}| < 1.57 \end{cases} \quad (I.12)$$

Avec $c = 2.997924580.10^8 \text{ ms}^{-1}$, la vitesse de la lumière dans le vide.

L'apport de correction ionosphérique par le modèle Klobuchar est montré dans le tableau I.3. Les valeurs sont obtenues pour la pseudo-distance sur 24 heures de données obtenues avec le récepteur géodésique Trimble NetR9 pour la journée 099 de l'année 2018 au site d'Alger.

TAB. I.3. Précision horizontale(HPE) et verticale (VPE) en fonction du modèle ionosphérique appliqué

	Avec Klobuchar	Sans Klobuchar
HPE(m)	3.63 m	4.07
VPE(m)	4.23 m	8.14

I.6.5 La troposphère

La troposphère est une couche atmosphérique en contact avec le sol qui s'étend jusqu'à une altitude de 70 km de la surface de la terre [Tetley L. and Calcutt D., 2001]. La variation de la vitesse de propagation des ondes à travers cette couche atmosphérique est due principalement à des effets résultant du changement de l'indice de réfraction de cette couche. Ce changement est fonction de l'altitude, de la température et de l'humidité. L'erreur troposphérique atteint environ 2.5 mètres au zénith et 25 mètres à 5° d'élévation [Benoît L., 2014].

La troposphère peut être divisée en deux composantes (sèche et humide) variant notamment en fonction des paramètres météorologiques (température, pression et humidité), de la position sur terre (latitude et altitude), de la saison et, pour la composante humide seulement, de la quantité de vapeur d'eau [El-Rabbany A., 2002]. Le délai troposphérique que subissent les signaux GPS, peut donc être exprimé en fonction de la réfractivité de ces deux composantes :

$$d_{trop} = 10^{-6} \int (N_d + N_w) ds \quad (I.13)$$

Où N_d et N_w sont la réfractivité des composantes sèche (*dry*) et humide (*wet*) respectivement, et ds représente un élément de distance le long de la trajectoire du signal [Jin S., 2012][Beldjilali B. and Benadda B., 2016].

Les délais troposphériques hydrostatiques et humides sont généralement modélisés au zénith, puis mis à l'échelle par une fonction de projection (*Mapping Function*) selon l'angle d'élévation du satellite.

Il existe plusieurs modèles pour corriger l'erreur troposphérique, dans le cadre de ce travail, le modèle UNB-3 est utilisé pour corriger cette erreur [Collins P. and Langley R. B., 1999], ce modèle est aussi utilisé par les systèmes d'augmentation de la précision SBAS [Sanz Subirana J. et al, 2013]. Le modèle UNB3, basé sur l'état de l'atmosphère sans informations météorologiques fournies en temps réel, à partir d'une table de référence. Toutes les informations météorologiques nécessaires sont calculées selon l'altitude, la latitude et le jour de l'année [Orliac E., 2002].

L'apport de la correction troposphérique est montré dans le tableau I.4. Les valeurs sont obtenues pour la pseudo-distance sur 24 heures de données obtenues avec le récepteur géodésique Trimble NetR9 pour la journée 099 de l'année 2018 au site d'Alger.

TAB.I.4. Précisions horizontale (HPE) et verticale (VPE) en fonction du modèle troposphérique appliqué

	Avec correction troposphérique	Sans correction troposphérique
HPE(m)	3.63 m	3.71
VPE(m)	4.23 m	12.17

I.6.6 Le biais différentiels de code(DCB)

Le biais différentiels de code DCB (*Differential Code Bias*) est induit par l'électronique du satellite entre la génération du signal et son émission [gAGE, 2017(a)]. Ce délai existe aussi bien pour les satellites que pour le récepteur [Asgari J., 2005]. Ce biais se confond souvent avec d'autres paramètres estimés et ne peut être quantifié adéquatement de manière absolue. Les utilisateurs d'une seule fréquence doivent corriger les valeurs de DCB en utilisant des paramètres transmis dans le message de navigation [Sanz Subirana J. et al, 2013].

Pratiquement, les biais entre les codes P1-P2 (DCB_{P2-P1}) et C/A-P1 ($DCB_{C/A-P1}$) sont modélisés et estimés quotidiennement par l'IGS (*International GNSS Service*) lors de la détermination de la grille ionosphérique et des horloges des satellites [Banville S., 2007]. Ce biais est de l'ordre de 10 ns, qui correspond à une erreur de 3 mètres sur la mesure du temps de

propagation [Jin S.G. et al 2016]. Les DCB sont uniques pour chaque satellite et leur changement est faible au cours du temps [Asgari J., 2005].

Pour étudier l'influence du DCB sur le GPS, les données collectées pendant quatre jours du mois d'avril 2018 sur le site d'Alger, ont été traitées et analysées avec et sans corriger le DCB, et en utilisant uniquement la mesure de pseudo-distance ; les résultats sont présentés par le tableau I.5.

TAB.I.5. Erreur horizontale et verticale (95%) du site d'Alger avec et sans corriger le DCB

DOY	Avec DCB		Sans DCB	
	HPE(m)	VPE(m)	HPE(m)	VPE(m)
097 (07/04/2018)	3.88	6.43	5.22	9.93
098 (08/04/2018)	2.09	6.20	4.25	9.69
099 (09/04/2018)	3.65	5.02	4.95	8.56
100 (10/04/2018)	2.25	5.33	4.19	8.05

L'erreur de positionnement du GPS mono-fréquence varie de 4.19 à 5.22 mètres en horizontal et de 8.05 à 9.93 mètres en vertical sans corriger les biais de code différentiel (DCB), tandis que cette erreur varie de 2.09 à 3,88 mètres en horizontal et de 5.02 à 6,43 mètres en vertical quand le DCB est corrigé. Les résultats indiquent que le fait d'ignorer le DCB fournit une mauvaise précision du positionnement [Ge Y. et al, 2017]. Pour mieux voir l'amélioration de précision du GPS avec et sans corriger le DCB, les erreurs de positionnement horizontale (EN) et verticale (Up) sont présentées dans la même figure (FIG. I.10).

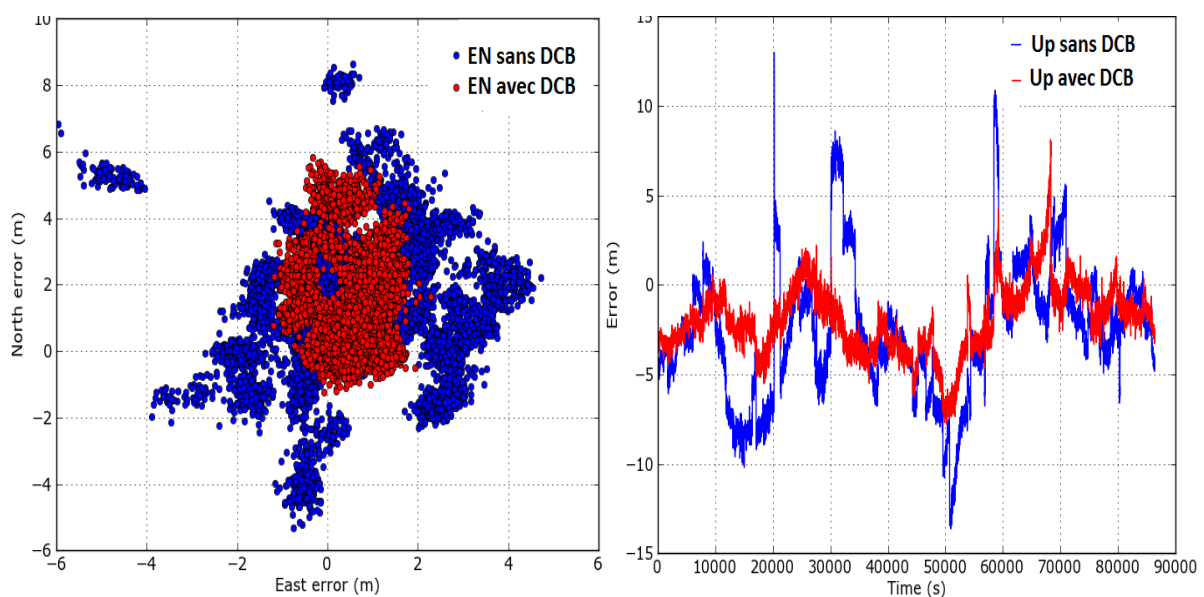


FIG.I.10. Erreurs horizontale et verticale du site d'Alger avec et sans corriger le DCB le 9 avril 2018

I.6.7 La géométrie des satellites (GDOP)

La précision du positionnement en utilisant le code dépend de la précision avec laquelle il peut effectuer la mesure de pseudo-distance et de la géométrie des satellites, pour quantifier l'influence de cette géométrie sur la précision, on utilise généralement le GDOP (*Geometric Dilution of Precision*), qui est utilisé pour exprimer la qualité mathématique du positionnement. Si les satellites visibles sont très proches l'un de l'autre dans l'espace, la précision sera moins bonne que s'ils étaient bien répartis dans le ciel au-dessus de l'utilisateur. Le DOP est calculé à partir de la matrice de covariance de la position donnée dans un repère ENU (*East North Up*) [Lesouple J., 2019]. Plus le DOP est petit, plus la précision est meilleure. Concernant le DOP, il convient de distinguer plusieurs types de DOP qui sont; le GDOP, le VDOP (*DOP vertical*), le HDOP (*DOP horizontal*) et le TDOP (*DOP temporel*). Dans le cas d'un positionnement 3D, le GDOP ou le PDOP sont généralement employés [El-Rabbany A., 2002]:

$$GDOP = \sqrt{\sigma_E^2 + \sigma_N^2 + \sigma_{Up}^2 + \sigma_t^2} \quad (I.14)$$

$$PDOP = \sqrt{\sigma_E^2 + \sigma_N^2 + \sigma_{Up}^2} \quad (I.15)$$

$$HDOP = \sqrt{\sigma_E^2 + \sigma_N^2} \quad (I.16)$$

$$VDOP = \sigma_{Up} \quad (I.17)$$

Où ($\sigma_E^2, \sigma_N^2, \sigma_{Up}^2$) sont les variances sur la position dans le repère ENU et σ_t^2 la variance sur l'inconnue de temps. La figure I.11 représente l'évolution du DOP pour le site d'Alger durant 24 heures d'observation. On remarque que les valeurs du DOP ne sont pas élevées, excepté le GDOP; ceci est dû à la réduction du nombre de satellites.

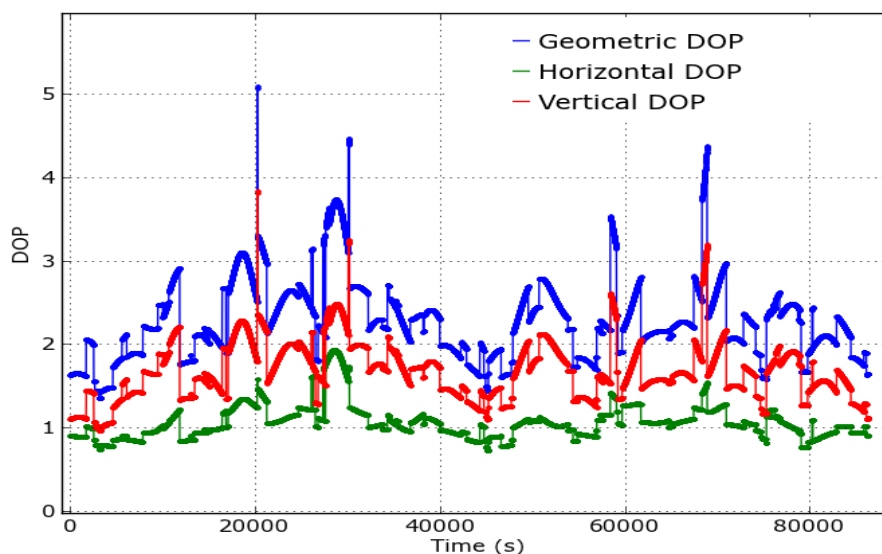


FIG.I.11. Valeurs des dilutions de précision (DOP) calculées pour le site d'Alger le 9 Avril 2018 (DoY 099)

La figure I.11 illustre les différentes dilutions de la précision (DOP) calculées pour une durée d'observations de 24 heures. Le DOP géométrique atteint comme valeur maximale 5, tandis le DOP vertical est inférieure à 4. Les valeurs du HDOP varient entre 1 et 2 et sont généralement stables.

I.7 Performances et limitations des GNSS

Les systèmes GNSS actuels sont des systèmes propriétaires et leurs exploitants ne donnent aucune garantie pour une disponibilité permanente. En effet, le message de navigation prend en compte les anomalies détectées par le segment sol liées au système telles que les erreurs d'horloges satellite, dérive d'une horloge, diffusion de données erronées, etc. Mais il peut cependant se passer plusieurs heures avant que le segment sol ne détecte la défaillance de ces informations diffusées en temps réel; en raison de l'architecture du système, en particulier du nombre limité de stations sol de télécommande du GPS. Ces erreurs peuvent impacter la mesure de pseudo-distance et peuvent être biaisées de quelques mètres à plusieurs kilomètres pendant plusieurs heures, donc le système GPS ne permet pas de garantir la position pour certaines applications, comme le transport aérien. En particulier, le positionnement vertical qui constitue la principale limitation pour l'aviation civile.

Les performances du positionnement par satellites se caractérisent sous plusieurs points par la phrase suivante : « *La probabilité d'obtenir une position précise à un endroit donné sur une période de temps avec certitude* ». Ces performances sont exprimées selon quatre critères : précision, intégrité, continuité et disponibilité [ESA, 2011].

- La précision correspond à l'écart entre la valeur mesurée et la valeur réelle de position, de vitesse ou du temps.
- L'intégrité renvoi à la notion de confiance que l'utilisateur peut avoir dans le calcul de la position; elle comprend la capacité d'un système à fournir des seuils de confiance ainsi que des alertes en cas d'anomalies [Jin S., 2012]. L'intégrité d'un système de positionnement est définie par trois variables : le risque d'intégrité, les seuils d'alarme et le temps d'alarme. Le concept d'intégrité sera détaillé au chapitre III.
- La continuité définit la capacité d'un système à accomplir sa fonction sans interruption pendant l'opération prévue par l'utilisateur (par exemple phase d'atterrissage d'un avion). La continuité est la probabilité pour qu'à partir du moment où les critères de précision et d'intégrité sont remplis au début d'une opération, ils le restent pendant toute la durée de l'opération.
- La disponibilité est le pourcentage du temps où, sur une certaine zone géographique, les critères de précision, d'intégrité et de continuité sont remplis.

I.8 Navigation par satellite pour l'aviation civile

Cette section présente la navigation par satellite appliquée à l'aviation civile. L'Organisation de l'Aviation Civile Internationale OACI ou ICAO en anglais (*International Civil Aviation*

Organization) a défini les normes que les systèmes de navigation doivent respecter pour les différentes phases de vol. Les exigences de performance associées à ces différentes phases, et notamment à celles correspondant à l'atterrissage d'un avion, sont très élevées. Un des objectifs de l'OACI est de promouvoir le concept de navigation par satellite unifié GNSS pour satisfaire aux exigences de l'ensemble de ces phases de vol [Speidel J. et al, 2013]. L'OACI a défini différents types de procédures ayant des exigences opérationnelles différentes dont une classification hiérarchique est donnée par la figure I.12.

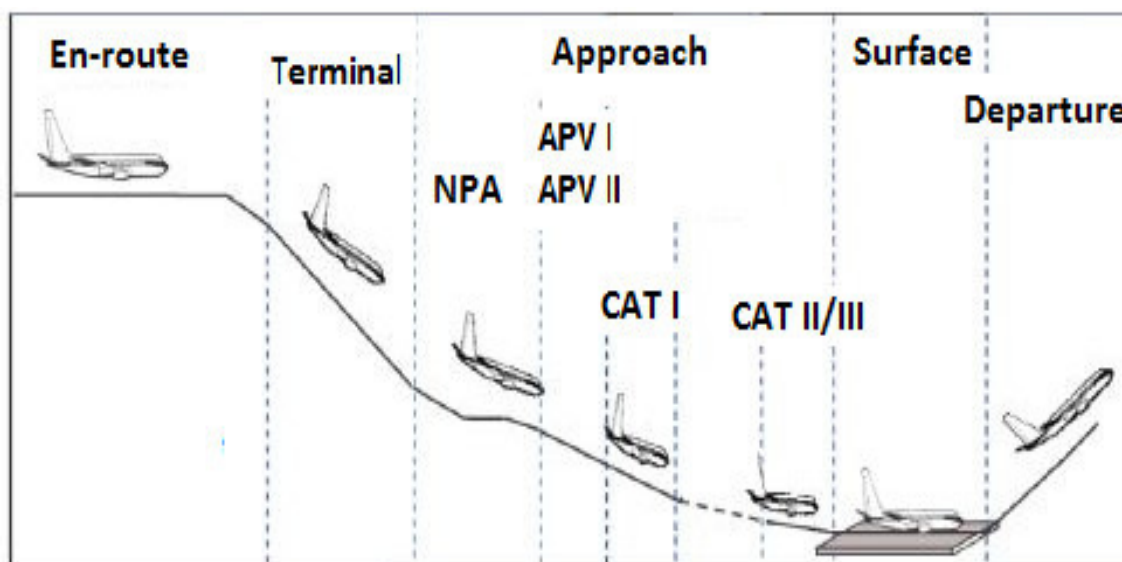


FIG.I.12. Différentes phases de vol

Ces procédures sont regroupées sous trois grandes catégories, approche classiques NPA (*Non-Precision Approach*), approche avec guidage vertical APV (*APproach with Vertical guidance*) et approche de précision PA (*Precision Approach*). Ci-dessous, sont listés les types d'opérations par ordre croissant d'exigences [Ciollaro M., 2008]:

- En-route : type d'opération au-dessus de l'océan généralement caractérisé par une densité du trafic aérien faible;
- Terminal : type d'opération avec changement d'altitude caractérisé par une densité du trafic aérien modérée ou élevée;
- Approche de non-précision NPA : type d'opération correspondant au début de l'approche pour l'atterrissage et nécessitant une précision plus grande que pour les deux types d'opération précédents. Elle fournit l'atterrissage à l'avion avec des informations de position horizontale (approches en deux dimensions). Aussi appelé Navigation latérale;
- Approches avec guidage vertical APV, subdivisé en deux phases (APV I et APV II) correspondant à l'atterrissage de l'avion et imposant des contraintes de précision et de fiabilité fortes. L'APV II diffère de l'APV I en termes de précision verticale.

Un nouveau concept de procédure d'approche, dénommé LPV 200 (*Localiser Performance with Vertical guidance at 200 feet*), a été proposé. Le principe de ce concept est de fournir

un guidage vertical à partir de 200 pieds (60 mètres) au-dessus de la piste d'atterrissage jusqu'à l'atterrissage complet. LPV 200 est un type d'opération qui inclut l'APV I et l'APV II. Ses exigences opérationnelles sont un mélange de celles d'APV I et d'APV II [Speidel J. et al, 2013];

- CAT pour catégorie (CAT I, CAT II, CAT III) : type d'opération appartenant à la phase approche de précision dont les performances requises sont les plus exigeantes. Actuellement pour faire de la catégorie II et III, on ne passe pas par les satellites, mais par des moyens au sol.

Les exigences opérationnelles spécifient les performances que les systèmes de navigation GNSS doivent fournir pour être utilisés pour un type d'opération spécifique. Chaque type d'opération possède des contraintes sur la précision, la fiabilité, la disponibilité et la continuité du système plus ou moins importantes. En effet, les types d'opération correspondant à l'atterrissage sont par exemple plus contraignants que ceux où l'avion est à haute altitude. Le tableau I.6 présente les exigences opérationnelles définies par l'OACI notamment les différents critères de performance pour chaque phase de vol [Jan S., 2003] [Prasad R. and Ruggieri M., 2005].

TAB.I.6. Exigences opérationnelles pour l'aviation civile

Type d'opération	Précision (H, V)	Intégrité			Disponibilité	Continuité
		Temps d'alerte	HAL, VAL	Risque d'intégrité		
En-route	3,7 Km, n/a	5 min	de 7,4 km à 3,7 Km, n/a	$10^{-7}/h$	De 0,99 à 0,99999	De $1 \times 10^{-4}/h$ à $1 \times 10^{-8}/h$
En-route, terminal	0,74 Km, n/a	15 s	1,85 Km, n/a	$10^{-7}/h$	De 0,99 à 0,99999	De $1 \times 10^{-4}/h$ à $1 \times 10^{-8}/h$
NPA	220 m, n/a	10 s	556 m, n/a	$10^{-7}/h$	De 0,99 à 0,99999	De $1 \times 10^{-4}/h$ à $1 \times 10^{-8}/h$
APV I	16 m, 20 m	10 s	40 m, 50 m	$1,2 \times 10^{-7}/\text{approche}$	De 0,99 à 0,99999	$1,8 \times 10^{-6}/15 \text{ s}$
LPV 200	16 m, 4 m	6 s	40 m, 35 m	$1,2 \times 10^{-7}/\text{approche}$	De 0,99 à 0,99999	$1,8 \times 10^{-6}/15 \text{ s}$
APV II	16 m, 8 m	6 s	40 m, 20 m	$1,2 \times 10^{-7}/\text{approche}$	De 0,99 à 0,99999	$1,8 \times 10^{-6}/15 \text{ s}$
CAT I	16 m, de 4 m à 6 m	6 s	40 m, de 10 m à 15 m	$1,2 \times 10^{-7}/\text{approche}$	De 0,99 à 0,99999	$1,8 \times 10^{-6}/15 \text{ s}$
CAT II, CAT IIIa	6.9 m, 2.0 m	1 s	17.3 m, 5.3 m	$1-1 \times 10^{-9}/15 \text{ s}$	De 0,99 à 0,99999	$1,4 \times 10^{-6}/15 \text{ s}$
CAT IIIb	6.2 m, 2.0 m	1 s	15.5 m, 5.3 m	$1,1 \times 10^{-9}/30 \text{ s (Lateral)}$ $1,1 \times 10^{-9}/15 \text{ s (vertical)}$	De 0,99 à 0,99999	$1,2 \times 10^{-6}/30 \text{ s (Lateral)}$ $1,2 \times 10^{-6}/15 \text{ s (vertical)}$

Les objectifs de l'aviation civile à long terme sont de baser toute la navigation sur l'utilisation des satellites, et de supprimer tous les moyens au sol. Les systèmes GNSS ne peuvent remplir les objectifs sécuritaires de l'aviation civile en termes d'intégrité, de disponibilité et de continuité bien que leur précision soit suffisante pour la navigation en-route, en terminal et pour des approches non précises. Pour pallier à ces insuffisances, des systèmes d'augmentation sont mis en œuvre.

I.9 Conclusion

La grande disponibilité et les bonnes performances des systèmes GNSS ont poussé les utilisateurs à utiliser ces systèmes de positionnement pour de nombreuses applications nécessitant des performances de très haut niveau en termes de précision et de fiabilité. On peut citer les procédures d'approche dans l'aviation civile, les systèmes de commande automatique des trains, les applications géodésiques, les manœuvres portuaires pour les navires de transport de marchandises etc... .

Pour répondre à la demande de ces utilisateurs, il a été nécessaire de mettre en œuvre des systèmes complémentaires aux systèmes GNSS qui permettraient de palier certaines insuffisances ou d'en améliorer les performances tout en permettant de continuer à bénéficier de l'avancée technologique et opérationnelle qu'apportent ces systèmes. L'objet du chapitre suivant est porté sur la description des systèmes d'augmentation, avec une étude détaillée du système EGNOS qui sera utilisé dans le cadre de ce travail.

Chapitre II

Systèmes d'augmentation spatiale & présentation du système EGNOS

II.1.Introduction	30
II.2.Systèmes d'augmentations terrestres.....	30
II.2.1.Les systèmes de renforcement GNSS par station sol (GBAS)	30
II.2.2.Les systèmes embarqués de renforcement GNSS (ABAS).....	31
II.3.Systèmes d'augmentations spatiales (SBAS).....	31
II.3.1.Le système d'augmentation Américain (WAAS).....	34
II.3.2.Le système Russe (SDCM).....	35
II.3.3.Le système Japonais (MSAS).....	35
II.3.4. Le système Indien (GAGAN).....	35
II.3.5.Le système Européen (EGNOS).....	35
II.3.5.1.Description du système EGNOS.....	36
II.3.5.2.Services proposés par EGNOS.....	38
II.3.5.2.1.Service ouvert	38
II.3.5.2.2. Service de sécurité de la vie	39
II.3.5.2.3.Service de distribution de données commerciales	39
II.4.Présentation des signaux SBAS.....	40
II.4.1.SBAS L1.....	40
II.4.2.SBAS L5.....	41
II.5.Messages transmis par SBAS.....	42
II.5.1.Transmission de données (IOD)	43
II.5.2.Périodes de rafraîchissement et de validité.....	44
II.5.3.Masque PRN.....	45
II.5.4.Masque IGP.....	46
II.6.Conclusion.....	49

II.1 Introduction

La précision du positionnement absolu par le système GPS en temps réel a beaucoup été améliorée au cours des dernières années, notamment grâce aux progrès sur les modèles de correction d'erreurs de pseudo-distance; de plus des applications nécessitant une précision métrique ont vu le jour. Concernant l'intégrité, les systèmes globaux de navigation GNSS ne permettent pas, seuls, de garantir les niveaux d'intégrité requis pour certaines applications nécessitant des performances de très haut niveau en termes de précision et de fiabilité. Ainsi, trois types d'applications nécessitent l'intégrité : les applications critiques de transport (mettant en jeu la vie des personnes), les applications commerciales, et les applications juridiquement sensibles. Pour pallier à ces limitations, des systèmes complémentaires ont été conçus pour permettre d'améliorer les performances et surtout d'assurer l'intégrité.

Ces systèmes complémentaires, appelés systèmes d'augmentations, sont constitués soit d'infrastructures terrestres, qui est une augmentation locale proche du DGPS, soit aériennes, avec des systèmes de contrôle intégrés dans les récepteurs ABAS (*Aircraft Based Augmentation System*), soit d'infrastructures spatiales par recouvrement géostationnaire SBAS (*Satellite-Based Augmentation System*). Le SBAS consiste à utiliser en complément au GPS des satellites géostationnaires qui diffusent en temps réel sur tout un continent une information d'intégrité sur la constellation ainsi que des corrections sur les signaux GPS permettant d'améliorer la précision. Dans ce chapitre, une brève description des systèmes d'augmentation ainsi qu'une présentation détaillée du système EGNOS, avec les messages et les corrections transmises.

II.2 Les systèmes d'augmentations terrestres

II.2.1 Les systèmes de renforcement GNSS par station sol (GBAS)

Le GBAS (*Ground Based Augmentation System*) est un système d'augmentation locale du GNSS standardisé par l'Organisation de l'Aviation Civile Internationale (OACI) pour des opérations d'approche de précision et d'atterrissage, avec un haut niveau d'intégrité. Son principe est proche de celui du GPS Différentiel (DGPS). Le GBAS est conçu pour répondre aux problématiques des opérations les plus contraignantes (approche de précision tout temps). Pour réaliser des opérations de type "approche" de précision de catégorie I, il est nécessaire de pouvoir éliminer un certain nombre d'erreurs de mesure des signaux transmis par les satellites GNSS, en particulier les erreurs de position et d'horloge des satellites ainsi que les erreurs dues à la propagation dans l'ionosphère. Le GBAS est composé des éléments suivants (FIG II.1):

- De deux à quatre récepteurs GNSS de référence;
- Un émetteur de diffusion de données dans la bande de fréquences VHF (*Very High Frequency*);
- Un système de surveillance;
- Une station de traitement au sol.

Le système sol surveille la qualité des informations transmises au système bord en réalisant de nombreux tests sur les corrections différentielles. Le GBAS diffuse des corrections de pseudo-distance qui tiennent compte de toutes les sources d'erreur, ainsi que des informations d'intégrité [OACI, 2012].

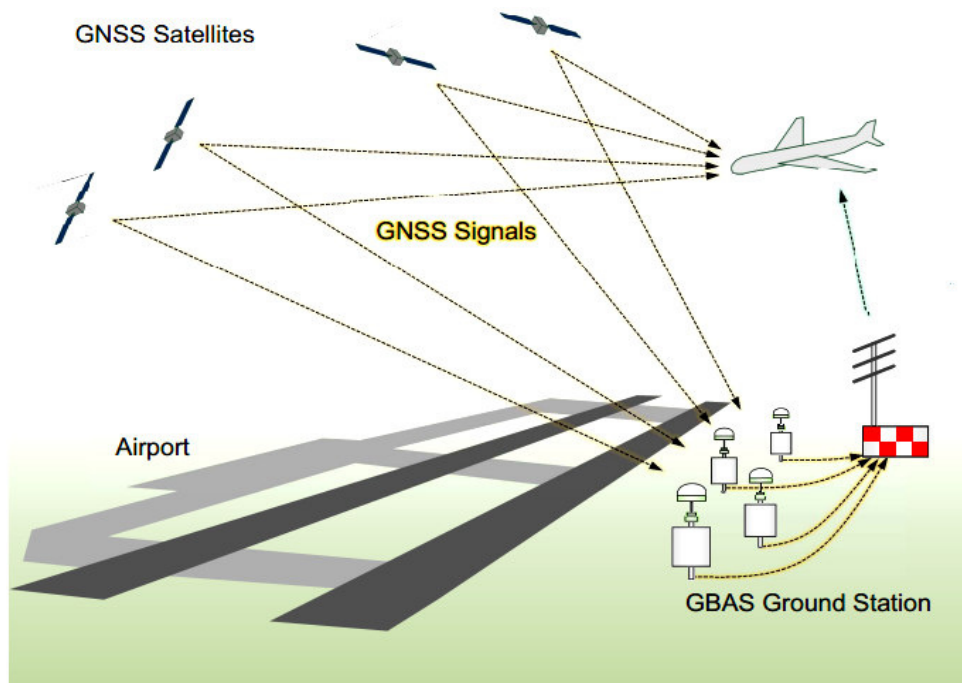


FIG.II.1. Architecture du GBAS

Pour une station GBAS, la couverture est d'environ une trentaine de km, donc typiquement une zone d'approche associée à un aéroport, et une seule station GBAS peut fournir des approches à toutes les pistes de cet aéroport [Roturier B., 2004].

II.2.2 Les systèmes embarqués de renforcement GNSS (ABAS)

Le système de renforcement embarqué ABAS (*Aircraft-Based Augmentation System*) est le système de contrôle autonome de l'intégrité situé dans l'avion qui centralise les données GNSS [OACI, 2012]. En tirant profit de la redondance d'informations à bord de l'avion, l'ABAS comprend des augmentations algorithmiques qui permettent de contrôler l'intégrité du système de navigation. Lorsque le contrôle d'intégrité est associé à un algorithme d'estimation de position qui utilise uniquement les données satellitaires sans outil de navigation externe, on parle de RAIM (*Receiver Autonomous Integrity Monitoring*) [Prasad R. and Ruggieri M., 2005]. En revanche, lorsque l'algorithme d'estimation couple les pseudo-distances GNSS avec un outil de navigation extérieure, comme un système de navigation inertielle par exemple, on parle de contexte AAIM (*Aircraft Autonomous Integrity Monitoring*) [ESA, 2011].

II.3 Systèmes d'augmentations spatiales (SBAS)

Les systèmes complémentaires par satellite SBAS (*Satellite Based Augmentation Systems*) constituent l'une des évolutions les plus récentes dans le positionnement par satellite. S'ils

sont analogues aux systèmes GPS différentiels dans leur conception [Krasuski K., 2017], où l'utilisateur reçoit les corrections directement d'un émetteur basé sur satellite géostationnaire, ces systèmes permettent donc de réaliser un positionnement différentiel sans station de base qui nécessite un moyen de communication et avec une meilleure précision. Les systèmes SBAS offrent un niveau de performance plus élevé, et permettent une couverture importante. Ils améliorent non seulement la précision de la position déterminée à partir de signaux GPS, mais aussi l'intégrité de cette position, qui quantifie la confiance dans les coordonnées d'une position.

Pour ce faire, ils surveillent en permanence les satellites GPS à partir de stations de référence au sol et émettent un message complémentaire via des satellites géostationnaires (GEO) sur la même fréquence que le signal L1 du système GPS [ICAO, OACI, NCAO, 2016], mais diffère en termes de format et de débit. La figure II.2 décrit de façon schématique le fonctionnement du système complémentaire SBAS.

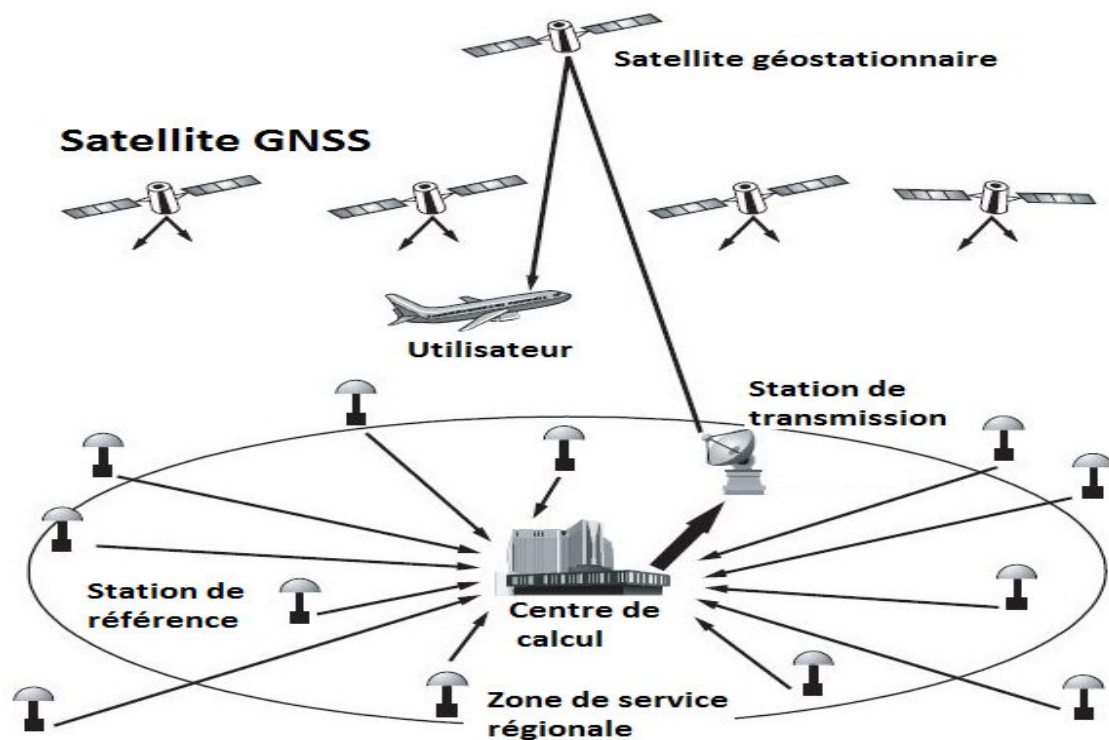


FIG.II.2. Architecture générale simplifiée d'un système SBAS

Chaque station de référence poursuit en continu les satellites GPS; elle est composée de deux ou trois récepteurs. Ces récepteurs recueillent les données d'observation de satellites GPS indépendants, qu'elles transmettent à chaque station principale de traitement [Jeffrey C., 2010], qui contrôle ces données avant de les transmettre aux stations de transmission.

Chaque station de traitement effectue les fonctions suivantes, détermination de l'orbite des satellites, détermination et surveillance de l'intégrité du système, calcul des corrections applicables aux satellites et aux points de grille ionosphérique IGP (*Ionospheric Grid Point*) qui sont prédéfinis dans chaque système SBAS [Fonseca A. et al, 2006], vérification,

validation et création du message SBAS. Ce traitement est effectué sur toutes les données disponibles et aboutit à l'émission de messages vers les satellites géostationnaires via des stations de transmission.

Plusieurs nations ont mis en place leur propre système SBAS. Ainsi, les Américains dont le SBAS couvre la zone Etats-Unis continentale CONUS (*Continental US*), ont mis en place le programme WAAS (*Wide Area Augmentation System*). Les Européens et les Japonais ont fait de même avec EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay Service*) qui couvre l'Europe, et MSAS (*Multi-functional Satellite Augmentation System*) qui couvre le Japon. Le système Russe de correction et de surveillance différentielles SDCM (*System for Differential Corrections and Monitoring*) est quant à lui basé sur le système GLONASS, et enfin l'Inde, avec le GAGAN (*GPS and GEO Augmented Navigation*) couvrant l'Inde [Li L. et al, 2016].

En dehors de l'aviation civile, les systèmes SBAS sont utilisés dans toutes les applications nécessitant une précision métrique en temps réel. Les zones couvertes par les divers systèmes d'augmentation sont représentées sur la figure II.3.



FIG.II.3. Couverture des systèmes SBAS

Chaque satellite SBAS émet des signaux complémentaires sur une fréquence porteuse. Ces signaux incluent des informations sur l'intégrité et des corrections différentielles [Sakai T. et al, 2006].

Les informations d'intégrité permettent au récepteur d'évaluer en permanence le degré de précision et la confiance avec laquelle il peut utiliser les informations de positionnement obtenues avec les satellites GPS. Le cas échéant, ces messages contiennent des alarmes permettant aux récepteurs d'exclure un satellite identifié comme défectueux. Si l'apport de cette garantie d'intégrité est une valeur ajoutée primordiale pour les applications critiques,

l'intérêt du SBAS pour les récepteurs GPS grand public réside davantage dans les corrections qui sont fournies par ces systèmes, qui améliorent la précision uniquement.

Les systèmes SBAS permettent de fournir une correction distincte pour chaque source d'erreur plutôt que pour l'effet total sur la mesure, à savoir l'orbite, l'horloge du satellite et le retard ionosphérique; afin que ces corrections puissent être appliquées sur une large zone [Penna N. et al, 2001]. Ceci permet de gérer plus efficacement les problèmes de décorrélation spatiale, résultant à une performance plus stable du système, peu importe l'emplacement géographique par rapport aux stations de référence. Ces corrections, obtenues grâce aux mesures effectuées depuis un vaste réseau de stations de réception au sol, s'appliquent individuellement aux satellites GPS; elles améliorent la précision du service fourni par le GPS.

II.3.1 Le système d'augmentation Américain (WAAS)

Le système WAAS (*Wide Area Augmentation System*) est un système d'augmentation du GPS, dont la couverture s'étend sur toute l'Amérique du nord (après absorption du canadien CWAAS) et Hawaï [Capderou M., 2012]. La FAA (*Federal Aviation Administration*) et le DOT (*Department of Transport*) ont mis ce programme afin de permettre d'utiliser le GPS à bord des avions pour réaliser des approches de précision. Le WAAS repose sur l'infrastructure suivante :

- Un réseau de trente huit stations de réception WRS (*Wide Area Reference Station*), réparties sur le territoire Nord-Américain.
- Trois centres de contrôle et de calcul WMS (*Wide Area Master Station*), situés sur les côtes Est et Ouest des Etats Unis et du Canada.
- Stations de communication avec les satellites WAAS GUS (*Ground Uplink Station*).
- Quatre satellites géostationnaires, qui embarquent un équipement de transmission des signaux WAAS émis par les GUS: Inmarsat POR, AOR-W, Telesat Anik F1R et Panamsat Galaxy 15.

L'architecture et le fonctionnement de ce système sont donnés par la figure II.4.

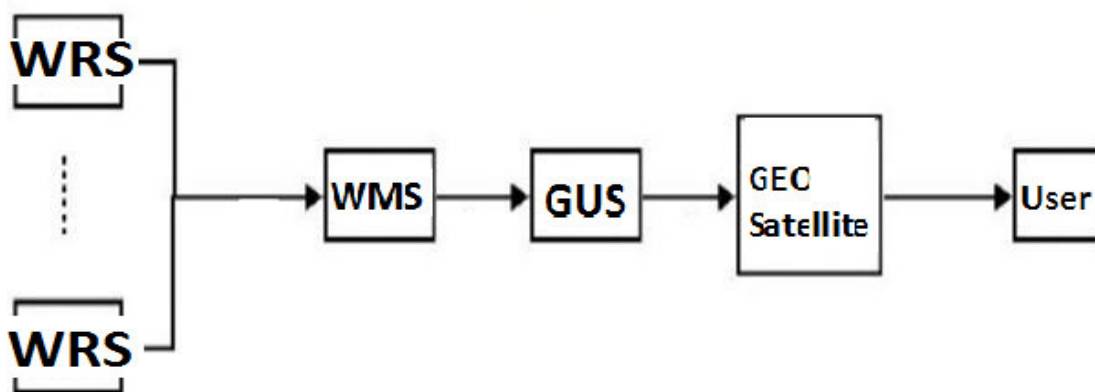


FIG.II.4. Architecture et fonctionnement du système WAAS

II.3.2 Le système Russe (SDCM)

La Russie a mise en place un système d'augmentation de GPS basé sur GLONASS sur la Russie, appelé SDCM (*System of Differential Correction and Monitoring*) [ICAO, 2019]. Il s'appuie sur 9 stations de suivi MP (*Monitoring Points*), un centre de contrôle CGM (*Center of Global Monitoring*) situé à Moscou, une station de transmission.

Son premier satellite géostationnaire a été lancé en décembre 2011, et placé à 16° de longitude. Trois satellites géostationnaires Luch-5A, Luch-5B, et Luch-5V sont utilisés pour transmettre les corrections différentielles et les informations d'intégrité [Leick A. et al, 2015].

II.3.3 Le système Japonais (MSAS)

Le système complémentaire MSAS (*Multi Satellite Augmentation System*) basé sur des satellites MTSAT (*Multi-functional Satellite Augmentation System*) est un système SBAS à large couverture développé par le Japon; dans lequel l'utilisateur reçoit des informations complémentaires en provenance d'émetteurs installés sur deux satellites géostationnaires MTSAT-1R et MTSAT-2 [Choy S. et al, 2016].

Les données des satellites GPS sont reçues par des stations de surveillance au sol GMS (*Ground Monitoring Station*) installées sur quatre sites au Japon: Sapporo, Tokyo, Fukuoka et Naha. Les données reçues sont envoyées à des stations de commande principales MCS (*Master Control Station*) situées au Japon, l'une à Kobe, l'autre à Hitachiota [Sakai T., 2016].

II.3.4 Le système Indien (GAGAN)

GAGAN (*GPS And GEO Augmented Navigation*) est destiné à améliorer la précision fournie par les récepteurs GNSS en émettant des signaux complémentaires.

Le segment spatial consiste en trois satellites géostationnaires (GSAT8, GSAT10 et GSAT 15) [Rathan MP. et al, 2018], tandis que le segment sol comprend 15 stations de référence INRES (*Indian Reference Stations*), un centre de contrôle INMCC (*Indian Master Control Centre*) situé à Bangalore et trois stations montantes INLUS (*Indian Land Uplink Station*) [Ganeshan A.S. et al, 2016].

II.3.5 Le système Européen (EGNOS)

EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay Service*) est un système satellitaire Européen de type SBAS (*Satellite Based Augmentation System*); il est entièrement interopérable avec d'autres systèmes SBAS.

EGNOS est implémenté par un groupe tripartite composé de l'Agence Spatiale Européenne ESA (*European Space Agency*), de la Commission de l'Union Européenne et d'Eurocontrol [Prasad R. and Ruggieri M., 2005]. L'ESA est responsable du développement et de la validation du système, tandis qu'Eurocontrol est responsable de la validation opérationnelle des approches de précision.

II.3.5.1 Description du système EGNOS

L'architecture d'EGNOS est comme celle des autres systèmes SBAS, composée d'un segment spatial, d'un segment sol et d'un segment utilisateur; l'architecture et le fonctionnement du système est donné par la figure II.5. Le segment sol du système EGNOS est composé de :

- 40 stations de télémétrie et de surveillance de l'intégrité RIMS (*Ranging and Integrity Monitoring Station*), ces stations, réparties sur le territoire Européen ainsi que quelques sites distants, une description détaillée de ces stations sera donnée au chapitre V. Les stations RIMS sont reliées à un ensemble d'installations de traitement MCC (*Mission Control Center*);
- 4 centres de calcul et traitement MCC qui sont situés sur des sites géographiques différents et suffisamment éloignés pour éviter une panne complète en cas d'un problème majeur local (panne du réseau de communication sur un pays, accident industriel majeur, catastrophe naturelle, ...).
- 6 centres de transmission NLES (*Navigation Land Earth Station*).

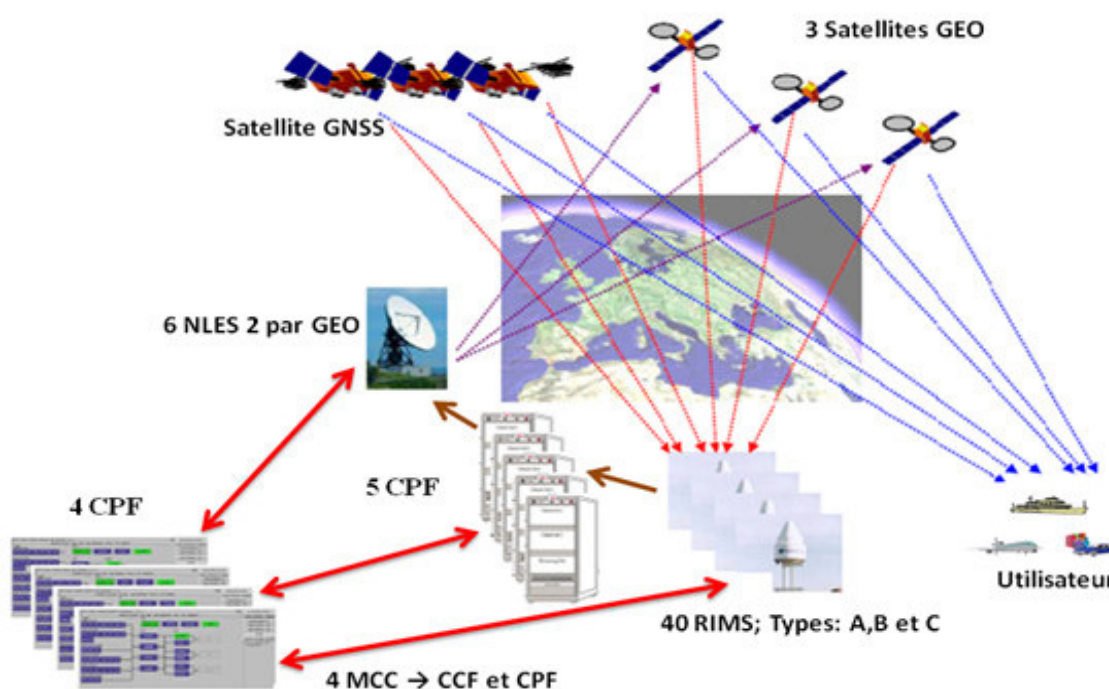


FIG.II.5.Architecture et fonctionnement du système EGNOS

Les stations RIMS reçoivent les informations de chaque satellite GPS et GLONASS, et envoient ces données aux centres de calcul MCC en utilisant un réseau de communication conçu à cette fin. Les MCC déterminent l'intégrité, les éphémérides et les corrections différentielles à apporter à chaque satellite ainsi que la correction ionosphérique. Ces informations sont transmises ensuite aux stations de navigation NLES. Ces stations envoient enfin le signal aux trois satellites géostationnaires qui le retransmettent aux utilisateurs équipés d'un récepteur GNSS compatible SBAS [ESA, 2011].

Actuellement le signal EGNOS est diffusé par trois satellites géostationnaires ASTRA-5B, ASTRA SES-5 et INMARSAT 4F2 EMEA, généralement deux satellites sont utilisés de manière opérationnelle pour la diffusion du message EGNOS, le troisième étant utilisé à des fins de maintenance, de tests et de validation, voir figure II.6 [EGNOS User Support Web site: <http://egnos-user-support.essp-sas.eu>].



FIG.II.6. Statut des satellites EGNOS (2 Janvier 2019)

Les satellites géostationnaires renvoient les corrections vers la terre sur la même fréquence L1 du GPS. De la même manière que pour les satellites GNSS, à chaque satellite EGNOS est attribué un numéro PRN (*Pseudo Random Noise*) unique, correspondant à un code pseudo-aléatoire qui permet son identification par l'utilisateur; le PRN et la position de chaque satellite sont donnés par le tableau II.1 [ESA, 2019].

TAB.II.1. Segment spatial du système EGNOS

Geo	PRN	Position
ASTRA-5B	PRN 123	31.5 E
ASTRA SES-5	PRN 136	5 E
INMARSAT 4F2 EMEA	PRN 126	64 E

Le segment utilisateur est composé de récepteurs standard GNSS compatibles SBAS et développés conformément à la norme RTCA MOPS.

EGNOS est disponible dans l'Europe (zone ECAC; Conférence Européenne de l'Aviation Civile, est une organisation composée de 44 Etats Membres). La couverture du service EGNOS est limitée au nord par 70 degrés de latitude (70° N), au sud par 20 degrés de latitude (20° N), à l'est par 40 degrés de longitude (40° E) et à l'ouest par 40 degrés de longitude (40° W) [ESA, 2017].

Actuellement, la seule partie en Afrique où le signal EGNOS est fiable, est l'Afrique du Nord. Toutefois, les empreintes des satellites géostationnaires d'EGNOS couvrent le continent Africain dans sa totalité (FIG II.7)

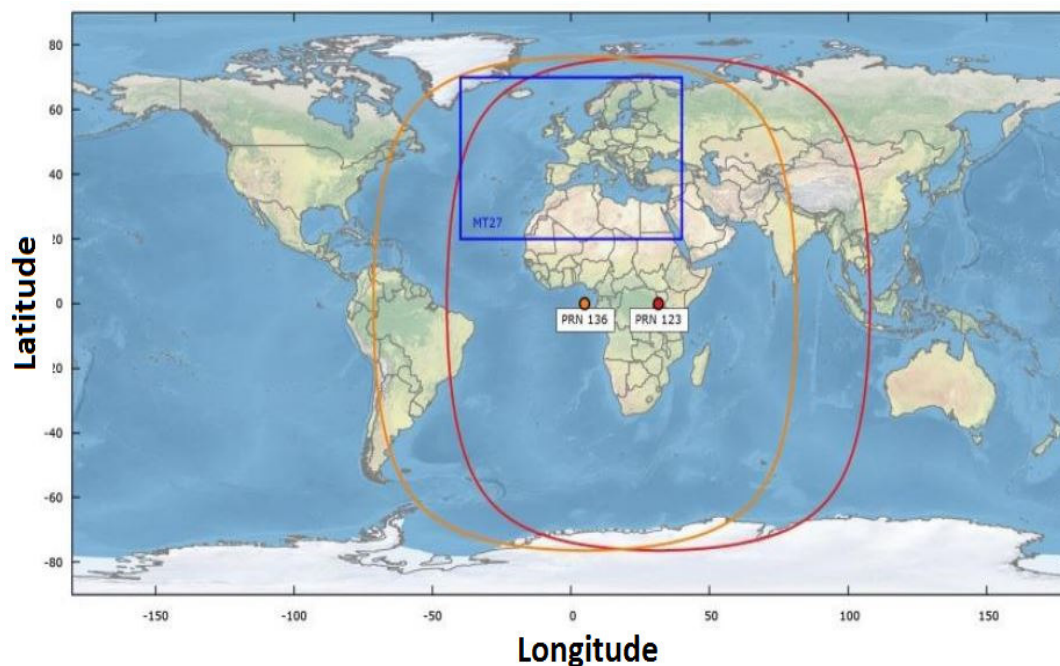


FIG.II.7. Couverture des satellites géostationnaires d'EGNOS, PRN 136(Orange) et PRN 123 (Rouge) [Magdaleno S. et al, 2019]

Les services EGNOS peuvent alors être étendus grâce à quelques adaptations et installations au sol en Afrique ou en mettant en place un sous-système régional indépendant apparenté à EGNOS [ICAO, 2015].

II.3.5.2 Services proposés par EGNOS

Le signal EGNOS fournit un niveau constant de précision de positionnement dans sa zone de couverture qui s'étend principalement sur l'Europe. Les corrections EGNOS peuvent être reçues par différents moyens:

- Directement depuis les satellites EGNOS, avec un récepteur GPS compatible EGNOS, sans aucun coût de communication;
- Par voie de communication terrestre, telle qu'internet ou les réseaux cellulaires, grâce au service d'accès aux données EGNOS.

EGNOS fournit trois types de services de positionnement à haute performance, qui se distinguent par leurs modalités d'utilisation et leurs caractéristiques de précision [Specht C. et al, 2019].

II.3.5.2.1 Service ouvert

EGNOS accroît la précision de l'actuel système mondial de navigation par satellites (GPS). L'ouverture du service EGNOS au grand public date d'octobre 2009. La zone sur laquelle le système EGNOS fonctionne est définie comme étant la partie minimale dans laquelle 99 % du temps l'utilisateur peut calculer sa position avec une erreur horizontale et verticale inférieure à 3 et 4 mètres, respectivement; la bordure de la couverture du service ouvert est donnée par la figure II.8 [ESA, 2017].

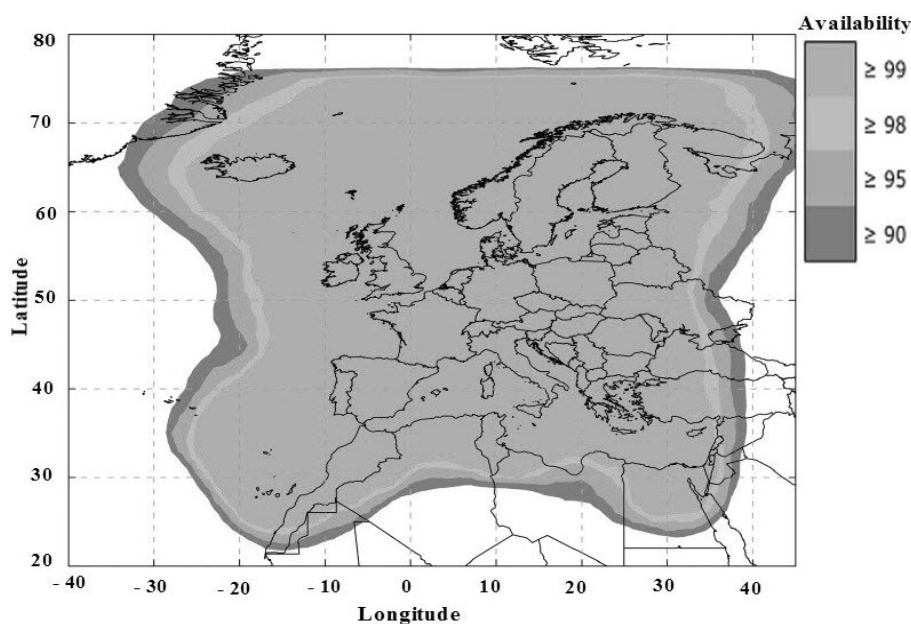


FIG.II.8. Disponibilité du service ouvert (HNSE < 3 m et VNSE < 4 m)

II.3.5.2.2 Service de sécurité de la vie

Le service de sécurité de la vie SOL (*Safety of Life*) est destiné aux applications de transport dans différents domaines et actuellement utilisé par l'aviation [Magdaleno S. et al, 2019], ce service a été officiellement mis à la disposition des utilisateurs en mars 2011. Pour la première fois, des signaux de navigation émis depuis l'espace sont utilisables pour une tâche aussi critique que le guidage vertical des avions pendant les phases d'atterrissage [ESA, 2019]. Grâce à EGNOS, le guidage de navigation par satellite est disponible aussi bien dans le plan vertical, que dans le plan horizontal et avec une précision de 1 mètre.

II.3.5.2.3 Service de distribution de données commerciales

Ce service n'est pas fourni par le signal EGNOS diffusé par les satellites géostationnaires mais par le système EDAS (*EGNOS Data Access Service*), destiné aux utilisateurs de l'EDAS et aux fournisseurs de ce service. Les corrections EGNOS, grâce à ce service, peuvent être reçues en temps réel par des moyens de communication terrestres tels qu'internet par le biais d'un protocole FTP [Vázquez J. et al, 2019], avec une précision inférieure à 1 mètre.

Le service EDAS est disponible depuis juillet 2012 et permet d'utiliser les informations d'EGNOS même lorsque le signal satellite d'EGNOS dans l'espace est indisponible. Ce service propose les mêmes informations qu'EGNOS, qui sont complétées par des données supplémentaires permettant la création de produits et de services innovants [ESA, 2019 (b)]. Les groupes de stations RIMS pour ce service sont donnés par la figure II.9 et les principales classes de données accessibles sont les suivantes:

- Messages de corrections EGNOS, tels que normalement reçus par un utilisateur via les satellites géostationnaires;
- Coordonnées des stations RIMS;

- Données brutes GPS, GLONASS et EGNOS GEO collectées par le réseau de stations RIMS [ESA, 2011].

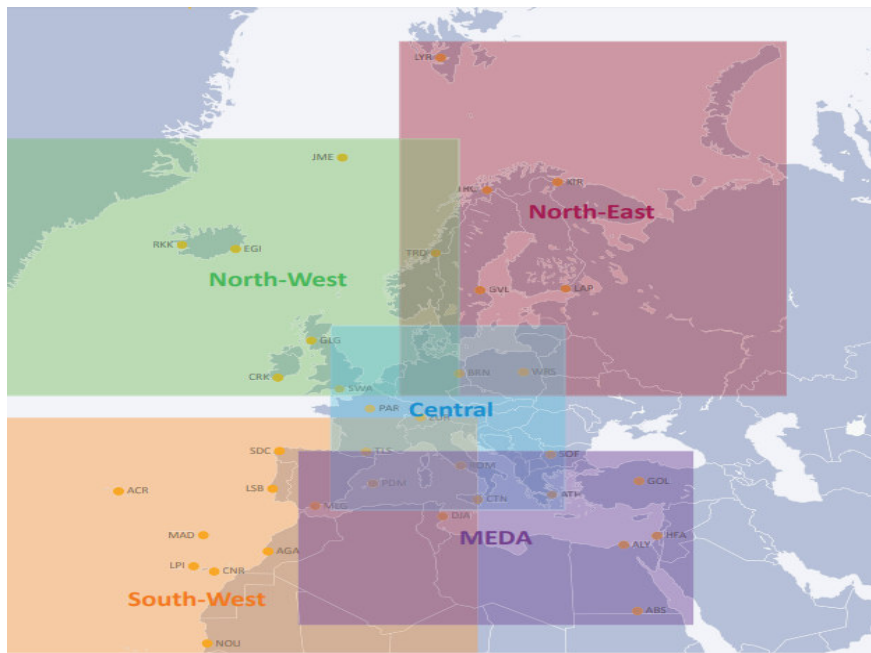


FIG.II.9. Distributions du groupe RIMS pour le service commercial [ESA, 2019 (b)]

II.4 Présentation des signaux SBAS

Les satellites SBAS transmettent des signaux suivant les mêmes spécifications définies initialement par le document international RTCA (*Radio Technical Commission for Aeronautics*). Ces spécifications sont décrites par le document *Minimum Operational Performance Standards for Global Positioning System / Wide Area Augmentation System Airborne Equipment* (MOPS) [Radio Technical Commission for Aeronautics, 2001]. La génération actuelle SBAS GEO diffuse sur la fréquence L1; le signal SBAS ressemble au signal C/A mais avec un débit de données supérieur de 250 bits par second bps (*Bits Per Seconde*) [ICAO, OACI, NCAO, 2016]. La seconde génération des signaux SBAS diffusera deux signaux de fréquences sur les porteuses L1 et L5.

II.4.1 Signal SBAS L1

Le signal SBAS L1 est composé d'un message de navigation de 250 bps avec une protection d'erreur dont le taux d'encodage est d'un demi. Ces messages, d'un débit de 500 symboles par second sps (*symboles per second*) [Nouvel O. et al, 2008], sont modulés avec un code d'étalement de 1023 bribes cadencées à 1,023 MHz. Ce signal est ensuite modulé en BPSK (*Binary Phase Shift Keying*) avec une porteuse dont la fréquence est de 1575,42 MHz. Comme les messages de navigation sont transmis à 500 Hz, il y a un nouveau message toutes les secondes. Cette séquence est le codage convolutionnel de 250 bits du message de navigation SBAS disponible sur le site du CNES (<ftp://serenad-public.cnes.fr>). Avec la séquence de codage présentée par la figure II.10, le principe du codage consiste à lier le bit à transmettre à ceux déjà transmis [De Lellis E. et al, 2009].

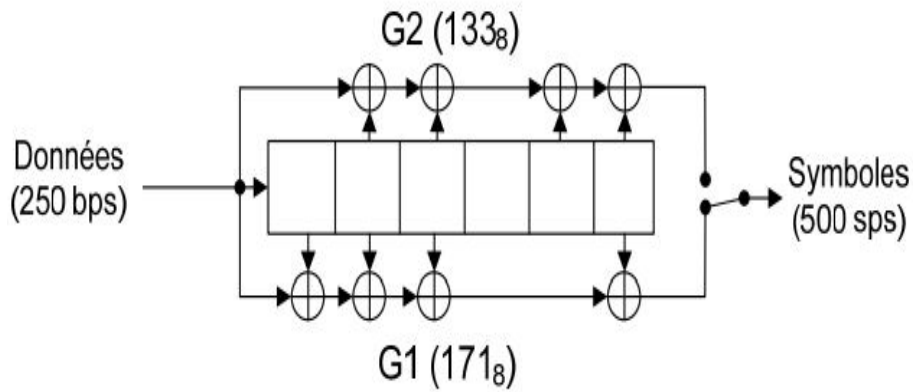


FIG.II.10. Codeur convolusionnel pour SBAS L1

Chaque trame a la même structure de base : 8 bits de préambule; 6 bits pour identifier le type de message; 212 bits de données; et de 24 bits de parité. La figure II.11 présente cette structure [Blăgescu D-L. and Bătrînache I-A., 2015]. Le préambule est généralement utilisé pour détecter le début d'un message, il y a trois préambules qui sont transmis (01010011, 10011010 et 11000110). À chaque nouveau message, le préambule est changé permettant de détecter la réception d'un nouveau message.

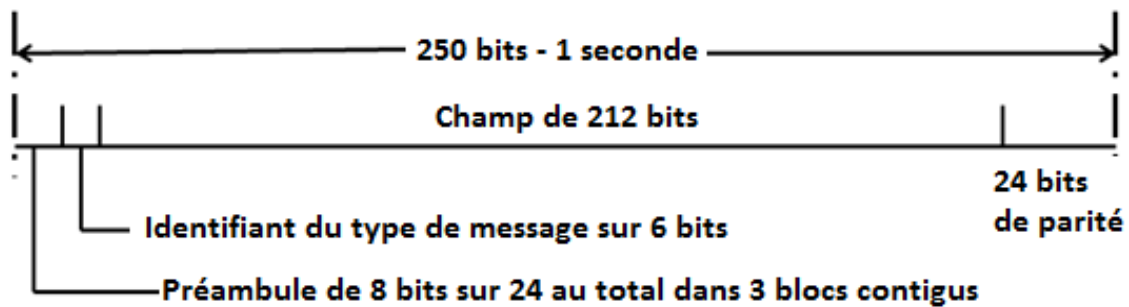
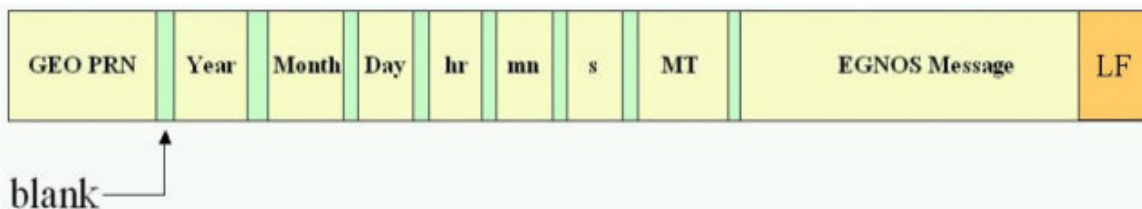


FIG.II.11. Structure des Messages

Le message EGNOS est en format hexadécimal tel que présenté à la figure II.12, un exemple de message de type2 est donné par cette figure [ESA, 2004].



123 18 04 09 01 00 10 2 5309BFFC003FF0003FEC003FEBFB8003FDC0040000117978B99795B96C3CFC00

FIG.II.12. Message type 2 donné par le satellite GOE 123 du système EGNOS, le 09 avril 2018

II.4.2 Signal SBAS L5

Le signal SBAS L5 est similaire au signal GPS L5 sauf qu'un seul canal est utilisé [Leick A. et al, 2015]. Ce signal est composé d'un message de navigation de 250 bps dont le taux

d'encodage est d'un demi. Ces symboles, d'un débit de 500 sps, sont modulés avec un code d'étalement de 1023 bribes cadencées à 10,23 MHz. Ce signal est ensuite modulé en BPSK avec une porteuse dont la fréquence est de 1176,45 MHz [Walter T. et al, 2012].

II.5 Messages transmis par SBAS

Le format et la structure de base des messages SBAS sont les mêmes que pour le signal de navigation GPS transmis. Pour accéder aux services fournis par SBAS, le récepteur doit être capable de décoder et appliquer les messages spécifiques du standard SBAS. Les systèmes SBAS, en particulier EGNOS permettent de diffuser des messages de navigation contenant des corrections différentielles, une grille de corrections ionosphériques et un message d'intégrité. Au total 64 messages sont définis par SBAS, bien que le nombre de messages utilisés soient environ 19 messages [Lim C-S. et al, 2016]. Une brève description de ces messages est donnée par le tableau II.2.

TAB.II.2. Description du contenu du message SBAS [RTCA, 2001]

Type de message (MT)	Contenu
0	Ne pas utiliser ce GEO (réservé aux essais)
1	Masque des PRN
de 2 à 5	Corrections rapides
6	Informations d'intégrité
7	Facteur de dégradation pour les corrections rapides
8	Réservé à de futurs messages
9	Message de navigation GEO (X, Y, Z, time, etc.)
10	Paramètres de dégradation
11	Réservé à de futurs messages
12	Temps réseau SBAS/paramètres de décalage UTC
de 13 à 16	Réservé à de futurs messages
17	Almanachs des satellites GEO
18	Masques des points de grille ionosphérique
de 19 à 23	Réservé à de futurs messages
24	Corrections rapides et corrections à long terme du satellite
25	Corrections à long terme du satellite
26	Corrections ionosphériques
27	Message de service SBAS
28	Matrice de covariance horloge-éphémérides
de 29 à 61	Réservé à de futurs messages
62	Message de test interne
63	Message Null

Les corrections transmises par SBAS peuvent être classées en trois types [ICAO, OACI, NCAO, 2016], ces corrections seront reprises et expliquées dans le chapitre suivant (CHAPITRE III) :

- Corrections rapides sur l'observation de distance (MT2 à MT 5 et MT24);
- Corrections lentes sur les éphémérides (MT24 et MT25);
- Corrections ionosphériques (MT18 et MT26);

À ces trois types de corrections s'ajoutent l'information sur le système EGNOS (MT9, MT12 et MT17), l'information sur la dégradation des corrections (MT7 et MT10) et l'information sur l'intégrité (MT2 à MT5, MT6, MT24 et MT26). La relation entre tous les messages est donnée par la figure II.13.

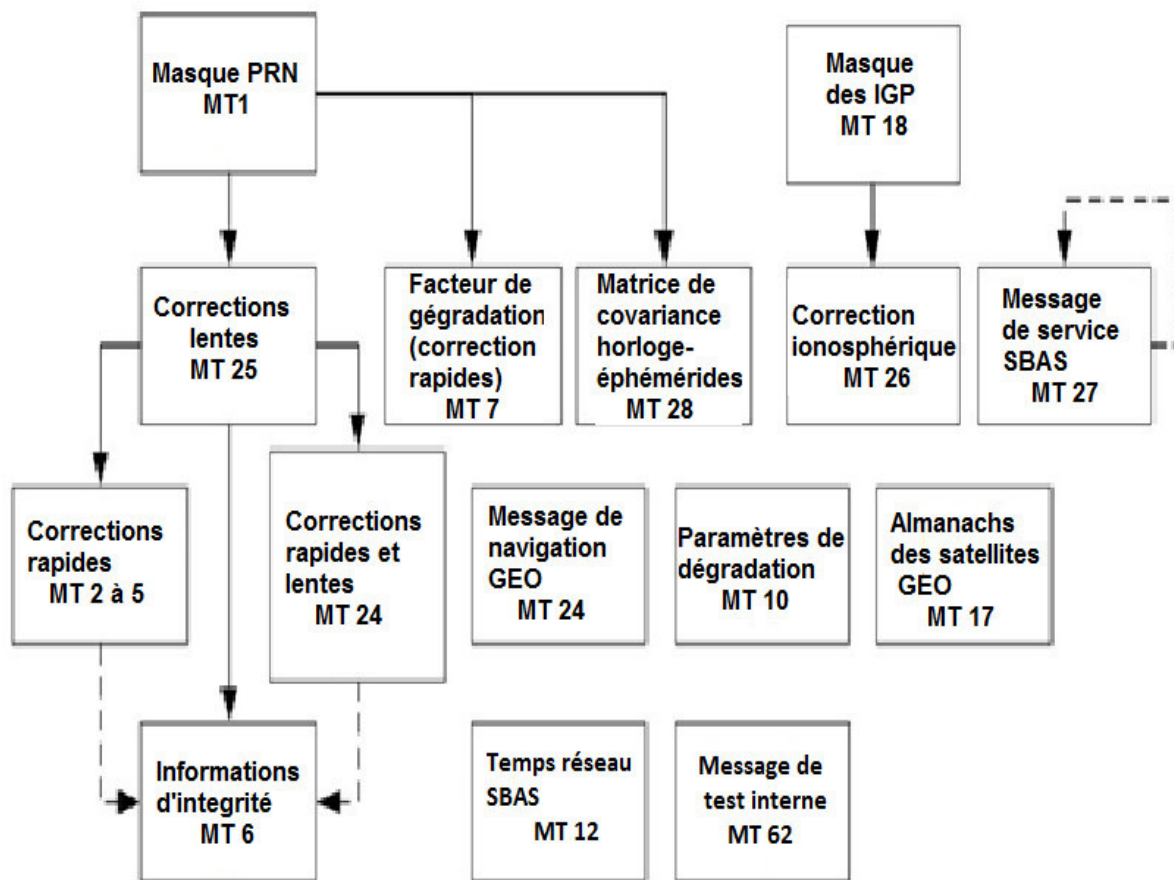


FIG.II.13. Messages et relations entre les types de messages du système EGNOS [Bilewski M. and Zalewski P., 2018]

Les flèches de la figure indiquent le parcours de l'information. Les messages nécessaires sont indiqués par des flèches continues et ceux facultatifs sont indiqués par des flèches pointillées.

II.5.1 Transmission de données (IOD)

Les messages SBAS sont répartis en différents types de messages comme présenté au tableau II.2. La première étape lors de la réception d'un nouveau message est de vérifier s'il

est bien associé à l'ensemble des messages déjà reçus. Les messages contiennent un paramètre IOD (*Issue Of Data*) permettant de manipuler la cohérence entre les différentes informations transmises et les mises à jour successives. Les IOD sont un attribut des masques, des corrections lentes et rapides en cours [Walter T., 1999] [ESA, 2011]. La figure II.14 présente les différentes relations des IOD.

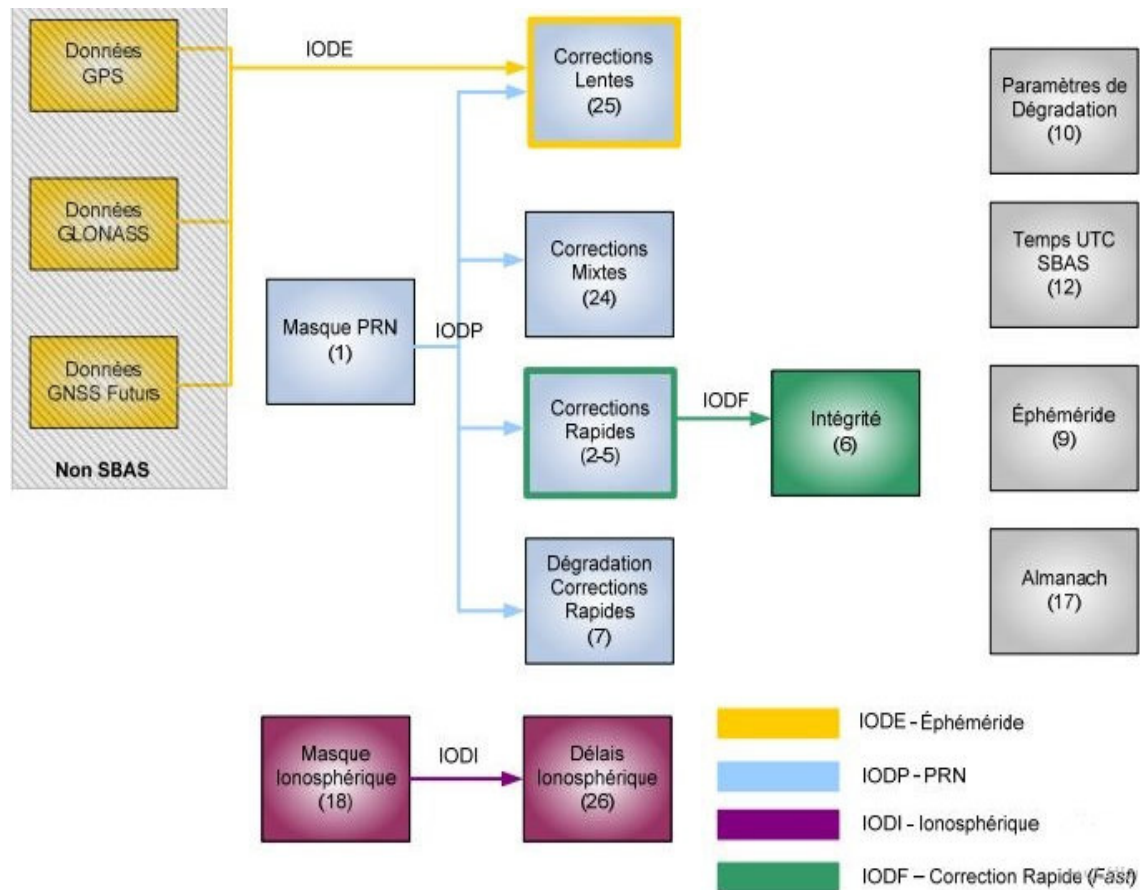


FIG.II.14. Relations des IOD des messages SBAS

Le principal IOD est celui du masque PRN (IODP) qui permet d'identifier le masque PRN en cours. L'IOD des éphémérides (IODÉ) permet d'associer les corrections lentes en cours aux bonnes éphémérides du système GPS, GLONASS ou autres. L'IOD des corrections rapides (IODF) permet d'identifier les corrections rapides en cours. Puis, l'IOD ionosphérique (IODI) permet d'identifier le masque de la grille ionosphérique en cours [RTCA, 2001].

II.5.2 Périodes de rafraîchissement et de validité

Chaque message diffusé est associé à une durée de rafraîchissement maximale qui doit respecter le système, et également définir une période de validité appliquée par l'utilisateur qui dépend de l'application [RTCA, 2001].

La figure II.15 donne les messages transmis par EGNOS décodés par le programme "Decode_messages EGNOS" écrit en Matlab. Le fichier RINEX-B contenant les corrections EGNOS sont les entrées de ce programme.

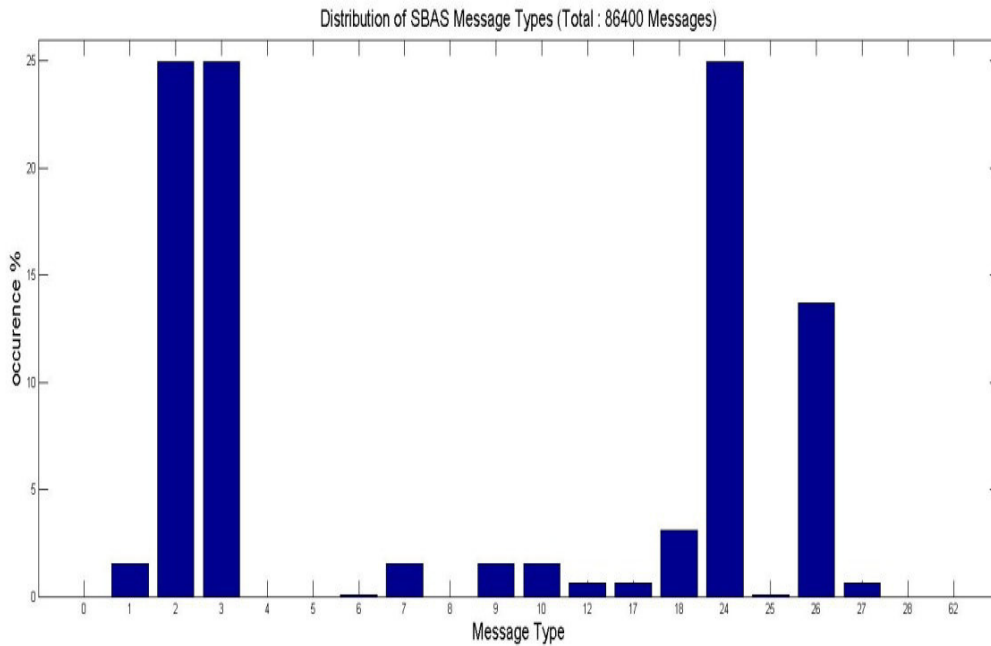


FIG II.15. Distribution des messages transmis par le satellite GEO 123, le 9 avril 2018

Les corrections rapides de type MT 2-5 sont transmises chaque 6 secondes, ces messages reviennent très fréquemment et représentent plus de 50 % des messages transmis. Les 50 % restants sont distribués sur les autres messages. Les corrections lentes de type 24-25 sont transmises chaque 120 secondes. Les corrections ionosphériques sont les plus longues à obtenir; il est possible d'avoir une solution SBAS complète après 300 secondes en moyenne. Toutefois, il est possible d'utiliser les corrections au fur et à mesure qu'elles sont reçues; ce qui permet d'améliorer les performances plus rapidement.

II.5.3 Masque de PRN

Le système SBAS est conçu de manière à corriger les mesures de plus de 51 satellites des différentes constellations [RTCA, 2001]. Le masque PRN permet d'associer les corrections à un satellite donné et peut être associé jusqu'à 210 satellites (TAB. II.3).

TAB.II.3. Masque PRN

PRN	Constellations
1-37	GPS
38-61	GLONASS
62-119	Futurs GNSS
120-138	SBAS
139-210	Futur

À chaque satellite GNSS, ainsi qu'à chaque satellite SBAS est attribué un numéro PRN (*Pseudo Random Noise*) unique, correspondant à un code pseudo-aléatoire qui permet son identification par l'utilisateur [Lim C.S. et al, 2016]. Cette identification est donnée par le

message type 1 (MT1), qui contient les informations appelées masque de PRN. Ce masque permet d'optimiser la taille des messages SBAS en indiquant à quel satellite PRN seront rattachées les informations contenues dans les autres messages qui le suivent.

Pour les satellites GPS, le PRN est donné par 1 - 37, pour les satellites GLONASS, il est entre 38 - 61, pour les satellites SBAS, il est entre 120 - 138, et pour les futurs GNSS, le PRN est donné par 139 à 210. Le masque de PRN indique que les SBAS fourniront des corrections et des informations d'intégrité pour les satellites GNSS dont le masque est égal à 1, sinon le masque est égal à 0. Un exemple de masque PRN est donné par le tableau II.4, qui indique à quel satellite, seront associées les corrections SBAS.

TAB.II.4. Exemple de masque PRN pour le GPS

Bit N°	1	2	3	4	5	6	...	38	120	210
PRN masque	0	0	1	0	1	0	1					
PRN	GPS PRN 1					GPS PRN 6		GLONASS Slot 1		GEO		

La première correction fournie par SBAS correspond au PRN 3, la seconde au PRN 5, etc. La figure ci-dessous donne le message type 1.

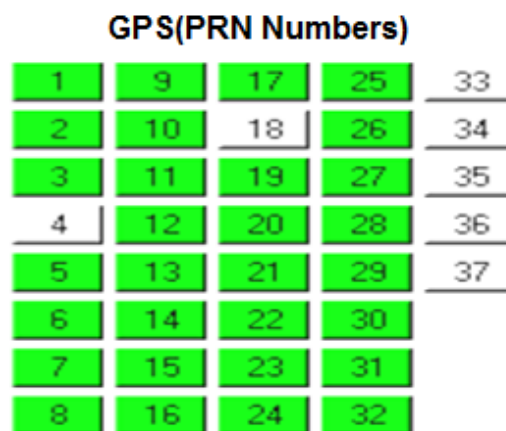


FIG.II.16. Masque PRN transmis par EGNOS le 9 Avril 2018

On remarque clairement que les deux satellites PRN 4 et PRN 18 ne sont pas dans le masque; ces deux satellites sont exclus des corrections transmises par EGNOS.

II.5.4 Masque IGP

SBAS transmet des corrections ionosphériques et leurs précisions pour chaque satellite au zénith (*vertical delay*) sous forme d'une grille virtuelle de points IGP (*Ionospheric grid points*) située à 350 km d'altitude [Nie Z. et al, 2019]. Cette grille est composée de 11 bandes numérotées de 0 à 10. Les bandes 0 à 8 sont verticales, et les bandes 9 et 10 sont horizontales autour des pôles pour un nombre total de 1808 IGP [Paparini C., 2013], la figure II.17 indique les bandes 0 à 8.

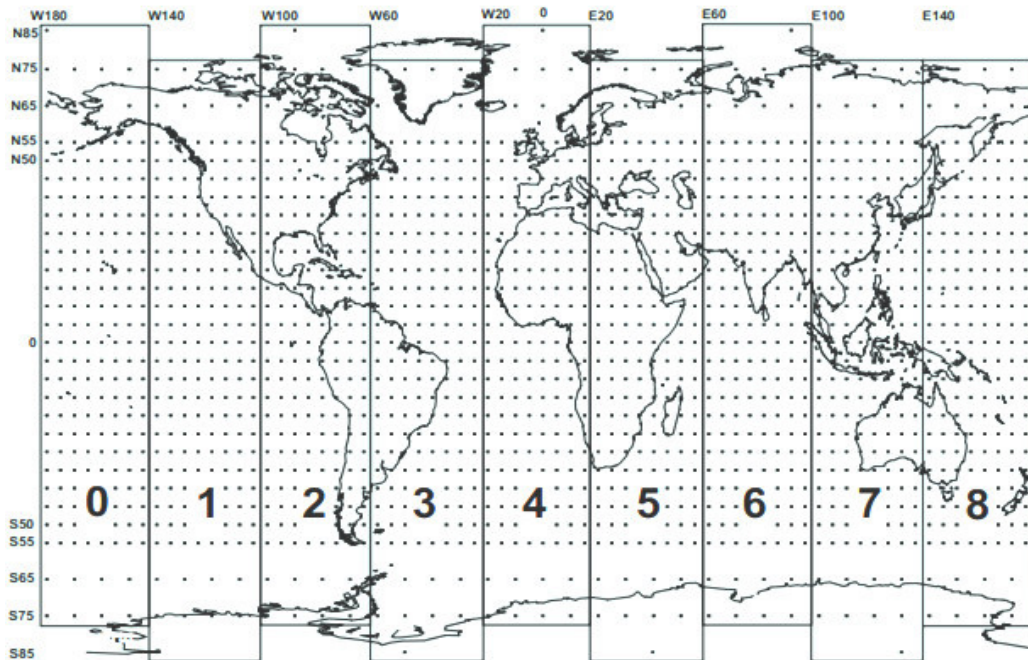


FIG.II.17. Grille globales des IGP

Les systèmes SBAS transmettent les délais ionosphériques uniquement pour la zone couverte par les stations terrestres. Afin d'identifier la zone du système en utilisation, SBAS transmet un masque des IGP via le type de message 18; un nombre de bandes diffusées permet de connaître le nombre de bandes couvertes par le système en utilisation; un numéro de bande et un masque de 201 IGP. Le format de message de type 18 est donné par la figure II.18:

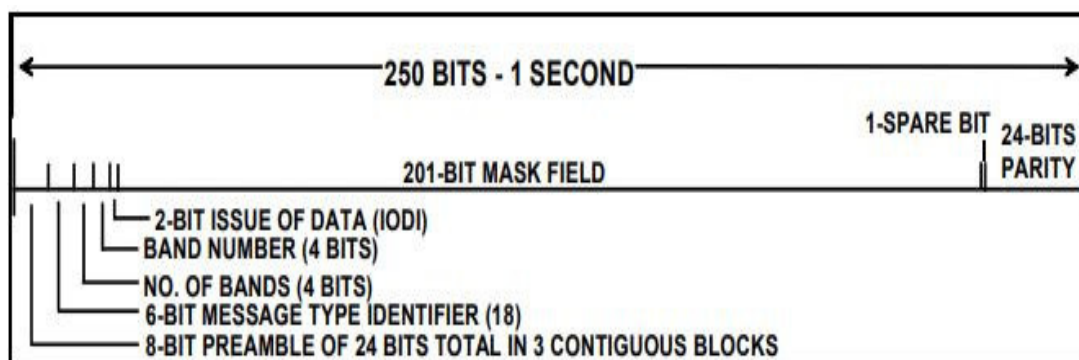


FIG. II.18. Format de message MT18 (masque IGP)

Le principe du masque est aussi repris pour associer les corrections ionosphériques aux points IGP auxquels s'appliquent les corrections. Chaque message contient le masque d'une bande. Dans le masque, un bit égal à 1 indique que l'information de correction ionosphérique est fournie pour l'IGP [RTCA, 2001] [ESA, 2011]. En cas de bit égal à zéro, les informations de correction ionosphérique ne sont pas fournies pour cet IGP. Un exemple de masque de point de grille ionosphérique est donné par la figure II.19:

II.6 Conclusion

Le système Européen de navigation par recouvrement géostationnaire (EGNOS) consiste à améliorer la précision et l'intégrité de service standard du GPS, par la diffusion de corrections différentielles. Les messages transmis par ce système ont été présentés sommairement dans ce chapitre. Ces messages contiennent des corrections nécessaires pour obtenir une meilleure précision de positionnement.

Ces corrections sont décrites en détail dans le chapitre suivant, qui est divisé en deux sections principales. La première décrit en détail l'application des corrections transmises par EGNOS et les équations mathématiques utilisées pour calculer une position par EGNOS, tandis que la deuxième section présente l'intégrité ainsi que le calcul du niveau de protection.

Chapitre III

Application des corrections EGNOS & intégrité

III.1 Introduction	51
III.2.Application des corrections EGNOS.....	51
III.2.1.Application des corrections rapides.....	52
III.2.2.Application des corrections lentes.....	53
III.2.2.1.Corrrection d'horloge	53
III.2.2.2.Corrrections d'éphémérides.....	54
III.2.3.Application des corrections ionosphériques.....	55
III.2.3.1.Calcul de latitude et de longitude pour chaque IPP (ϕ et λ).....	55
III.2.3.2.Sélection des IGP utilisés dans l'interpolation.....	57
III.2.3.3.Calcul des délais ionosphériques verticaux aux IPP.....	57
III.2.3.4.Calcul des délais ionosphériques.....	58
III.2.4.Application des corrections troposphériques.....	58
III.3.Estimation de variance.....	61
III.3.1.Variance des corrections rapides et lentes.....	61
III.3.2.Variance liée à la correction ionosphérique.....	62
III.3.3.Variance liée à la correction troposphérique.....	64
III.3.4.Variance des erreurs du récepteur.....	64
III.4.Niveau de protection.....	65
III.5.Intégrité	67
III.6.Conclusion	68

III.1 Introduction

Le système EGNOS permet grâce à un réseau de stations d'élaborer et de transmettre aux utilisateurs dans la zone de service des corrections différentielles et des informations d'intégrité permettant de corriger les erreurs sur les mesures de pseudo-distance dues aux biais et dérives d'horloge des satellites, aux imprécisions dans les éphémérides et à l'ionosphère. Il s'agit de toutes les erreurs qui sont communes à tous les signaux reçus dans une même zone. Bien que le système ne permette pas de transmettre des corrections pour les erreurs locales comme la troposphère et le multi trajet [Hofmann-Wellenhof B. et al, 2008], toutefois l'utilisateur bénéficie de modèles pour corriger ces erreurs. Le troisième chapitre est dédié aux principes d'application des corrections EGNOS, ce chapitre présente d'une part les principales étapes de calcul du niveau de protection, et d'autre part, décrit le concept d'intégrité.

III.2 Application des corrections EGNOS

Via les messages transmis par les satellites géostationnaires, le récepteur décode les messages et calcule quatre corrections à appliquer à la mesure de pseudo-distance pour chaque satellite, dont le modèle a été décrit par l'équation III.1 [Kozuba J. et al, 2018], [RTCA, 2001] [Eurocontrol, 2003]:

$$l_{corr}(t) = l_{mes}(t) + RC_{fast}(t) + RC_{clock}(t) - RC_{iono}(t) + RC_{tropo}(t) \quad (III.1)$$

Avec l_{corr} : Pseudo distance corrigé, l_{mes} : Pseudo distance mesuré, RC_{fast} : Corrections rapides, RC_{clock} : Correction d'horloges, RC_{iono} : Corrections ionosphériques et RC_{tropo} est la correction troposphériques. Tel que :

$$l_{mes} = \rho + c(dt_r - dt_s) + Ion + Trop + Rel + RDCB_L + SDCB_L + \varepsilon \quad (III.2)$$

Les paramètres de cette équation sont donnés dans le chapitre I (équation I.3). Le tableau III.1 [Sakai T. et al, 2006] et la figure III.1 [Walter T. et al, 2012] résument les principaux types de messages SBAS (*Satellite-Based Augmentation System*) utilisés pour les corrections différentielles.

TAB. III.1. Messages de corrections différentielles

Message type	Type de données	Pour	Information	Plage	Intervalle maximum(s)
2 à 5	Corrections rapides (FC)	13 satellites	Pseudo-distance	± 256 m	60
			Indicateur de précision	0 à 15	6
6	Intégrité	51 satellites	Indicateur de précision	0 à 15	6
25	Corrections lentes (LTC)	4 satellites	$\Delta x, \Delta y, \Delta z,$ Δt	±32 m $\pm 2^{22}s$	120 120
26	Corrections ionosphériques	15 IGP	Erreur ionosphérique	0 à 64 m	300 s
			Indicateur de précision	0 à 15	300 s

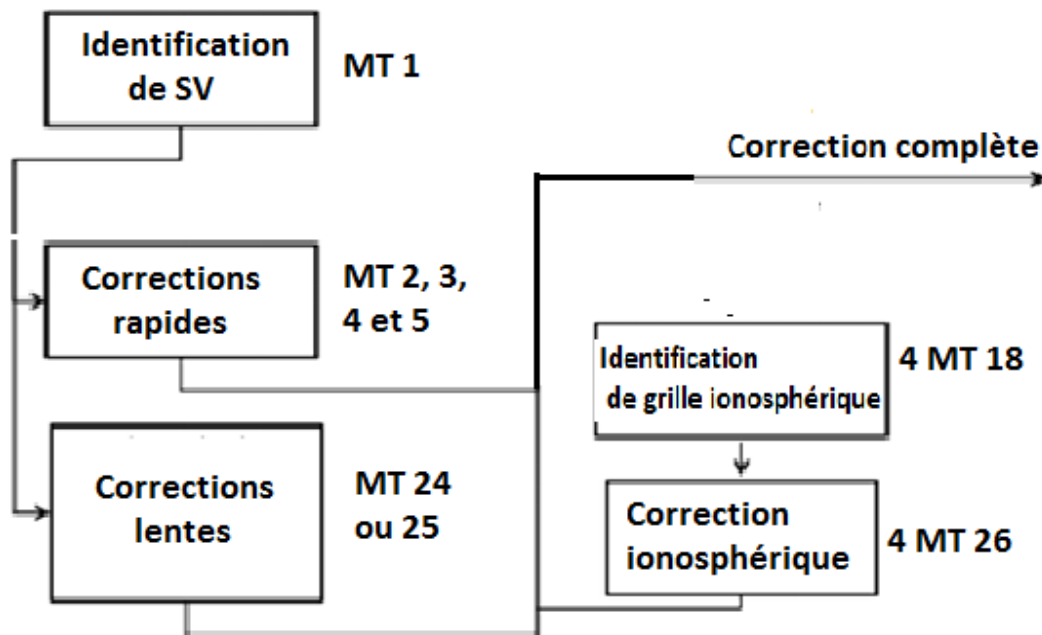


FIG III.1. Messages nécessaires pour corriger un satellite GPS (entre 6 et 12 messages sont nécessaires pour former une correction complète)

III.2.1 Application des corrections rapides

Les corrections rapides *FC* (*Fast Corrections*) sont des corrections régulièrement transmises par le système, elles concernent les paramètres à forte variabilité et sont indépendantes de la situation de l'observateur. Ces corrections sont fournies dans le message de type 2 à 5, et contient un IODP (*Issue Of Data PRN Mask*), un IODF (*Issue Of Data Fast Corrections*), 13 corrections rapides PRC_{fast} (*Pseudo Range Fast Correction*) et 13 indicateurs de précision $UDRE_i$ (*User Differential Range Error Indicator*) [Guay J. C., 2010].

Le message de type 2 contient les corrections pour les 13 premiers satellites du masque PRN, le message type 3 contient les corrections pour les satellites 14 à 26 du masque PRN et ainsi de suite.

La plage des corrections rapides varie entre -256 m et +256 m, mais les corrections transmises sont rarement au-delà de ± 10 m [RTCA, 2001]. La structure de ce type de message est donnée par la figure III.2 [ESA, 2011].

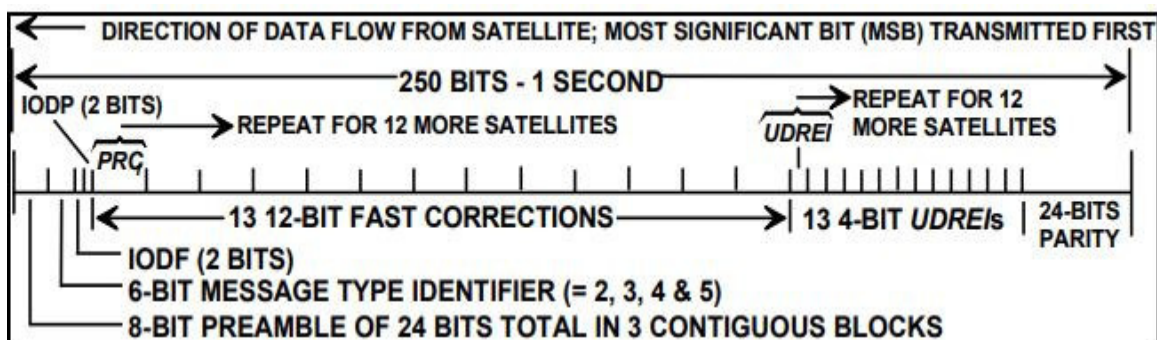


FIG. III. 2. Format des messages MT 2 à 5 (Corrections rapides)

L'application des corrections rapides est effectuée au niveau des pseudo-distances mesurées par le récepteur, elles se décomposent en deux termes:

- PRC (*Pseudo-Range Correction*) transmise toutes les 6 secondes environ. Ce terme est constant entre deux réceptions et représente la correction à appliquer à un instant donné.
- En plus de cette correction, une variation de correction RRC (*Range-Rate Correction*) est calculée par le récepteur, donc n'est pas transmise par le système.

Ceci permet ainsi d'interpoler la valeur du terme PRC entre deux mises à jour. Le terme RRC se calcule par soustraction de la valeur courante du PRC avec sa valeur précédente, soit:

$$RRC(t_0) = \frac{PRC(t_0) - PRC(t_{précédent})}{t_0 - t_{précédent}} \quad (III.3)$$

Tel que *PRC* : Correction de pseudo-distance (m) et *RRC* : Variation de correction (m).

La correction rapide qui s'applique alors à la mesure de pseudo-distance s'exprime par :

$$RC_{fast}(t) = PRC(t_0) + RRC(t_0) \times (t - t_0) \quad (III.4)$$

Avec t_0 , le temps d'applicabilité de la correction de pseudo-distance reçue précédemment [Eurocontrol, 2003].

III.2 .2 Application des corrections lentes

Les corrections lentes LTC (*Long-term corrections*) concernent les erreurs qui varient lentement et qui sont liées au système GPS, notamment les erreurs de position des satellites ainsi que leurs erreurs d'horloge [Sauer K., 2003]. En effet, les satellites ayant des corrections lentes variant plus rapidement peuvent recevoir des mises à jour des corrections plus régulièrement. Les corrections lentes se décomposent en deux termes distincts.

III.2.2.1 Correction d'horloge

Le système EGNOS transmet deux paramètres de correction d'horloge pour chaque satellite GPS. Ces paramètres sont δa_{f_0} et δa_{f_1} , ils correspondent à la correction du terme de biais d'horloge et de dérive d'horloge respectivement. Le système ne transmet pas de correction pour la dérivée seconde du biais d'horloge. A un instant t , la correction du biais d'horloge des satellites $\delta \Delta T_{sat}$ se calcule sous la forme [Eurocontrol, 2003]:

$$\delta \Delta T_{sat}(t) = \delta a_{f_0} + \delta a_{f_1}(t - t_0) \quad (III.5)$$

Tel que t est le moment d'applicabilité (s), t_0 est le moment de réception du message (s). En multipliant ce terme par la vitesse de la lumière c , on obtient la correction qui sera appliquée à la mesure de pseudo-distance [Nie Z. et al, 2019]:

$$RC_{clock}(t) = \delta \Delta T_{sat}(t) \times c \quad (III.6)$$

III.2.2.2 Corrections d'éphémérides

En parallèle à la correction d'horloge, le système EGNOS transmet des paramètres permettant de corriger la position des satellites calculés à partir des éphémérides radiodiffusées [Li L. et al, 2016]. Elles se calculent sous la forme d'un vecteur de dimension trois qui doit être ajouté à la position calculée en utilisant une interpolation linéaire [Eurocontrol, 2003] à partir de :

- La position des satellites: Vecteur 3D exprimant le décalage entre la position réelle du satellite et celle obtenue par calcul avec les éphémérides ($\delta X, \delta Y, \delta Z$). Cette valeur est définie par rapport à l'instant de référence t_0 .
- La dérive des corrections : Vecteur 3D exprimant la variation de la correction de l'erreur sur les satellites. Ce terme est également défini par rapport à l'instant t_0 .

La correction à appliquer à la position du satellite s'exprime donc sous la forme [Nie Z. et al, 2019] :

$$D(t) = r_{broadcast}(t) + \begin{bmatrix} \delta x \\ \delta y \\ \delta z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta \dot{x} \\ \delta \dot{y} \\ \delta \dot{z} \end{bmatrix} (t - t_0) \tag{III.7}$$

Tel que

- $D(t)$: Correction de position du satellite à l'instant t (m);
- $r_{broadcast}$: Position provenant des éphémérides (m);
- $[\delta x \ \delta y \ \delta z]^T$ et $[\delta \dot{x} \ \delta \dot{y} \ \delta \dot{z}]^T$ présente la position et la dérive des satellites ;
- t : moment d'applicabilité, et t_0 : moment de réception du message (s).

La correction de position des satellites est calculée ainsi par :

$$\begin{bmatrix} X_{corr}(t) \\ Y_{corr}(t) \\ Z_{corr}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{GPS}(t) \\ Y_{GPS}(t) \\ Z_{GPS}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} DX(t) \\ DY(t) \\ DZ(t) \end{bmatrix} \tag{III.8}$$

Les corrections lentes sont fournies dans le message de type 25, elles contiennent des paramètres pour corriger l'erreur d'éphéméride et d'horloge des satellites GPS. La structure de ce type de message est donnée par la figure III.3:

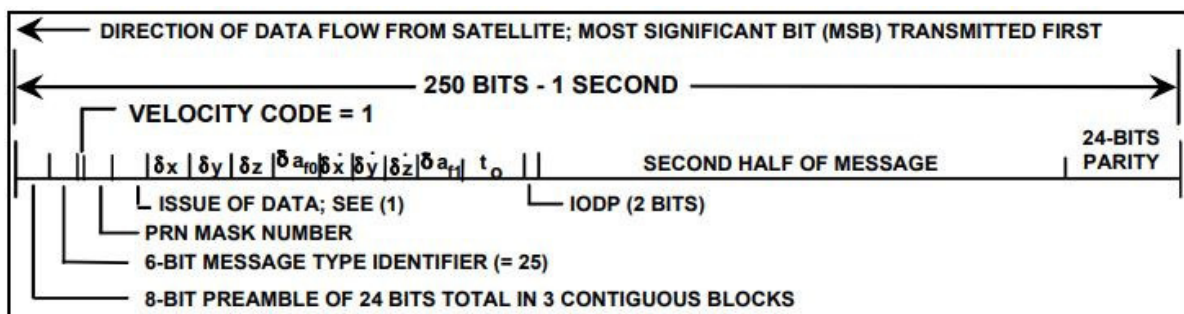


FIG III.3. Format de message MT25 (Corrections lentes)

Pour les corrections des éphémérides, d'horloge et correction de temps, les corrections GPS doivent être appliquées en premier lieu, suivies de celles fournies par EGNOS [ESA, 2011].

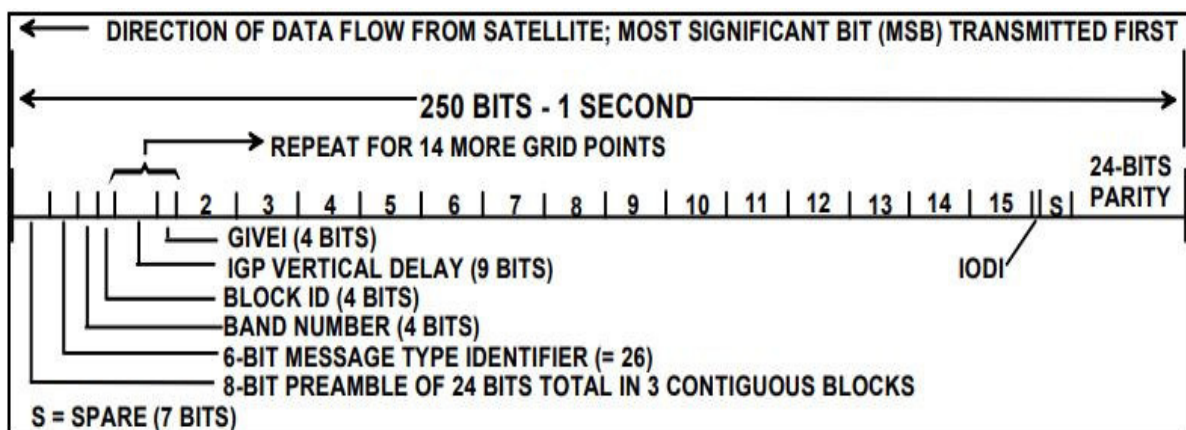
Le principal intérêt du système EGNOS est de fournir une meilleure estimation des erreurs dû à la traversée de l'atmosphère terrestre, notamment l'ionosphère. La correction atmosphérique est composée par deux termes: correction ionosphérique et correction troposphérique, qui sont présentés ci-dessous.

III.2.3 Application des corrections ionosphériques

Il y a plusieurs modèles de correction ionosphérique (fichiers IONEX (*IONosphere EXchange*) de l'IGS, grille de corrections EGNOS,...) qui peuvent être utilisés dans le cas d'utilisation d'un récepteur mono-fréquence.

La correction ionosphérique constitue le principal apport d'EGNOS et des systèmes SBAS en général, contrairement au calcul des corrections rapides et lentes qui s'avèrent assez simples, la correction ionosphérique est plus complexe.

EGNOS diffuse des corrections ionosphériques pour chaque IGP (*Ionospheric Grid Point*) et leur précision en termes des indicateurs de précision GIVEI (*Grid Ionospheric Vertical Error Indicator*) sous forme d'une grille ionosphérique de 5°x 5° dans le message type 26 [Sakai T. et al, 2006]. La structure de ce message est donnée par la figure III.4 et les indicateurs de précision sont donnés par le tableau III.5 de la section estimation de variance.



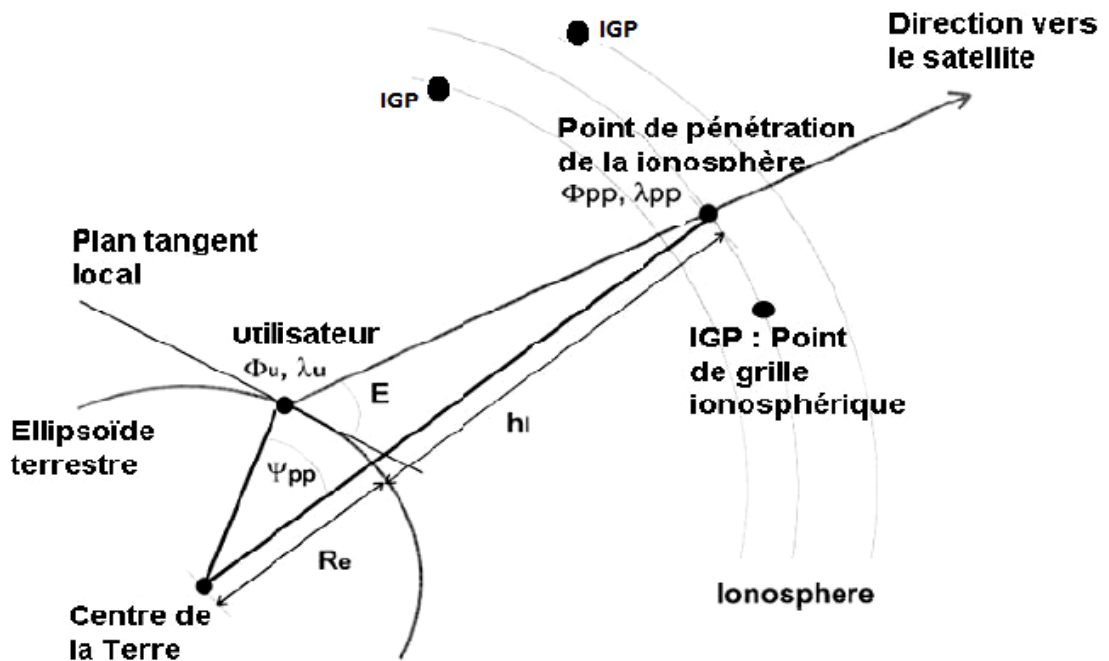


FIG. III.5. Géométrie de point de pénétration de l'ionosphère

Le calcul de la latitude ϕ_{pp} (en radian) du point ionosphérique est donné par [RTCA, 2001]:

$$\phi_{pp} = \sin^{-1}(\sin(\phi_u) \cos(\psi_{pp}) + \cos(\phi_u) \sin(\psi_{pp}) \cos(A_i)) \quad (III.9)$$

Avec ϕ_u est la latitude géographique de l'utilisateur et ψ_{pp} est l'angle du centre de la terre.

Elle est entre la position de l'utilisateur et la projection du point IPP sur la surface de la terre. ψ_{pp} est calculée par l'équation III.10.

Et A_i est l'angle d'azimut du satellite par rapport à la position de l'utilisateur (radians):

$$\psi_{pp} = \frac{\pi}{2} - E_i - \sin^{-1}\left(\frac{R_e}{R_e + h_i} \cos(E_i)\right) \quad (III.10)$$

E_i est l'élévation du satellite par rapport à l'utilisateur (radians); R_e est le rayon approximatif de la terre (6378km); h_i est la hauteur de la densité maximale d'électrons (350 km). Le calcul de longitude λ_{pp} (en radian) du point ionosphérique est donné par :

$$\lambda_{pp} = \lambda_u + \sin^{-1}\left(\frac{\sin(\psi_{pp})\sin(A_i)}{\cos(\phi_{pp})}\right) \quad (III.11)$$

Où:

- λ_u est la longitude de l'utilisateur (radians);

III.2.3.2 Sélection des IGP utilisés dans l'interpolation

Après avoir calculé l'emplacement de l'IPP, l'utilisateur doit sélectionner les IGP à utiliser pour l'interpolation de correction ionosphérique et de sa variance [RTCA, 2001]. La sélection des IGP est effectuée à partir des informations fournies dans le masque ionosphérique (message type 18) et doit être faite en tenant compte de l'état de surveillance des IGP sélectionnés (surveillé, non surveillé ou à ne pas utiliser). Si l'un des IGP est identifié comme non surveillé, l'interpolation se fait à l'intérieur d'un triangle contenant l'IPP (FIG III.6). Si deux IGP sont non surveillés, il faut élargir la cellule d'interpolation [ESA, 2011].

III.2.3.3 Calcul des délais ionosphériques verticaux aux IPP

Le récepteur calcule l'erreur ionosphérique τ_{IPP} par une interpolation entre les valeurs IGP fournies et voisines de chaque IPP; ainsi le calcul du délai IPP est la moyenne des délais des trois ou quatre IGP pondérés selon leur espacement de l'IPP [Jimenez-Banos D. et al, 2011]. La figure III.6 présente ces deux cas d'interpolation. Il existe donc des schémas d'interpolation permettant d'estimer l'erreur ionosphérique même si la grille est incomplète.

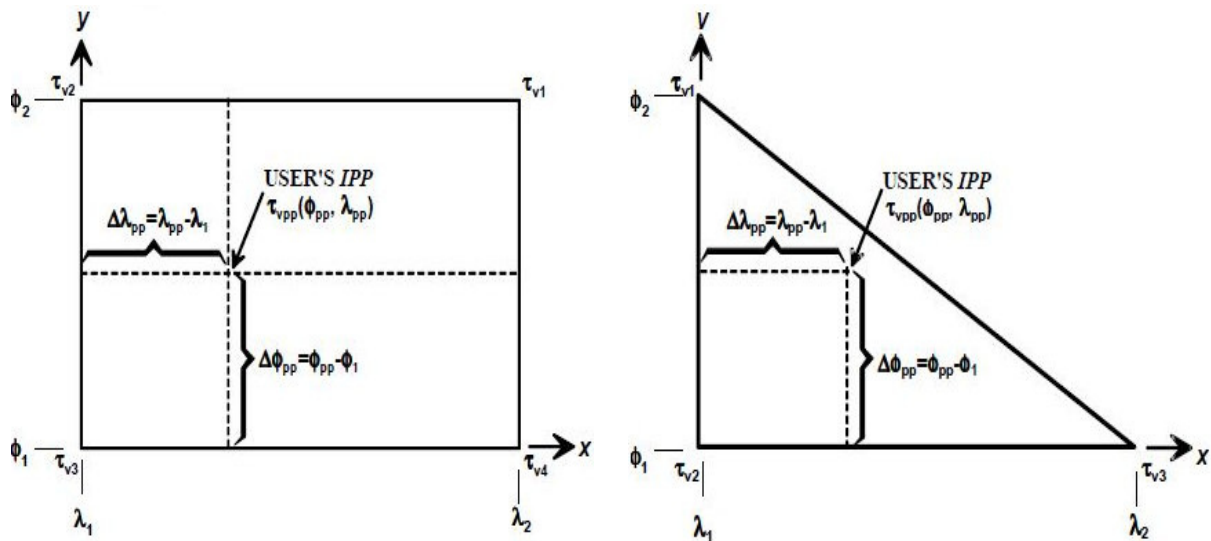


FIG. III.6. Principe d'interpolation des IPP [RTCA, 2001]

La formule mathématique de l'interpolation de l'erreur verticale en fonction de la latitude et de la longitude de l'IPP est donnée par [Paparini C., 2013]:

$$\tau_{IPP}(\lambda_{PP}, \phi_{PP}) = \sum_{i=1}^q w_i \times \tau_{IGPi} \quad (III. 12)$$

Tel que $q=3$ ou 4 , w_i est la fonction de poids associé à chaque IGP, elle est calculée par:

$$w_i = \frac{\Delta Lat_i}{\Delta Lat_{grille}} \times \frac{\Delta Lon_i}{\Delta Lon_{grille}} \quad (III. 13)$$

τ_{IPP} et τ_{IGPi} est le délai ionosphérique vertical de l'IPP, et de la grille ionosphérique respectivement.

III.2.3.4 Calcul des délais ionosphériques

Une fois le récepteur calcule l'erreur verticale pour chaque IPP, il doit alors multiplier cette erreur par le facteur d'obliquité F_{PP} (*Obliquity Factor at Pierce Point*), angle avec lequel l'ionosphère est traversée au niveau de l'IPP pour obtenir la correction ionosphérique RC à ajouter à la mesure de pseudo-distance [Arbesser-Rastburg B., 2002]. La correction ionosphérique est donnée donc par :

$$RC_{iono} = F_{PP} \times \tau_{IPP}(\lambda_{PP}, \phi_{PP}) \quad (III. 14)$$

$$F_{PP} = \left[1 - \left(\frac{R_e \cos E}{R_e + h_I} \right)^2 \right]^{-1/2} \quad (III. 15)$$

Où :

- E est l'angle d'élévation du satellite par rapport à l'utilisateur (radians);
- R_e est le rayon approximatif de la terre (6378 km);
- h_I est la hauteur de la densité maximale d'électrons (350 km).

Pour la correction ionosphérique, l'utilisateur doit choisir entre utiliser les paramètres de Klobuchar du GPS, ou appliquer les corrections transmises par EGNOS, celle-ci fournit une meilleure précision [ESA, 2011].

III.2.4 Application des corrections troposphériques

Le problème de l'erreur troposphérique vient principalement de la grande variation avec différentes conditions météorologiques; ainsi la correction du retard troposphérique ne peut être diffusée à l'utilisateur par EGNOS. Une estimation est générée localement par l'utilisateur, à partir d'un modèle troposphérique [Penna N. et al, 2001]. EGNOS fournit un modèle défini par les standards MOPS (*Minimum Operational Performance Standards*), permettant d'estimer l'erreur troposphérique. Elle est définie dans cette norme grâce à un modèle assez simple utilisant la position estimée du récepteur, l'élévation du satellite et le jour de l'année [Van Leeuwen S. et al, 2004]. L'estimation de la correction troposphérique utilise un modèle saisonnier à cinq paramètres [RTCA, 2001] :

- Pression atmosphérique (P);
- Température (T);
- Pression de vapeur saturante (e);
- Gradient de la température (β);
- et Gradient de la pression de vapeur saturante (λ).

Chaque paramètre est défini par une valeur moyenne et un paramètre de variation saisonnière, et est discrétisé par rapport à la latitude h , ces valeurs sont données par les tableaux III. 2 et III. 3 [RTCA, 2001], [Eurocontrol, 2003].

TAB. III.2. Tableau de référence du modèle EGNOS pour la correction troposphérique : valeurs moyennes pour les différents paramètres météorologique

Latitude(°)	P (mbar)	T (K)	e (mbar)	β (K/m)	λ (Pas d'unité)
≤ 15	1013.25	299.65	26.31	$6.30 \cdot 10^{-3}$	2.77
30	1017.25	294.15	21.79	$6.05 \cdot 10^{-3}$	3.15
45	1015.75	283.15	11.66	$5.58 \cdot 10^{-3}$	2.57
60	1011.75	272.15	6.78	$5.39 \cdot 10^{-3}$	1.81
≥ 75	1013.00	263.65	4.11	$4.53 \cdot 10^{-3}$	1.55

TAB. III.3. Tableau de référence du modèle EGNOS pour la correction troposphérique : variation saisonnière pour les différents paramètres météorologiques

Latitude(°)	ΔP (mbar)	ΔT (K)	Δe (mbar)	$\Delta \beta$ (K/m)	$\Delta \lambda$ (Pas d'unité)
≤ 15	0.00	0.00	0.00	$0.00 \cdot 10^{-3}$	0.00
30	-3.75	7.00	8.85	$0.25 \cdot 10^{-3}$	0.33
45	-2.25	11.00	7.24	$0.32 \cdot 10^{-3}$	0.46
60	-1.75	15.00	5.36	$0.81 \cdot 10^{-3}$	0.75
≥ 75	-0.50	14.50	3.39	$0.62 \cdot 10^{-3}$	0.30

Le calcul des paramètres se fait par une interpolation des valeurs moyennes et des valeurs de variation saisonnières suivant la latitude de l'utilisateur. Les paramètres troposphériques calculés permettent de déterminer l'erreur troposphérique pour un satellite au zénith. Il se décompose en une composante sèche Z_{hyd} et une composante humide Z_{wet} dont les expressions sont données par les équations III.16 et III.17 et qui dépendent à la fois des paramètres de pression P, de température T, de pression de vapeur saturante e et des paramètres constants [Kazmierski K. et al, 2016].

$$Z_{hyd} = \frac{10^{-6} K_1 R_d P}{g_m} \quad (III.16)$$

$$Z_{wet} = \frac{10^{-6} K_2 R_d}{g_m (\lambda + 1) - \beta R_d} \times \frac{e}{T} \quad (III.17)$$

Tel que

- K_1 (constante de réfraction) = 77.604 K/mbar;
- K_2 (constante de réfraction) = 38200 K²/mbar;

- R_d constante spécifique des gaz pour l'air sec = 287.054 J/Kg/K;
- g_m (accélération de gravité) = 9.784 m/s²;
- g = 9.80665 m/s².

Le modèle SBAS utilise ces deux équations pour calculer les retards zénithaux hydrostatiques et humides dus à la vapeur d'eau:

$$d_{hyd} = \left(1 - \frac{\beta H}{T}\right)^{\frac{g}{\beta R_d}} \times Z_{hyd} \quad (III.18)$$

$$d_{wet} = \left(1 - \frac{\beta H}{T}\right)^{\frac{(\lambda+1)g}{\beta R_d} - 1} \times Z_{wet} \quad (III.19)$$

La détermination du retard troposphérique se fait en deux étapes:

1. calcul du retard troposphérique zénithal;
2. amplification dans la direction du satellite via un facteur d'obliquité ou fonction de projection (*mapping function*), ce qui conduit à la formulation du retard troposphérique [RTCA, 2001] [Penna N. et al, 2001]:

$$RC_{tropo} = -(d_{hyd} + d_{wet})M(Ei) \quad (III.20)$$

d_{hyd} et d_{wet} est le retard zénithal hydrostatique et humide respectivement calculés par les équations III.18 et III.19 et $M(Ei)$ est la fonction de projection donnée par :

$$M(Ei) = \frac{1.001}{\sqrt{0.002001 + \sin^2(Ei)}} \quad (III.21)$$

Où M est la fonction de projection donnée par l'équation III.21 et Ei est l'élévation du satellite considéré. Le modèle est valide pour un satellite d'élévation supérieure à 5° [Sanz Subirana J. et al, 2013].

Dans ce travail le modèle UNB 3 est utilisé pour la correction troposphérique. Dans les deux modèles (UNB3 et EGNOS), les hypothèses sont les mêmes pour l'estimation du retard zénithal total qui est considéré comme la somme du retard zénithal hydrostatique et humide [Kazmierski K. et al, 2016].

Le second intérêt d'EGNOS, en plus de fournir une correction de mesure de pseudo-distance, il fournit également une estimation des erreurs résiduelles pour chaque correction. Ces estimations représentent la borne supérieure de l'erreur et elles sont fournies sous forme des variances.

III.3 Estimation de variance

Les systèmes GNSS assurent un premier niveau de surveillance. En effet, les messages de navigation prennent en compte les anomalies détectées par le segment sol et liées au système et à son opération telle que les erreurs d'horloges satellites. Il peut cependant se passer plusieurs heures avant que le segment sol ne détecte la défaillance, et ces informations ne sont pas transmises en temps réel.

EGNOS, comme les autres systèmes d'augmentation satellitaires SBAS, a été développé pour apporter un niveau supplémentaire de surveillance des informations fournies par les systèmes GNSS. Notamment en cas de panne d'une horloge atomique à bord d'un satellite qui peut engendrer des erreurs de positionnement très significatives. Son utilisation doit donc se faire avec précaution en fonction des applications pour lesquelles il est utilisé.

Le segment sol du système EGNOS surveille en permanence les performances des signaux de la constellation GPS. EGNOS transmet des estimées de la variance σ de chaque erreur, d'après le standard RTCA, il diffuse deux valeurs notées σ_{UDRE} et σ_{GIVE} [Vassilev B. and Vassileva B., 2011]. L'estimation de variance de la mesure de pseudo distance se décompose en quatre termes.

III.3.1 Variance des corrections rapides et lentes

Elle tient compte à la fois des erreurs résiduelles liées à l'application des corrections rapides et lentes, elle est notée par $\sigma_{i,flt}^2$. (*Fast and Long Term Corrections*). Cette variance se calcule via un algorithme dépendant des données radiodiffusées et des paramètres de dégradation [Bilewski M. and Zalewski P., 2018]. La variance des résidus des corrections rapides et lentes $\sigma_{i,flt}^2$ est calculée par :

$$\sigma_{i,flt}^2 = [(\sigma_{UDRE}) \cdot (\delta UDRE) + \varepsilon_{fc} + \varepsilon_{rrc} + \varepsilon_{lrc} + \varepsilon_{er}]^2, \text{ si } RSS_{UDRE} = 0 \text{ (MT 10)} \quad \text{(III. 22)}$$

$$\sigma_{i,flt}^2 = [(\sigma_{UDRE}) \cdot (\delta UDRE)]^2 + \varepsilon_{fc}^2 + \varepsilon_{rrc}^2 + \varepsilon_{lrc}^2 + \varepsilon_{er}^2, \text{ si } RSS_{UDRE} = 1 \text{ (MT 10)} \quad \text{(III. 23)}$$

Tel que :

- σ_{UDRE} : présente l'erreur différentielle, elle est extraite du tableau ci-dessous (TAB. III.4), en se basant sur les messages du types 2, 3, 4, 5 et 24;
- $\delta UDRE$ est un paramètre additionnel, il dépend de la position de l'utilisateur, défini dans les messages types 27 et 28, sinon il est égal à 1;
- ε_{fc} , ε_{rrc} , ε_{lrc} sont des paramètres de dégradation de corrections rapides (MT 7, MT 25), de correction de range rate (MT10), de correction à long terme (MT 25) respectivement, et ε_{er} est un paramètre utilisé uniquement en cas d'absence de certains messages de corrections rapides et lentes;

- RSS_{UDRE} est un indicateur de la somme quadratique RSS (*Root Sum Squared*) provenant du message type 10;

Les paramètres RSS_{UDRE} , et $\delta UDRE$ proviennent directement des messages SBAS tandis que les quatre autres paramètres doivent être calculés.

TAB. III.4. Indicateur de précision

UDREI	$\sigma_{i,UDRE}^2 (m^2)$	satellite Status
0	0.0520	Ok
1	0.0924	Ok
2	0.1444	Ok
3	0.2830	Ok
4	0.4678	Ok
5	0.8315	Ok
6	1.2992	Ok
7	1.8709	Ok
8	2.5465	Ok
9	3.3260	Ok
10	5.1968	Ok
11	20.7870	Ok
12	230.9661	Ok
13	2078.695	Ok
14	N/A	Non surveillé
15	N/A	Ne pas utiliser

EGNOS transmet pour chaque satellite GNSS, un signal d'intégrité indiquant son état, si une anomalie est détectée ou s'il n'est pas surveillé (utilisé/non utilisé).

III.3 .2 Variance liée à la correction ionosphérique

La grille ionosphérique transmise contient également une estimation de variance de l'erreur ionosphérique. En utilisant le point de percement IPP calculé lors de l'estimation du délai ionosphérique, on applique le même schéma d'interpolation pour obtenir l'estimation de variance des erreurs résiduelles sur la correction ionosphérique [RTCA, 2001].

La variance des résidus des corrections ionosphérique notée $\sigma_{i,UIRE}^2$, (*User Ionospheric Range Error*) permet de quantifier l'erreur non corrigée du retard ionosphérique. À partir des informations de GIVD (*Grid Ionospheric Vertical delay*) transmise dans le message type 26 (figure III.4), et en appliquant le facteur d'obliquité calculé à partir de l'élévation du satellite, la variance de l'erreur ionosphérique σ_{UIRE}^2 en m^2 est la suivante [Powell J-D. et al, 2007] :

$$\sigma_{\text{UIRE}}^2 = F_{\text{pp}}^2 \cdot \sum_{n=1}^N W_n \cdot \sigma_{n,\text{GIVE}}^2 \quad (\text{III. 24})$$

Où:

- σ_{UIRE}^2 est la variance des résidus des corrections ionosphériques (m^2);
- F_{pp}^2 est le facteur d'obliquité;
- W_n est la fonction du poids des IPP;
- N est le nombre de points IGP utilisé pour l'interpolation de retard ionosphérique des points IPP;
- $\sigma_{n,\text{GIVE}}^2$ est un paramètre du modèle de variance provenant du message type 26 (m^2).

Les valeurs de σ_{GIVE}^2 sont obtenues à partir des indicateurs de GIVE transmises par EGNOS et présentées dans le tableau III.5.

TAB. III.5. Conversion de GIVEI à $\sigma_{i,\text{GIVE}}^2$

GIVEI	$\sigma_{\text{GIVE}}^2(\text{m}^2)$	IGP Status
0	0.0084	Utilisé
1	0.0333	Utilisé
2	0.0749	Utilisé
3	0.1331	Utilisé
4	0.2079	Utilisé
5	0.2994	Utilisé
6	0.4075	Utilisé
7	0.5322	Utilisé
8	0.6735	Utilisé
9	0.8315	Utilisé
10	1.1974	Utilisé
11	1.8709	Utilisé
12	3.3260	Utilisé
13	20.7870	Utilisé
14	187.0826	Utilisé
15	Non utilisé	Non utilisé

EGNOS transmet aussi pour chaque point IGP un signal d'intégrité indiquant son état, si une anomalie est détectée ou s'il n'est pas surveillé (utilisé/non utilisé) [Lupsic B. and Takács B., 2019].

III.3.3 Variance liée à la correction troposphérique

La variance des résidus des corrections troposphériques notée $\sigma_{i,tropo}^2$ permet de quantifier l'erreur non corrigée des délais troposphériques, cette variance ne fait pas partie du système. Cependant, on l'estime en appliquant le modèle standard présenté précédemment.

L'erreur résiduelle s'obtient en combinant la fonction de projection permettant le calcul de l'erreur troposphérique avec une estimation de l'erreur résiduelle de la composante humide et sèche de l'allongement zénithal. Soit :

$$\sigma_{i,tropo}^2 = \sigma_{TVE} \cdot m(E_i) \quad (III. 25)$$

Telle que σ_{TVE} est la variance de l'erreur troposphérique verticale, un calcul simplifié de la valeur $\sigma_{i,tropo}^2$ peut être obtenu par l'équation III.26 pour des angles d'élévation supérieurs à 5° [RTCA, 2001], d'où $\sigma_{i,tropo}^2$ égale à :

$$\sigma_{i,tropo}^2 = 0.12^2 \left(\frac{1.002}{\sqrt{0.002001 + \sin^2 E_i}} \right)^2 \quad (III. 26)$$

Avec E_i est l'angle d'élévation du satellite par rapport à l'utilisateur (radians).

III.3.4 Variance des erreurs du récepteur

EGNOS considère également un quatrième terme d'erreur résiduelle liée au récepteur lui-même. Ce terme, noté $\sigma_{i,air}^2$, il se compose de bruit de mesure, ainsi que de l'erreur résiduelle liée au multi-trajet. Il s'écrit de la manière suivante [Lo SC., 2002]:

$$\sigma_{i,air}^2 = \sigma_{i,noise}^2 + \sigma_{i,multipath}^2 \quad (III. 27)$$

Où $\sigma_{i,noise}^2$ représente le bruit lié à la boucle de mesure du récepteur et $\sigma_{i,multipath}^2$ représente l'erreur résiduelle liée au multi-trajet non rejeté par le récepteur. Cette variance s'obtient grâce à la formule [RTCA, 2001] :

$$\sigma_{i,multipath} = 0.13 + 0.53e^{(-ele_i/10deg)} \quad (III. 28)$$

Telle que ele_i est l'élévation du satellite.

En combinant ces différents termes, nous pouvons estimer la variance de la mesure de pseudo-distance pour un satellite. On obtient la variance totale σ_i^2 pour la mesure de pseudo-distance comme suit [Powell J-D. et al, 2007] [Bilewski M. and Zalewski P., 2018] :

$$\sigma_i^2 = \sigma_{i,flt}^2 + \sigma_{i,UIRE}^2 + \sigma_{i,tropo}^2 + \sigma_{i,air}^2 \quad (III. 29)$$

Tel que

- $\sigma_{i,\text{flt}}^2$ est la variance des résidus des corrections lentes et rapides (m^2); donnée par l'équation III.22 ou III.23;
- $\sigma_{i,\text{UIRE}}^2$ est la variance des résidus des corrections ionosphériques (m^2), donnée par l'équation III.24;
- $\sigma_{i,\text{tropo}}^2$ est la variance des résidus des corrections troposphériques (m^2), donnée par l'équation III.25;
- $\sigma_{i,\text{air}}^2$ est la variance des erreurs du récepteur (m^2), donnée par l'équation III.27.

III.4 Niveau de protection

EGNOS permet de diffuser des paramètres qui permettent à l'utilisateur d'évaluer le degré de confiance dans les corrections différentielles et d'estimer une limite de son erreur de position; ces paramètres appelés niveaux de protection qui définissent une zone où la position réelle de l'utilisateur se trouve avec une très haute certitude, ces niveaux de protection dépendent de la géométrie (utilisateur/ satellite), de la précision des mesures de pseudo-distances et de la précision des corrections d'EGNOS [Jin S., 2012].

On distingue deux niveaux de protection (FIG.III.7); niveau de protection horizontal HPL (*Horizontal Protection Level*), qui correspond au rayon d'un cercle dans lequel se trouvent la position horizontale de l'utilisateur et le niveau de protection vertical VPL (*Vertical Protection Level*) qui est la demi-longueur d'un segment vertical qui contient la position verticale de l'utilisateur [Grunwald G. et al, 2019].

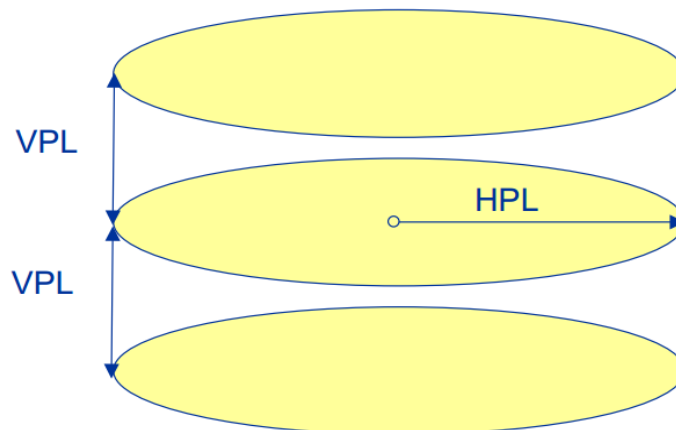


FIG. III.7. Niveau de protection

Le calcul des niveaux de protection horizontal et vertical est donné par [Grunwald G. et al, 2015], [Lupsic B. and Takács B., 2019]:

$$\text{HPL} = K_h \times d_{\text{maj}} \quad (\text{III. 30})$$

$$\text{VPL} = K_v \times d_U \quad (\text{III. 31})$$

Pour l'aviation civile K_h est fixé à 6.18 lorsque le vol est en-route et K_v est fixé à 5.33 pour les approches de précision PA (*precision approach*). Ce paramètre peut néanmoins être modifié pour d'autres applications, par exemple terrestres ou maritimes, permettant ainsi de disposer de PL réduits pour des probabilités de non-intégrité plus importantes [Oliveira J. and Tiberius C., 2009].

$$\text{Et} \quad d_{maj} = \sqrt{\frac{d_{east}^2 + d_{north}^2}{2} + \sqrt{\left(\frac{d_{east}^2 - d_{north}^2}{2}\right)^2 + d_{EN}^2}} \quad (III.32)$$

d_{east}^2 , d_{north}^2 et d_u^2 sont les variances de la composante Est, Nord et verticale de la position, exprimées dans un repère topocentrique, d_{EN} représente la covariance entre l'axe Est et l'axe Nord, tels que d_{east} , d_{north} , d_{EN} , d_u peuvent être obtenus à partir de la matrice de variance/covariance D donnée par [Takács B. et al, 2017] [RTCA, 2001]:

$$D = \begin{bmatrix} d_{east}^2 & d_{EN} & d_{EU} & d_{Et} \\ d_{EN} & d_{north}^2 & d_{NU} & d_{Nt} \\ d_{EU} & d_{NU} & d_u^2 & d_{Ut} \\ d_{Et} & d_{Nt} & d_{Ut} & d_t^2 \end{bmatrix} = (G^T \cdot W \cdot G)^{-1} \quad (III.33)$$

Où la $i^{\text{ème}}$ colonne de la matrice géométrique G est définie comme suit :

$$G_i = [-\cos El_i \sin Az_i \quad -\cos El_i \cos Az_i \quad -\sin El_i \quad 1] \quad (III.34)$$

Tel que El_i et Az_i sont les angles d'élévation et d'azimut du satellite.

W est la matrice de poids inverse, c'est une matrice diagonale avec les variances totales des satellites :

$$W = \begin{bmatrix} 1/\sigma_1^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1/\sigma_2^2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1/\sigma_N^2 \end{bmatrix} \quad (III.35)$$

Où la variance totale σ_i^2 est calculée par l'équation III.29:

L'intégrité des GNSS est un élément clé dans les applications de sécurité de la vie, telle que l'aviation, et des applications exigeant une fiabilité critique. Chacune de ces applications à ses propres exigences et contraintes, les niveaux de protection permettent d'exprimer le degré d'intégrité en temps réel.

III.5 Intégrité

L'intégrité est la capacité d'un système à informer l'utilisateur d'une dégradation de performances (comme la précision) qui peut mettre en danger son application. Elle présente le terme officiel de l'Organisation internationale de l'aviation civile (OACI) pour désigner la fiabilité de position. L'intégrité est définie par la mesure de confiance dans le système de positionnement, et elle est qualifiée par la probabilité (risque d'intégrité) que l'utilisateur obtienne des informations correctes ou la probabilité d'une erreur de position non transmises à temps à l'utilisateur. Selon les standards de l'aviation civile, l'intégrité est caractérisée par:

- **Les bornes d'alarme AL (*Alarm Limit*)** : erreurs de position maximales tolérables.
- **Le temps d'alarme TTA (*Time to Alarm*)** : temps maximal autorisé entre le début d'une défaillance (le système ne satisfait plus aux exigences opérationnelles) et l'annonce de cette défaillance.
- **Le risque d'intégrité** : probabilité qu'une erreur de position soit supérieure aux bornes d'alarmes et soit non détectée par le système dans un temps d'alarme donné.

En pratique, l'erreur de position PE (*Position Error*) n'est pas connue, par conséquent, il faut pouvoir estimer cette erreur pour pouvoir garantir qu'elle est inférieure aux alarmes limites (AL) définies par l'OACI [Ciećko G. and Grunwald G., 2017].

L'intégrité ne peut pas être déterminée de manière unique pour tous les utilisateurs, elle doit être calculée par chaque utilisateur en fonction de sa position, de la constellation et de ses exigences. Les informations nécessaires à ce calcul sont fournies par le système.

Le tableau III.6 présente les classes de risque d'intégrité pour un système GNSS [Prasad R. and Ruggieri M., 2005].

TAB. III.6. Classes pour le risque d'intégrité

Classe	Risque d'intégrité	Remarque
Très haute	1.10^{-7}	Exigences de l'aviation civile
Haute	1.10^{-5}	/
Moyenne	1.10^{-3}	/
Basse	1.10^{-2}	/
Très basse	1.10^{-1}	/

L'intégrité se définit par la comparaison de trois variables; erreur de position (XPE); niveau de protection qui borne l'erreur précédente avec un certain niveau de confiance (XPL); et limite d'alarme pour une application donnée (XAL). Par ailleurs, l'Université de "Stanford" propose un diagramme pour présenter d'une autre manière ces variables [Jin S., 2012]. Il s'agit d'un graphique ayant comme abscisse PE et comme ordonnée PL.

Ce diagramme est très utilisé pour valider l'intégrité fournie par les systèmes d'augmentations SBAS. Les relations entre PE, PL et AL sont résumés dans le diagramme de "Stanford" donné par la figure III.8.

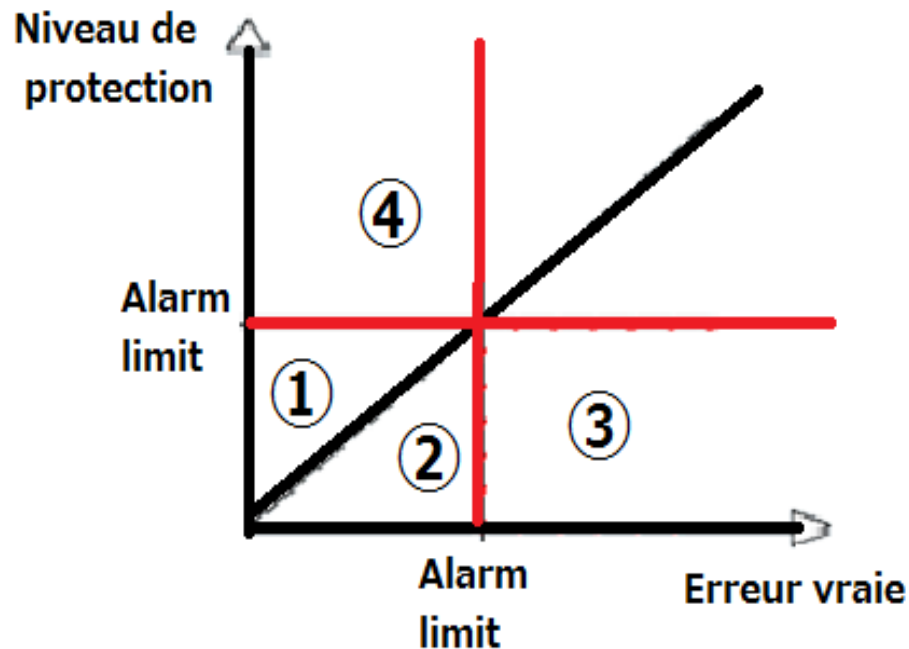


FIG. III.8. Diagramme de "Stanford"

Ce diagramme permet d'identifier quatre cas :

1. $HPE < HPL < HAL$: représente la situation normale où l'intégrité est assurée et le système est disponible.
2. $HPL < HPE < HAL$: cela signifie que l'erreur de position dépasse les estimations calculées par le système. Cependant, cette situation n'est pas critique, et le système est disponible.
3. $HPL < HAL < HPE$: est le cas d'une situation critique, risque d'intégrité,
4. $HPL > HAL$: cela se réfère à une indisponibilité du système (alerte vraie ou fausse) à l'utilisateur.

Avec : PE est l'erreur de position, PL est le niveau de protection et AL est l'alarme limite

III.6 Conclusion

L'objet de ce chapitre est de présenter l'application des corrections EGNOS ainsi que l'intégrité. Afin d'obtenir une position améliorée par rapport au GPS uniquement, le processus de l'amélioration du signal GPS par EGNOS consiste à :

1. Décoder et appliquer les informations de corrections rapides diffusées par les messages du type 2 à 5 et 24 correspondants aux satellites sélectionnés par le message du type 1.

Il faut aussi vérifier si les corrections peuvent être appliquées au satellite, si celui-ci n'est pas surveillé ou si une défaillance sur un satellite particulier est indiquée par le système.

2. Décoder et appliquer les corrections lentes diffusées par les messages du type 24 et 25.
3. Décoder et appliquer les corrections ionosphériques, diffusées par le message du type 26 pour la grille ionosphérique définie dans le message du type 18, si elles sont disponibles.
4. Appliquer les corrections troposphériques.

Ce chapitre est nécessaire pour comprendre l'application des corrections EGNOS pour améliorer la précision du GPS qui est l'objet du chapitre suivant.

Chapitre IV

Analyse des résultats : Amélioration de la précision par utilisation des corrections EGNOS

IV.1.Introduction.....	71
IV.1.1.Présentation du logiciel gLAB 5.4.4.....	71
IV.1.2.Fichiers utilisés dans le traitement.....	72
IV.2.Traitement et analyse des résultats en positionnement absolu temps réel.....	72
IV.2.1.Analyse des performances EGNOS pour un récepteur géodésique.....	73
IV.2.2.Analyse des performances EGNOS pour un récepteur mono-fréquence.....	74
IV.3. Amélioration de la qualité du positionnement absolu temps différé.....	75
IV.3.1.Description des données GPS utilisées.....	75
IV.3.2.Traitement et analyse des résultats en composante horizontale et verticale.....	77
IV.3.3.Traitement et analyse des résultats en 3 D(X, Y, Z).....	81
IV.4.Modélisation des corrections transmises par EGNOS.....	82
IV.4.1.Impact des Corrections rapides sur la précision de positionnement.....	83
IV.4.2.Impact des corrections lentes sur la précision de positionnement.....	86
IV.4.3.Impact des corrections ionosphériques sur la précision de positionnement.	87
IV.4.4.Impact de biais de code différentiel (DCB) sur le GPS+EGNOS.....	90
IV.5 Performance temporelle du site 305 à Oran.....	91
IV.6 Conclusion.....	92

IV.1 Introduction

EGNOS offre aux utilisateurs un service de navigation et de positionnement très performant, meilleur que ce qui est actuellement disponible par le GPS. Le système permettra d'améliorer considérablement le service standard du GPS, en termes de précision et de garantie de service (diffusion d'un signal d'intégrité).

Les données EGNOS diffusées permettent de corriger la position, les erreurs d'horloges des satellites, et les erreurs de propagation dans l'ionosphère. Elles permettent aussi d'éliminer certains satellites dans le calcul de la position grâce à une connaissance de l'état des satellites de la constellation GPS. L'utilisation de ces corrections contribue à l'amélioration de la précision par rapport à une position uniquement calculée par GPS. Actuellement, EGNOS est disponible en Europe et au nord de la Méditerranée, et il est actuellement en phase d'extension.

L'objectif de cette thèse est d'étudier et de comparer l'amélioration de précision GPS en utilisant les corrections EGNOS sans station RIMS (*Ranging and Integrity Monitoring Stations*) en Algérie. Afin de valider les résultats obtenus, des observations GNSS, par utilisation de récepteurs GNSS du type Net R9, ont été collectées sur quatre sites; Oran, Alger, Bejaia, et aussi Bir Sbaa (Ouargla).

Les fichiers de mesures brutes recueillies durant différents jours de l'année 2018 ont été traités avec le logiciel open source gLAB V 5.4.4 [Ibáñez D. et al, 2018], et repose sur le traitement des observations de code C/A sur la fréquence L1 en deux approches; GPS mono-fréquence (L1 uniquement) non corrigé dans un premier lieu. Les mêmes fichiers ont été traités par la suite avec les corrections EGNOS en deuxième lieu.

IV.1.1 Présentation du logiciel gLAB 5.4.4

Le logiciel gLAB a été réalisé par le groupe de l'Université Polytechnique de Barcelone. Il peut être utilisable directement et gratuitement sur le site internet <https://gage.upc.es/gLAB/>. Il permet de calculer des positions avec différentes techniques (SPP, DGNSS, SBAS et PPP); les deux techniques de positionnement qui seront procédées sont le GPS uniquement (SPP) et le GPS corrigé par EGNOS (SBAS), l'interface de ce logiciel est donnée par la figure IV.1.

Les résultats du traitement sont fournis dans un fichier output où les positions peuvent être données en mètres par (X, Y, Z) ou en (longitude λ° , latitude φ° et l'hauteur ellipsoïdale h (mètre)), Les coordonnées géodésiques sont dans le référentiel WGS84. Le logiciel contient deux fenêtres :

- la première correspond au positionnement, cette fenêtre est divisé en cinq panneaux (sélection des données, prétraitement, modélisation, et enfin sélection des paramètres de sortie),
- et la deuxième fenêtre est destinée à l'analyse des résultats. L'interface de cette fenêtre permet à l'utilisateur de générer directement des graphiques accompagnés d'un fichier output du traitement. Un exemple de ces fichiers est donné en annexe 1.

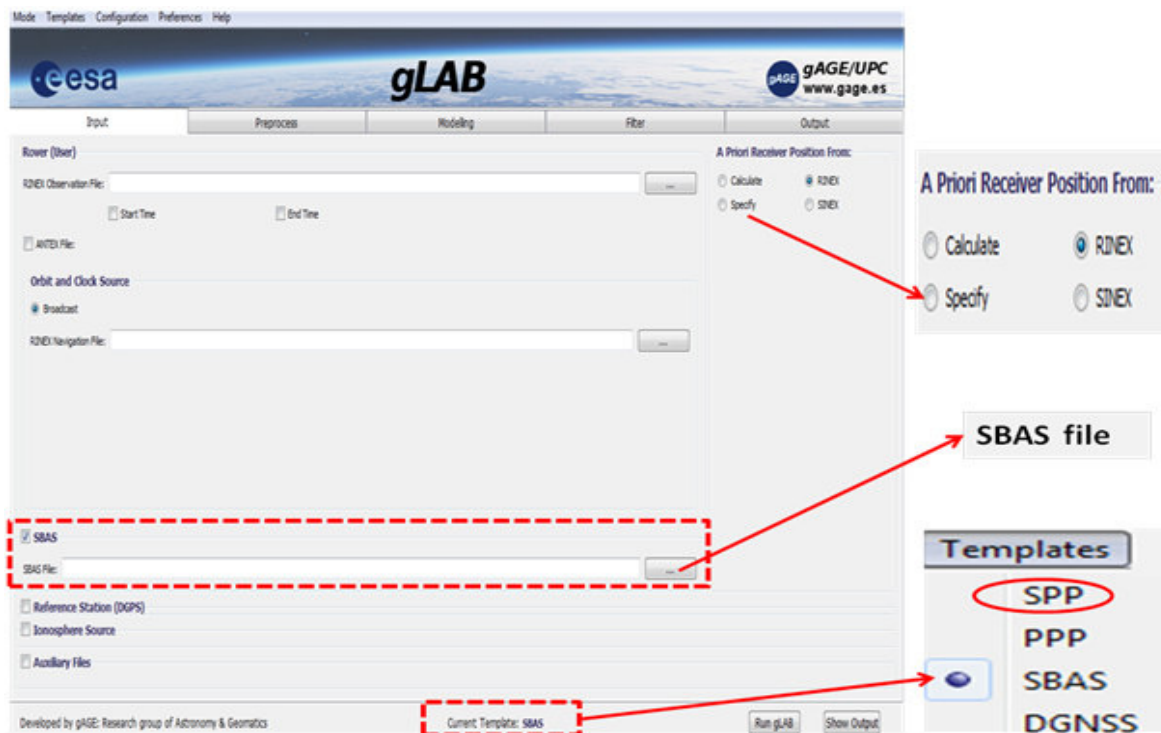


FIG. IV.1 Interface du logiciel gLAB et modes de positionnement

IV.1.2 Fichiers utilisés dans le traitement

Pour traiter les données brutes GPS (*Raw data*) avec le logiciel gLAB, il est nécessaire de convertir ces fichiers du format T02 issus du récepteur NetR9 en fichier RINEX (*Receiver Independent Exchange Format*). Pour cela, l'outil "Convert To RINEX" de Trimble est utilisé, cet outil permet la conversion des données au format RINEX (fichier d'observation + fichier de navigation). Le format RINEX permet l'échange et la combinaison de données entre différents récepteurs, le format de ce fichier est donné par l'annexe 2 [Gurtner W., 2007].

D'autre part, il faut aussi récupérer les fichiers de corrections EGNOS au format RINEX-B, ce sont des fichiers que gLAB utilise pour corriger la position. Les corrections d'EGNOS sont archivées en fichier de 24 heures et peuvent être téléchargées à partir du site du Centre National d'Études Spatiales CNES (<ftp://serenad-public.cnes.fr/>), un exemple de ce fichier est donné dans l'annexe 3.

IV.2 Traitement et analyse des résultats en positionnement absolu temps réel

Nous présenterons, dans cette partie, les résultats obtenus à partir de deux récepteurs mono (Juno) et bi-fréquences (NetR9) positionnés simultanément sur deux sites à Oran distants de quelques dizaines de mètres (figure IV.2). Le premier récepteur a été configuré pour la réception de signaux GPS dans le site d'Arzew (point de référence 305) où EGNOS a été désactivé, tandis que pour le site 305 b, le récepteur a été configuré pour la réception du signal GPS et le signal EGNOS où EGNOS a été activé.

Les données brutes de format SSF (*Raw Data Standard Storage Format*) collectées par un récepteur Juno ont été exportées, et traitées par la suite à l'aide du logiciel Pathfinder.

Le traitement des données brutes du NetR9 sous format RINEX a été effectué avec le logiciel gLAB en mode absolu qui se base sur le code C/A sur la fréquence L1 (SPP). Cette expérimentation a pour objectif de vérifier si le récepteur bi-fréquence a pris en considération les corrections transmises par EGNOS en temps réel. Comme le récepteur NetR9 utilise une correction ionosphérique bi-fréquence, un traitement uniquement sur L1 a été effectué en utilisant le modèle de Klobuchar pour la correction ionosphérique.



FIG. IV.2. Visualisation globale des sites 305 et 305 b sous Google Earth (à gauche) avec la mise en place du matériel sur le site 305 b (à droite) lors du test effectué sur le toit du CTS (13 mars 2018)

IV.2.1 Analyse des performances EGNOS pour un récepteur géodésique

La précision de position horizontale et verticale dans les deux sites pour la journée du 13 mars, 9 et 10 avril 2018 est donnée par le tableau IV.1 :

TAB. IV.1. Erreurs horizontale en (m) (HPE: *Horizontal Positioning Error*) et verticale (VPE : *Vertical Positioning Error*) (95%) rapportées aux coordonnées approchées du fichier RINEX

Site	<u>13 mars 2018</u>		<u>09 avril 2018</u>		<u>10 avril 2018</u>	
	HPE	VPE	HPE	VPE	HPE	VPE
305 (EGNOS désactivé)	1.74	8.19	1.52	3.86	1.13	2.83
305 b (EGNOS activé)	2.19	6.35	2.66	7.25	1.71	3.28

Pour la journée du 13 mars, l'erreur horizontale et verticale pour les deux sites a atteint les valeurs suivantes:

- Erreur horizontale (95%) est égale à 2.19 mètres dans le site 305 b (EGNOS activé) bien qu'elle était de l'ordre de 1.74 mètre dans le site 305 (EGNOS désactivé);
- Erreur verticale (95%) est égale à 6.35 mètres dans le site 305 b (EGNOS activé) alors qu'elle était de l'ordre de 8.19 mètres dans le site 305 (EGNOS désactivé).

Le signal GPS L1 a été corrigé sensiblement sur la composante verticale, en activant EGNOS. Pour la journée du 13 mars, bien que pour 9 et 10 avril, l'erreur verticale n'a pas été corrigée. À partir de ce tableau qui présente l'erreur horizontale et verticale (95%) rapportée à la position donnée par le fichier RINEX et calculée en mode absolu pour chaque site, nous constatons que le signal GPS L1 n'a pas été corrigé en activant EGNOS en utilisant un récepteur bi-fréquence.

IV.2.2 Analyse des performances EGNOS pour un récepteur mono-fréquence

Afin de voir la qualité du signal EGNOS dans les deux sites pour la date du 10 avril 2018 et pour des fins de comparaison, le même test a été effectué avec deux récepteurs mono-fréquence (Juno) simultanément sur les deux sites. Les données brutes obtenues par ce récepteur ont été traitées par le logiciel GPS Pathfinder. Ce logiciel permet de donner la position en 3D, la précision, une information sur cette position (corrigée ou non) et les satellites utilisés pour calculer la position.

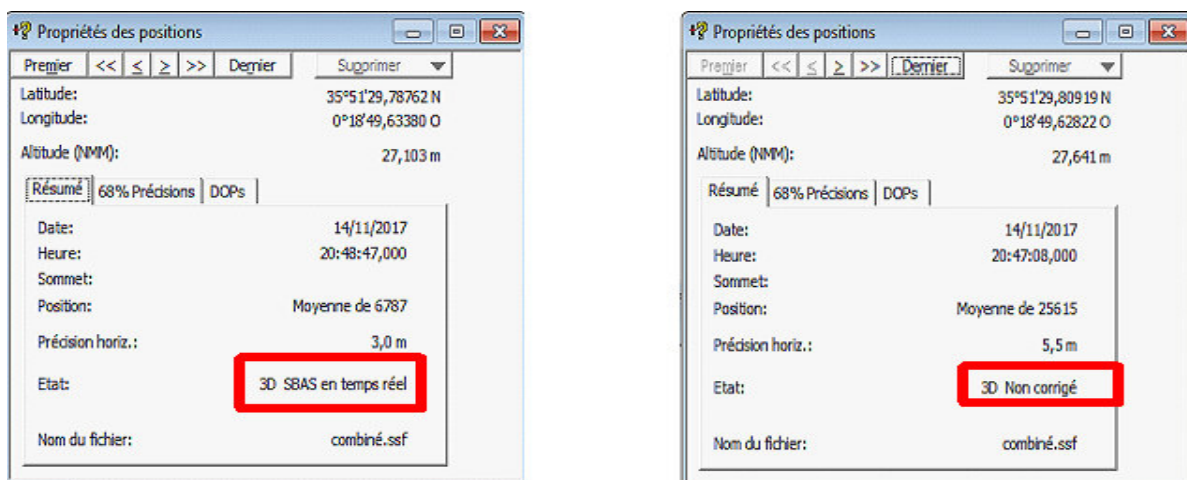


FIG. IV.3. Propriétés des positions données par GPS Pathfinder

La précision horizontale et verticale en temps réel pour chaque site est présentée par le tableau IV.2.

TAB. IV.2. Erreurs horizontale et verticale pour les deux sites 305 et 305 b en utilisant le récepteur mono-fréquence Juno

	<u>GPS (305)</u>	<u>GPS+EGNOS (305b)</u>
HPE	5.6 m	3.2 m
VPE	22.2 m	9.1 m

Les résultats obtenus confirment l'amélioration de position; par utilisation du GPS uniquement, on a 68 % des erreurs horizontales et verticales sont inférieures à 5.6 mètres et 22.2 mètres respectivement; tandis que pour le GPS corrigé, on a 68 % des erreurs horizontales et verticales sont inférieures à 3.2 mètres et 9.1 mètres respectivement.

En conclusion, l'activation du système EGNOS sur un récepteur bi-fréquence en temps réel n'améliore pas la précision d'une façon significative, par contre, son activation sur un récepteur mono-fréquence permet d'améliorer la précision du positionnement. Néanmoins, les analyses en utilisant le récepteur Juno n'ont pas été accomplies à cause de non-disponibilité du fichier RINEX complet (fichier obtenu par conversion du fichier brut SSF au format RINEX), ce qui nous a amené à utiliser les récepteurs Trimble NetR9 multi fréquences où le code C/A sur la fréquence L1 est utilisé.

IV.3 Amélioration de la qualité du positionnement absolu en temps différé

L'objectif principal de cette thèse est de tester les performances actuelles d'EGNOS en Algérie sans station RIMS en termes de précision. Dans cette partie, l'impact de l'ajout des corrections EGNOS sur la précision du positionnement absolu par GPS en Algérie à été étudié et analysé.

IV.3.1 Description des données GPS utilisées

Les données GPS brutes ont été collectées par des récepteurs géodésiques multi fréquences (Trimble Net R9), installés sur quatre sites situés en Algérie (Oran, Alger, Bejaia et Bir Sbaa/Ouargla) pendant différents jours de l'année 2018, avec un intervalle de temps de 6 à 24 heures. L'intervalle d'échantillonnage était de 10 secondes et l'angle de coupure d'élévation était fixé à 10° [Tabti L. et al, 2019]. Le tableau IV.3 donne les acronymes et la position approchée de chaque site, tandis que, la figure IV.4 permet de visualiser la répartition géographique des sites sélectionnés.

TAB. IV.3. Id, latitude et longitude de chaque site utilisé

Sites	Id	Latitude (φ)	Longitude (λ)
Oran	305	35.857893°	-0.312615°
Alger	ASAL	36.777046°	3.009076°
Bejaia	B02	36.754287°	5.101812°
Bir Sbaa	BRS	32.522807°	6.702866°

Le choix des sites Algériens a été fait en fonction de la disponibilité des données GPS. On constate que les quatre sites sont dans la zone de service du système EGNOS; cette zone est donnée dans la figure II.8 (chapitre II).

Les différentes techniques de positionnement peuvent être envisagées en considérant soit les mesures de code soit les mesures de phase. Notre méthodologie repose sur le traitement

des observations correspondant aux mesures de code C/A (présenté au chapitre I) et en considérant une seule fréquence L1 en deux approches; GPS uniquement et GPS + EGNOS.



FIG. IV. 4. Localisation des sites utilisés dans cette étude

Les positions pour chaque site sont calculées à chaque pas de temps défini précédemment (10 seconds) et les messages de corrections EGNOS provenant des satellites géostationnaires S120 et S123 ont été utilisés. Les coordonnées exactes de chaque site ont été utilisées pour comparer les erreurs de positions et analyser l'impact des corrections EGNOS sur la précision du positionnement par GPS.

En premier temps, les coordonnées précises de chaque site en mode différentiel ont été calculé, où le site 305 à Oran est utilisé comme position de référence connue, ce site fait partie du réseau TYRGEONET (*Tyrrhenean Geodetic Network*). Le projet international TYRGEONET, mené conjointement par le CNTS (*Centre Nationale des Techniques Spatiales*), l'INCT (*Institut National de Cartographie et de Télédétection*) et l'INGV (*Istituto Nazionale di Geofisica / Italie*), avait pour objectif la mise en place d'un réseau GPS précis, couvrant essentiellement la mer Tyrrhénienne et la Méditerranée occidentale, pour les applications géodynamiques [Kahlouche S. et al, 1998].

Les données collectées sur une cinquantaine de sites situés au sud de l'Europe et aux deux sites algériens (Arzew et Alger) durant une semaine entre 1995 et 2002, et traitées avec le logiciel Bernese 4.2, et sont fournies dans le système ITRF (*International Terrestrial Reference Frame*) avec une précision centimétrique.

Le site Tyrgeonet d'Arzew (305) ayant été pris comme point de référence, la position exacte de chaque site a été obtenue par le logiciel commercial TBC (*Trimble Business Center*) de la société Trimble avec les deux fréquences (L1, L2) et les éphémérides précises, ce logiciel permet d'obtenir des précisions centimétriques; la précision de chaque site est donnée par le tableau IV.4.

TAB. IV.4. Précision des coordonnées pour chaque site (en mètres)

Sites	Date	DoY	$\sigma_{\Delta X}$	$\sigma_{\Delta Y}$	$\sigma_{\Delta Z}$
Oran (305)	13/03/2018	(072)	/	/	/
Alger (ASAL)	09/04/2018	(099)	0.007	0.009	0.017
Bejaia (B02)	08/05/2018	(128)	0.024	0.030	0.011
Bir Sbaa (BRS)	15/11/2018	(319)	0.003	0.001	0.002

En second lieu, l'analyse a été effectuée selon deux approches; la première utilise uniquement les observations GPS en mode absolu SPP (*Single Point positioning*) [gAGE, 2017(b)], tandis que la seconde utilise les corrections différentielles d'EGNOS en mode SBAS [gAGE, 2017(c)]

IV.3.2 Traitement et analyse des résultats selon les composantes horizontales et verticales

La position précise de chaque site est déterminée avec une grande précision, ce qui nous permet d'évaluer correctement l'erreur de position PE (*Position Error*). Les erreurs de positionnement à une époque donnée sont calculées comme étant la différence entre la position exacte et la position mesurée pour chaque site, elles sont exprimées sur le plan horizontal et sur l'axe vertical. Le calcul de ces erreurs est fonction du repère dans lequel sont exprimées ces coordonnées. On note (X, Y, Z) les coordonnées de la position de référence dans le repère cartésien.

L'erreur de position horizontale, notée HPE (*Horizontal Position Error*), est définie dans le repère cartésien comme une fonction du temps (t) par [Oliveira J. and Tiberius C., 2009] :

$$HPE(t) = \sqrt{(X_{\text{exacte}}(t) - X_{\text{mesurée}}(t))^2 + (Y_{\text{exacte}}(t) - Y_{\text{mesurée}}(t))^2} \quad (\text{IV. 1})$$

L'erreur selon l'axe vertical, notée VPE (*Vertical Position Error*), est définie dans le repère cartésien comme une fonction du temps (t) par :

$$VPE(t) = |Z_{\text{exacte}}(t) - Z_{\text{mesurée}}(t)| \quad (\text{IV. 2})$$

Le tableau IV.5 donne une comparaison de l'erreur de position en utilisant GPS uniquement et GPS + EGNOS. Les erreurs de position horizontale et verticale à des niveaux de confiance de 95% sont obtenues pour chaque site.

TAB. IV.5. Erreur de position horizontale et verticale

Site	DoY 2018	GNSS	HPE(m)	VPE(m)
Oran(305)	072	GPS	2.78	6.05
		GPS+EGNOS	1.68	1.47
Alger(ASAL)	099	GPS	3.65	5.02
		GPS+EGNOS	1.51	1.44
Bejaia(B02)	128	GPS	2.37	3.84
		GPS+EGNOS	1.58	1.46
Bir Sbaa(BRS)	319	GPS	2.39	3.33
		GPS+EGNOS	1.65	1.52

Nous remarquons que les résultats obtenus pour les quatre sites, confirment que la précision du positionnement absolu du GPS+EGNOS est nettement améliorée par rapport au GPS uniquement. Selon le tableau IV.5, l'erreur de position horizontale et verticale du GPS + EGNOS est inférieure à 1,68 mètre (95%). Toutefois, dans le GPS uniquement, l'erreur de position horizontale peut atteindre 3.65 mètres et l'erreur de position dans l'axe vertical peut dépasser 6 mètres. Plus particulièrement, en raison de l'absence de station RIMS en Algérie, la valeur minimale de l'erreur de position horizontale et verticale est de l'ordre de 1.51 mètre et 1.44 mètre a été observé à Alger en utilisant GPS+EGNOS, alors que la valeur maximale de l'erreur de position verticale (de l'ordre de 1.52 mètres) est observée à Bir Sbaa.

L'amélioration de la précision verticale du GPS+EGNOS est meilleure que celle de GPS dans l'axe vertical, principalement due à la meilleure correction des erreurs ionosphériques par rapport au GPS uniquement; ces résultats sont similaires à ceux publiés par d'autres études [Zahidul M. et al. 2017], qui indiquent paradoxalement que l'erreur de position verticale est meilleure que l'erreur de position horizontale. On peut constater que les corrections EGNOS sont disponibles pour les quatre sites, qui se trouvent dans une zone couverte par les stations Européennes et celles des pays voisins le Maroc (Agadir) et la Tunisie (Djerba).

Les erreurs de positionnement pour les composantes horizontale et verticale sont présentées sur la même figure, ce qui permet d'observer l'amélioration obtenue en utilisant les corrections EGNOS. Les figures IV.5 et IV.6 illustrent la différence entre les coordonnées calculées et les coordonnées exactes de chaque site en utilisant GPS sur la fréquence L1 (couleur bleu) ainsi que celles calculées par GPS+EGNOS, présentées en rouge.

Pour chaque site, la figure IV.5 montre la dispersion de l'erreur de position dans les composantes Nord et Est (ce qui correspond à l'erreur de position horizontale) pour GPS et GPS+EGNOS.

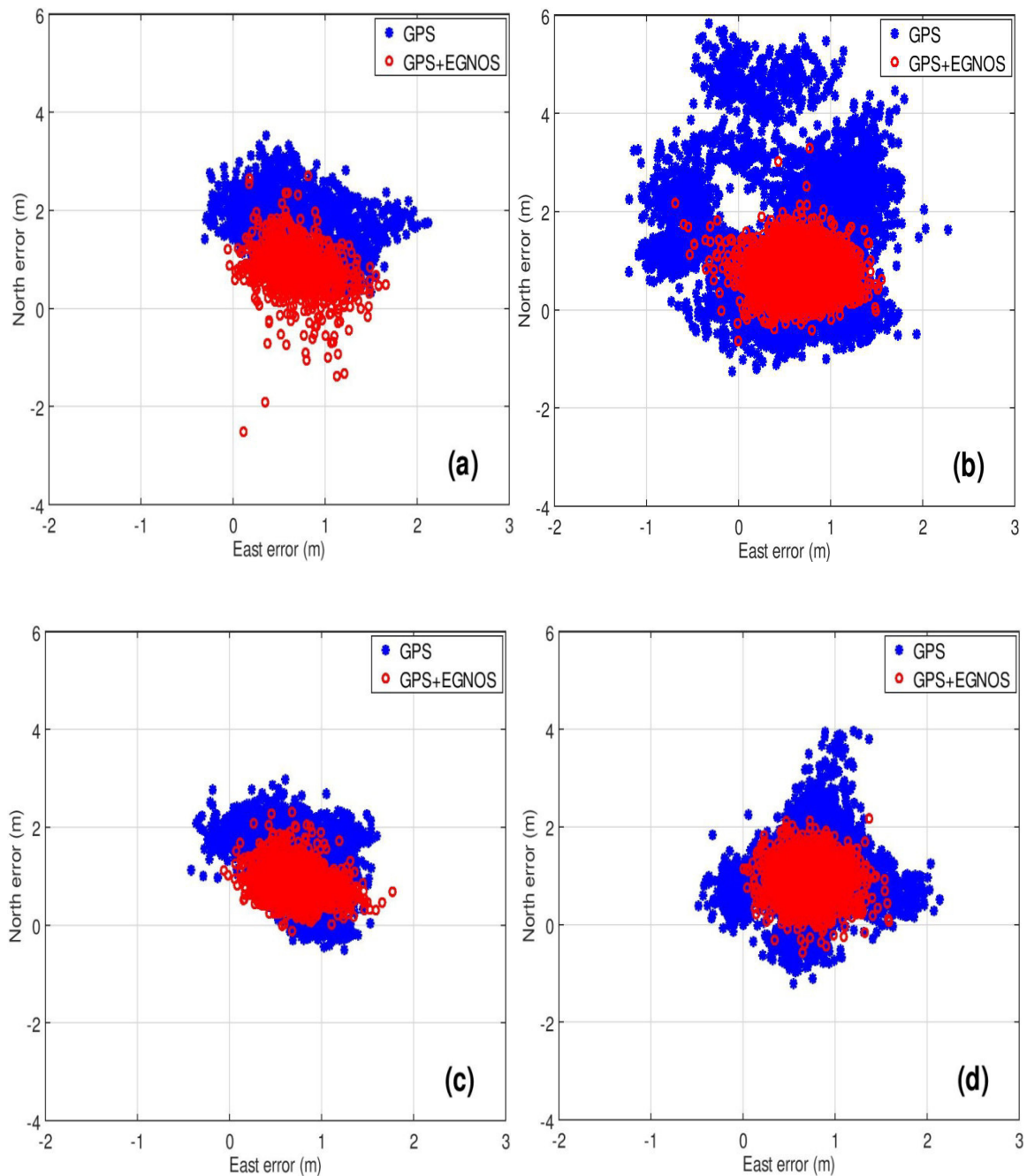


FIG. IV.5. Visualisation des erreurs de position entre le GPS et le GPS+EGNOS sur les composantes Nord et Est pour les quatre sites ((a): Oran, (b): Alger, (c): Bejaia, (d): Bir Sbaa)

À partir de la figure IV.5 on remarque visuellement que le nuage de points est moins dispersé dans le GPS+EGNOS, ce qui correspond à des erreurs plus faibles que dans le GPS uniquement, et que l'erreur sur la composante Est est limitée à environ 1,5 mètre, alors qu'elle est d'environ 2 mètres pour la composante Nord en utilisant les corrections EGNOS.

Tandis que pour le cas de GPS uniquement, l'erreur pour les composantes Nord et Est peuvent atteindre respectivement 3 et 6 mètres; ce qui montre clairement l'amélioration de la précision à l'aide des corrections EGNOS.

En fait, cette amélioration est encore plus marquée si l'on examine la composante verticale (Up), la figure IV.6 montre la comparaison de l'erreur verticale avant et après l'ajout des corrections EGNOS.

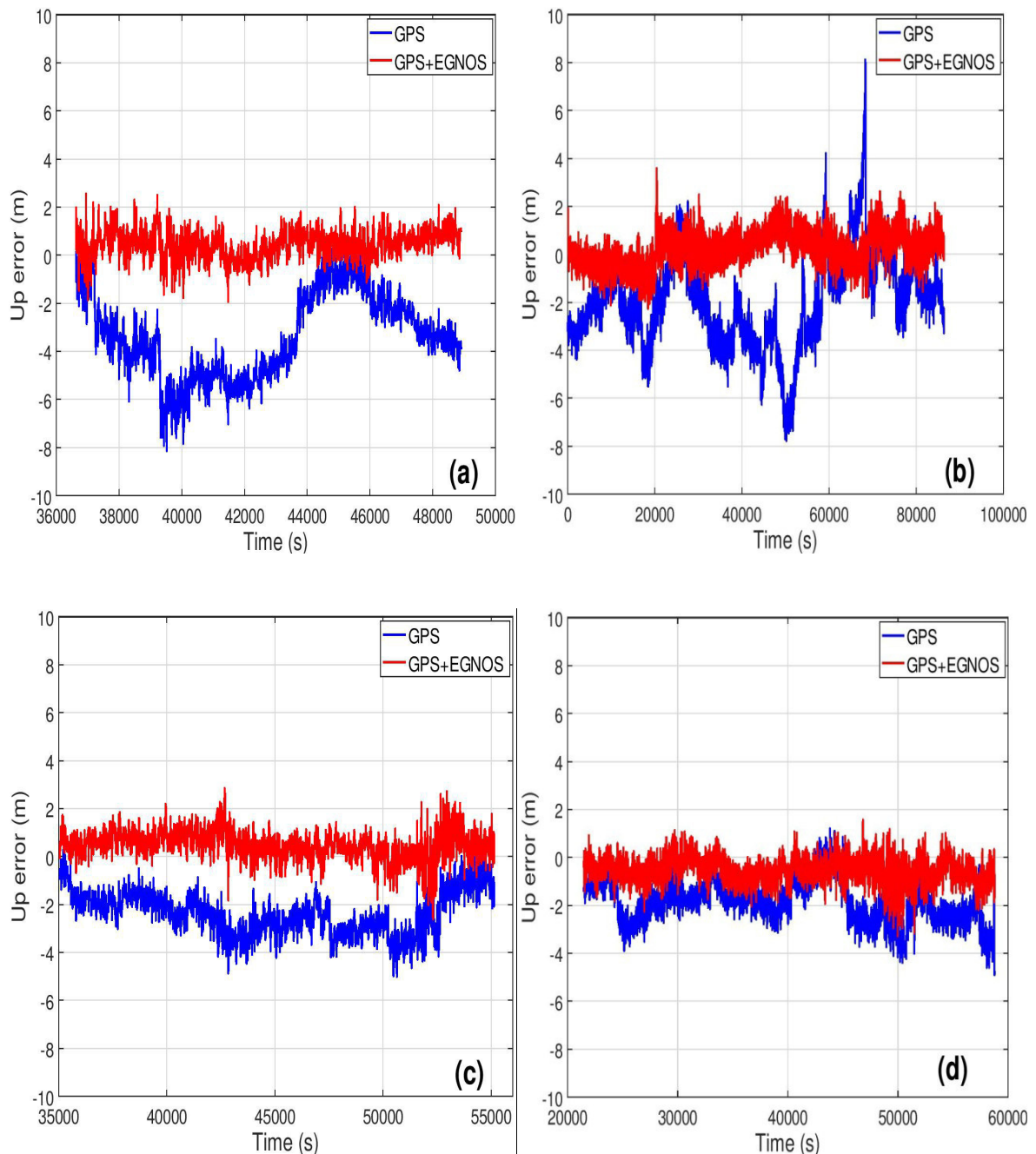


FIG. IV.6. Comparaison de l'erreur de position verticale entre le GPS et le GPS+EGNOS pour les quatre sites ((a): Oran, (b): Alger, (c): Bejaia, (d): Bir Sbaa)

Pour les quatre sites, l'erreur maximale en composante verticale pour le GPS+EGNOS est comprise entre -2 et 2 mètres pour la période d'observation, alors qu'elle est entre -8 et 8 mètres avec le GPS uniquement. Cela montre que la précision est encore améliorée par l'application des messages de correction EGNOS.

Dans les Figures (IV.6. b) et (IV.6. c), on observe notamment à $t = 20000$ s et $t = 43000$ s respectivement, un pic conduisant à une perte de l'amélioration de la précision en GPS corrigé par EGNOS. A ces époques, certains satellites sont affectés par un glissement de cycle, et après un glissement, le traitement EGNOS nécessite 360 secondes pour faire converger le lissage et utiliser à nouveau le satellite; alors que dans le GPS il n'y a pas besoin d'attendre le lissage.

IV.3.3 Traitement et analyse des résultats en 3 D (X, Y, Z)

Afin de permettre une meilleure représentation des performances de positionnement, la figure IV.7 présente les résultats des coordonnées déterminées par les deux approches GPS avec et sans EGNOS.

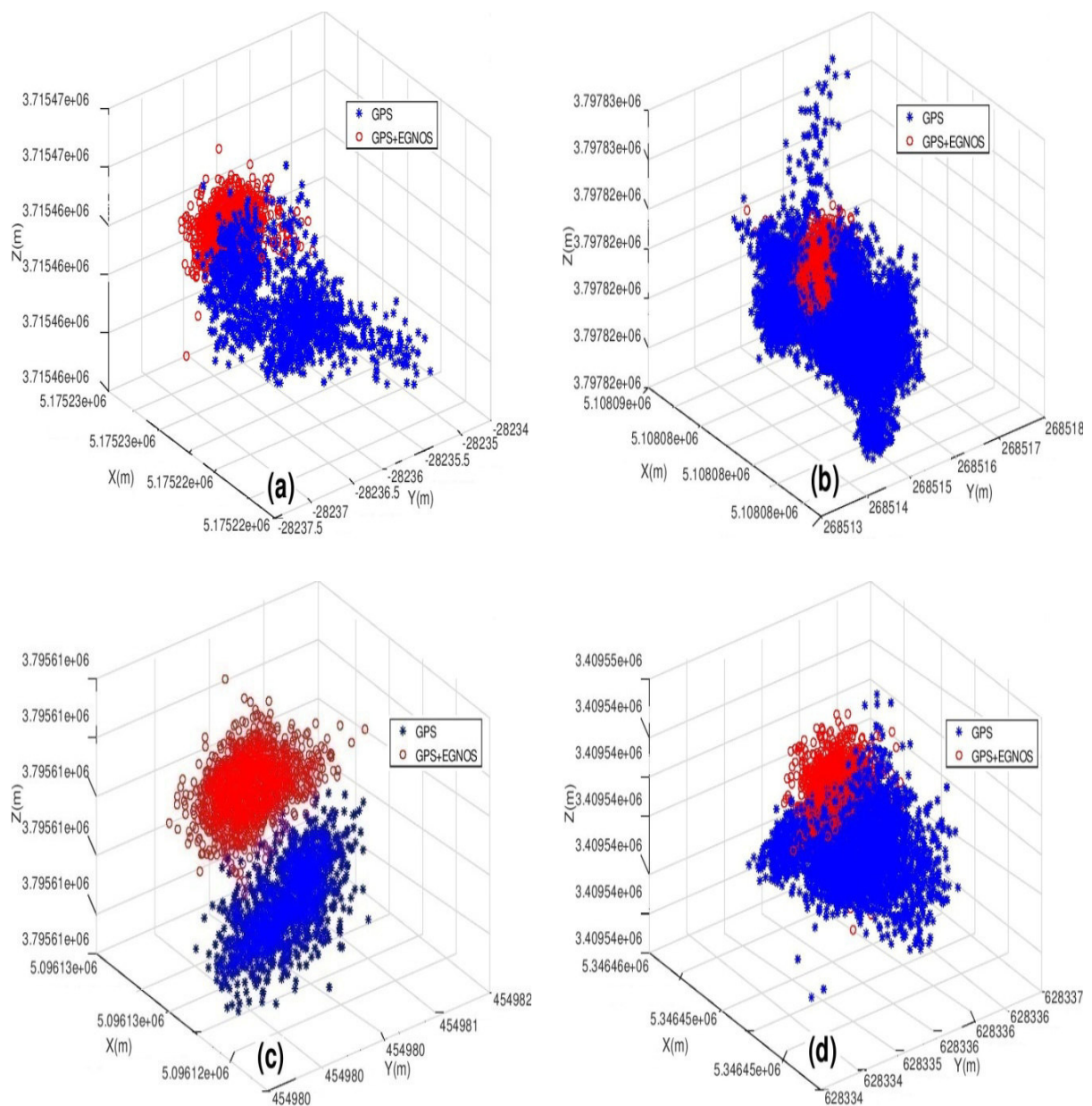


FIG. IV.7. Positions absolues pour chaque site en utilisant GPS uniquement (bleu) et GPS+EGNOS (rouge) pour les quatre sites ((a): Oran, (b): Alger, (c): Bejaia, (d): Bir Sbaa)

À partir de ces figures, on peut constater que les coordonnées calculées par GPS+EGNOS sont moins dispersées. Afin d'obtenir des résultats quantitatifs, une analyse statistique des écarts-types pour chaque coordonnée a été menée. Le tableau ci-dessous (TAB. IV.6) donne plus de détails sur la précision de ces coordonnées en calculant l'écart-type en X, Y et Z pour chaque site.

TAB. IV.6. Écart-types (en mètres)

	GPS			GPS+EGNOS		
	X	Y	Z	X	Y	Z
Oran	1.42	0.52	0.99	0.57	0.26	0.48
Alger	1.85	0.53	1.34	0.57	0.26	0.54
Bejaia	0.91	0.44	0.63	0.50	0.27	0.42
Bir Sbaa	1.05	0.40	0.62	0.42	0.22	0.39

La précision de position a été significativement améliorée grâce à l'application de corrections EGNOS pour chaque coordonnée des quatre sites, principalement dû à l'amélioration de correction ionosphérique. En examinant le tableau IV.6, on constate que les corrections EGNOS ont amélioré l'écart-type par rapport au GPS uniquement. En particulier l'écart-type maximal en Z pour le site d'Alger passe de 1.34 mètre à 0.54 mètre, ce qui est loin d'être négligeable, on peut prétendre que l'impact des corrections EGNOS est très marqué. Cette amélioration permet de constater que l'ajout des corrections EGNOS permet une autre fois de confirmer l'amélioration de la précision de position. Les positions du GPS uniquement sont basées sur des mesures à une seule fréquence et sur le modèle ionosphérique de Klobuchar.

IV.4 Modélisation des corrections transmises par EGNOS

Les données EGNOS diffusées par les satellites géostationnaires permettent d'implémenter plusieurs types de corrections :

- Corrections de pseudo-distance;
- Corrections de positions satellites (erreurs d'éphémérides et des horloges satellites);
- Corrections ionosphériques qui permettent de corriger les erreurs de propagation dans l'estimation fournie par le récepteur.

L'objectif d'EGNOS est de tenir compte l'état de chaque satellite GPS, et de corriger les pseudo-distances sur chaque satellite à l'aide des messages transmis par le système et élimine les satellites déclarés '*Non utilisables*' si une anomalie est détectée et '*non surveillés*' si les informations sur ce satellite sont insuffisantes pour assurer sa surveillance [Liu J. et al, 2012]. À titre d'illustration, la figure IV.8 présente le nombre de satellites GPS utilisés pour calculer les coordonnées du site d'Alger.

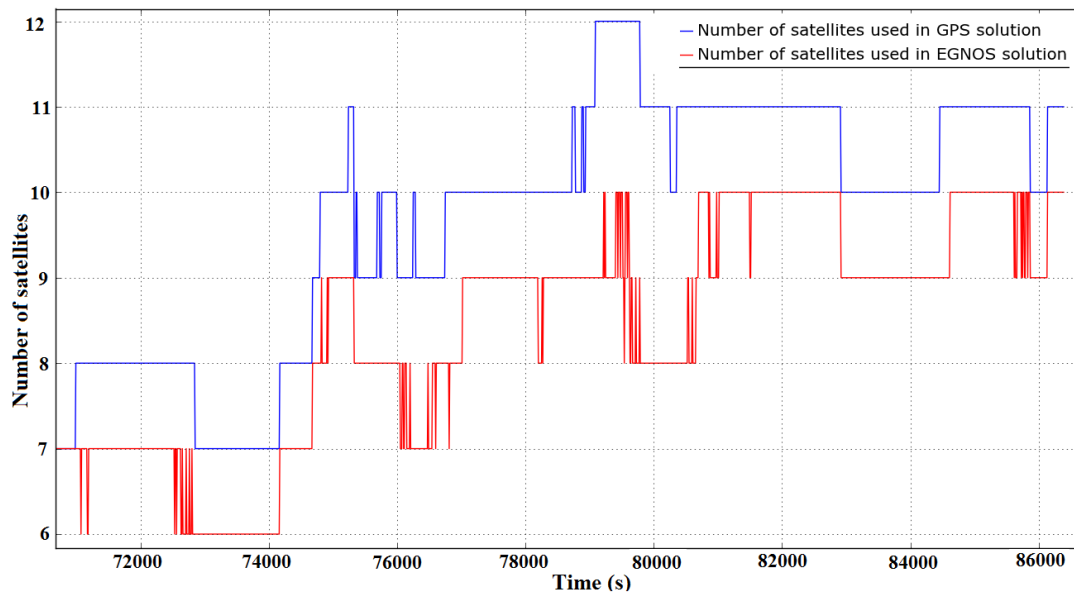


FIG. IV.8. Nombre de satellites utilisés pour la solution de navigation EGNOS (en rouge) par rapport au nombre de satellites utilisés dans la solution GPS (en bleu) au site d'Alger

La figure IV.8 présente le nombre de satellites GPS surveillés par EGNOS; on remarque que le nombre de satellites utilisés par le GPS est compris entre 7 et 12, ce nombre est diminué avec EGNOS. En particulier, le temps entre 79000 et 80000 secondes, 8 à 10 satellites sont utilisés par EGNOS, alors que dans le GPS il y avait 10 à 12 satellites; ce qui signifie que le système EGNOS a exclu certains satellites GPS, ce qui a un impact direct sur la précision du positionnement. Ces satellites sont :

- PRN 9, et PRN 23 : satellites signalés comme "*Non surveillés*".
- PRN 6, PRN 7 : les satellites ne sont pas utilisés car les points de pénétration de l'ionosphère sont à l'extérieur de la grille ionosphérique.
- PRN 32 : satellite signalé par "*ne pas utiliser*" pour une période d'observation.
- PRN 4 et PRN 18 : satellite n'est pas dans le masque "*ne pas utiliser*".

Pour les satellites non surveillés; cela est probablement dû à l'absence de station RIMS en latitude [25° 30°] sur le territoire Algérien, donc les corrections EGNOS ne sont pas fiables pour les satellites suivis dans cette zone.

Par conséquent, les corrections sur ces satellites non utilisés peuvent être disponibles si une station RIMS est installée dans le pays [Tabti L. et al, 2018].

IV.4.1 Impact des corrections rapides sur la précision du positionnement

Comme il était prévu, l'application de toutes les corrections EGNOS (corrections rapides, lentes et ionosphériques) permet d'obtenir une meilleure précision en comparant avec le GPS uniquement. Il est intéressant d'examiner les résultats obtenus en analysant l'impact de chaque correction transmise par EGNOS sur la précision du positionnement. Le site d'Alger

(ASAL) a été considéré, ce site a été observé pendant une période de 24 heures. L'impact des corrections rapides a été analysé en comparant l'erreur de position avec et sans corrections rapides, tel que présenté par le tableau IV. 7 et la figure IV.9.

TAB. IV.7. Impact des corrections rapides sur l'erreur de position en mètres

	<u>HPE(m)</u>	<u>VPE(m)</u>
GPS uniquement	3.65	5.02
EGNOS avec correction rapide	1.51	1.44
EGNOS sans correction rapide	3.71	4.45

L'erreur horizontale et verticale passe de 3.71 mètres à 1.51 mètres et 4.45 mètres à 1.44 mètres respectivement à des niveaux de confiance de 95%. On constate que, La non application de correction rapide dégrade fortement la précision (moins bonne que pour le GPS uniquement). Ces résultats ont été confirmés par une étude de **[Jimenez-Baños D. et al, 2011]**, qui ont analysé l'impact de chaque correction sur la précision du positionnement. Cette étude a montré que l'application des corrections lentes sans tenir compte des corrections rapides permet de dégrader la précision horizontale (2.69 mètres) et verticale (4.40 mètres) à 95 %.

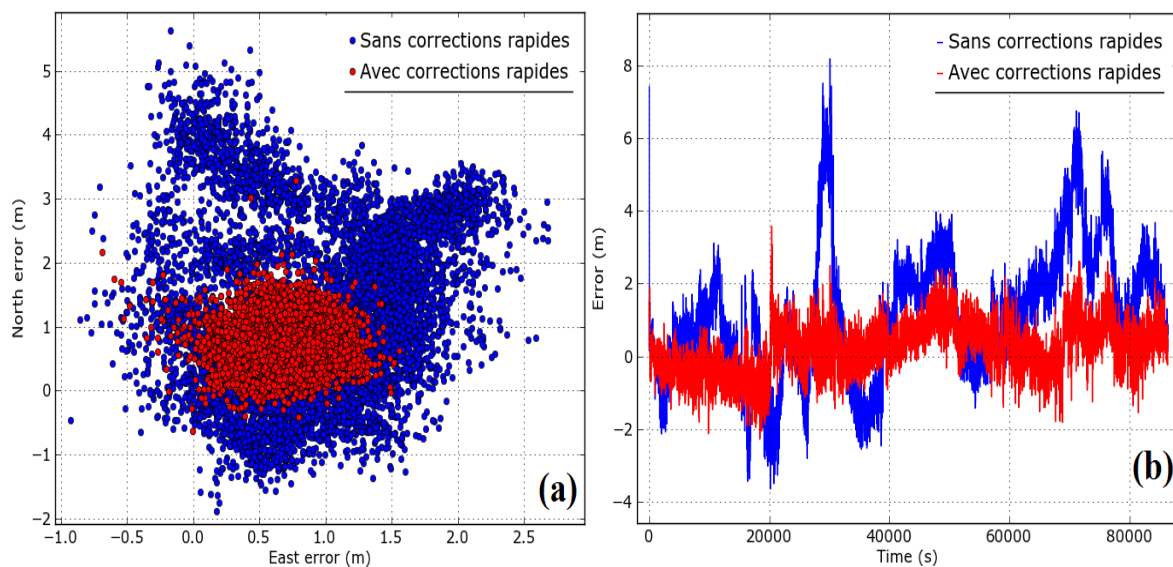


FIG. IV.9. Impact des corrections rapides sur l'erreur horizontale (a) et verticale (b)

En examinant la figure IV.9, on constate que les corrections rapides ont un impact significatif sur la précision du positionnement, quand les corrections rapides ne sont pas prises en considération, ceci additionne typiquement une erreur d'environ 8 mètres. Les satellites GEO émettront donc les messages de corrections rapides (message de type 2-5), qui sont émis au moins une fois par minute **[Bureau des radiocommunications, 2010]**. Il a été possible de faire une évaluation visuelle de l'ordre de grandeur de ces corrections, la figure IV.10 montre les corrections rapides transmises par EGNOS pour chaque satellite GPS.

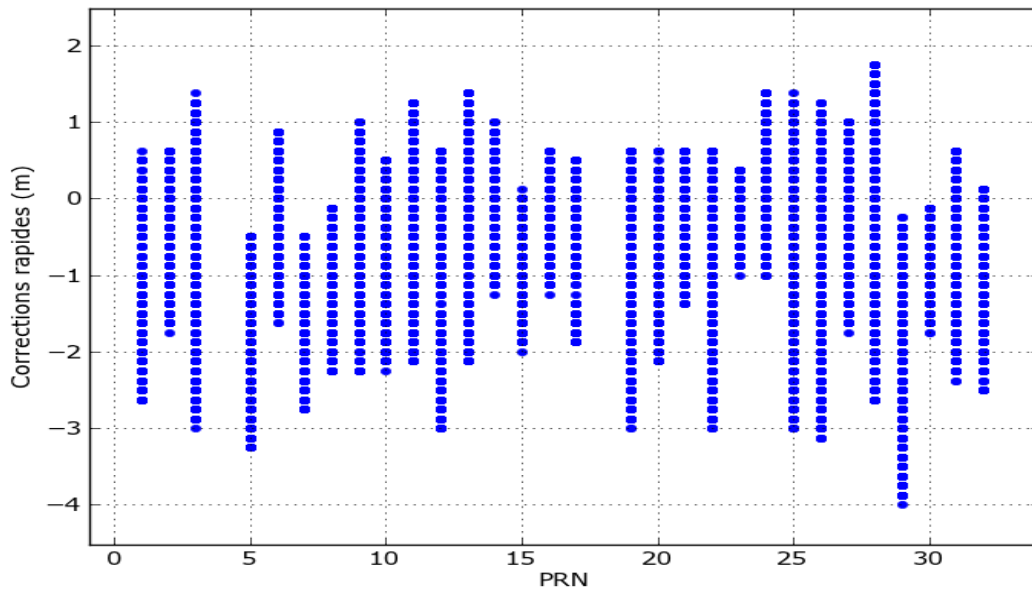


FIG IV.10. Valeur des corrections rapides en mètres pour chaque satellite GPS

Cette figure permet de constater que les corrections rapides sont disponibles pour tous les satellites, exceptés pour le satellite PRN 4 et PRN 18, ils ont été considérés comme des satellites qui ne sont pas dans le masque du système EGNOS pendant toute la durée d'observation.

Cette constatation est bien confirmée si l'on compare l'état de surveillance de chaque satellite GPS au site ESSP (<https://egnos-user-support.essp-sas.eu/>). La figure IV.11 montre l'état de surveillance d'EGNOS pour chaque satellite GPS en fonction des indicateurs de précision UDREI (*User Differential Range Error Indicator*) pour la même journée d'observation le 09 avril 2018 (DoY 99).

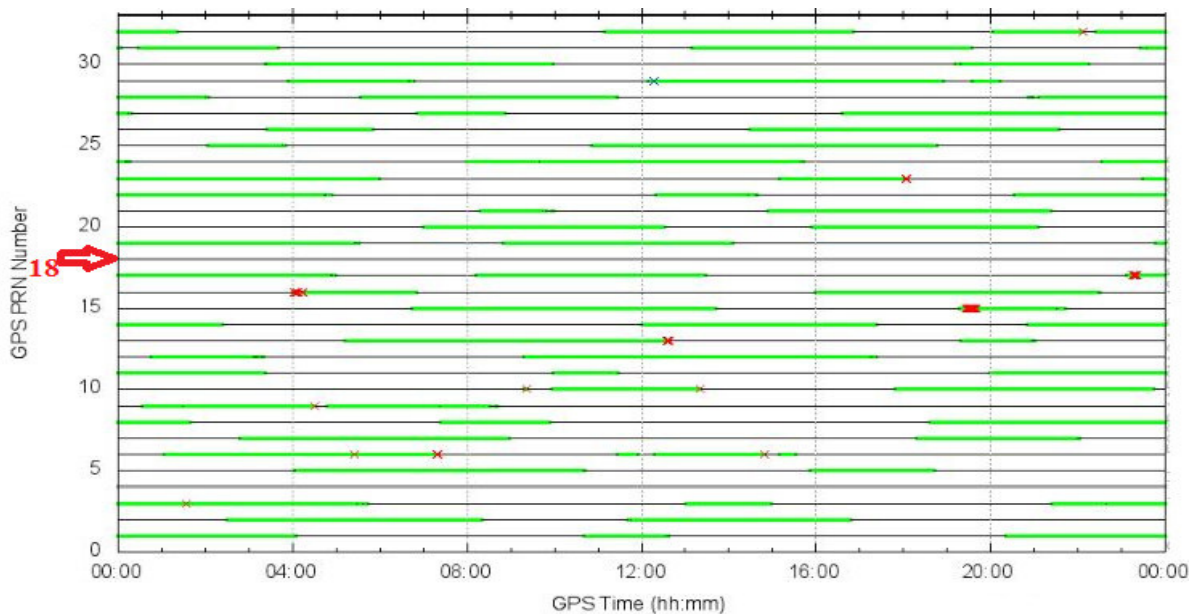


FIG. IV.11. Etat de surveillance de chaque satellite GPS par EGNOS (Vert : satellite surveillé, gris : n'est pas dans le masque, rouge : satellite n'est pas utilisé)

IV.4.2 Impact des corrections lentes sur la précision du positionnement

Les corrections d'orbite et d'horloge des satellites se retrouvent dans le message de types 24 et 25 et sont actualisées toutes les deux minutes (120 secondes). L'impact des corrections lentes a été aussi analysée en comparant l'erreur de position avec et sans corrections lentes. Les résultats sont présentés dans le tableau IV.8 et sur les figures IV.12(a) et IV.12(b). En analysant ces deux figures, on remarque très clairement l'impact des corrections lentes sur l'erreur de position.

TAB. IV.8. Impact des corrections lentes sur l'erreur de position en mètres

	<u>HPE(m)</u>	<u>VPE(m)</u>
GPS uniquement	3.65	5.02
EGNOS avec correction lente	1.51	1.44
EGNOS sans correction lente	2.64	4.54

Le même impact peut être observé sur les erreurs horizontale et verticale. La figure IV.12 montre bien la réduction de l'erreur lorsque les corrections lentes sont appliquées. La valeur de cette erreur sur le plan horizontal et l'axe vertical passe de 3.65 mètres à 1,51 mètre et de 5.05 mètres à 1.44 mètres respectivement; ce qui est loin d'être négligeable. On peut clairement constater que, l'application des corrections d'orbite et d'horloge transmises par EGNOS améliore sensiblement la précision de positionnement par rapport au GPS uniquement.

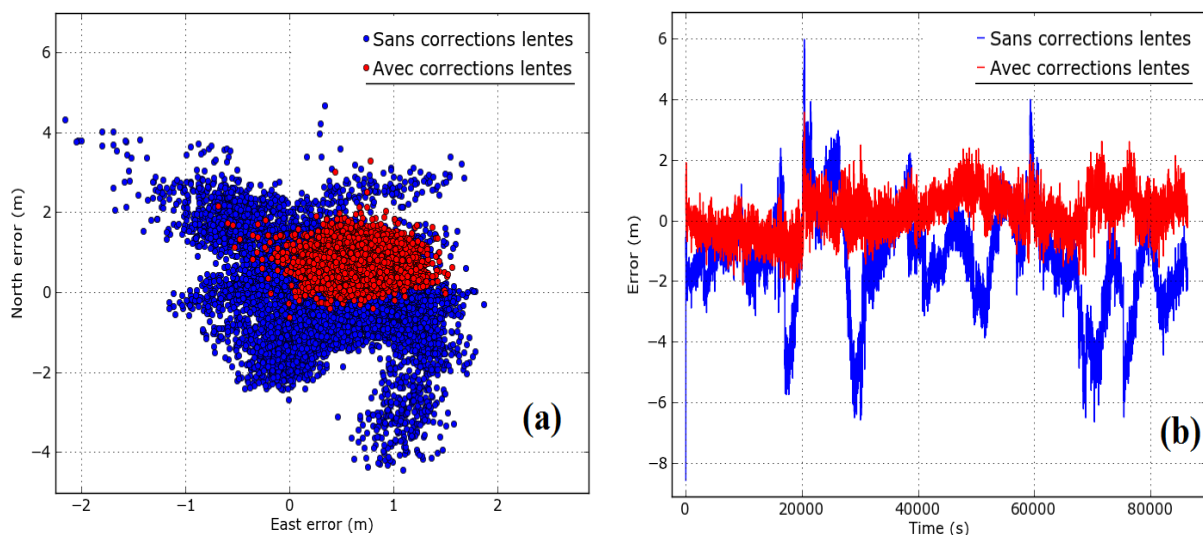


FIG. IV.12. Impact des corrections lentes sur l'erreur horizontale (a) et verticale (b)

On peut voir que l'impact des corrections lentes sur la composante horizontale et verticale atteint 4 mètres et 6 mètres respectivement. La figure IV.13 présente les valeurs obtenues pour la correction des composantes X, Y, Z de la position des satellites observés, tandis que le paramètre (t) représente la correction d'horloge RC_{clock} transposé en mètre pour la journée du 09 Avril 2018 (DoY 99).

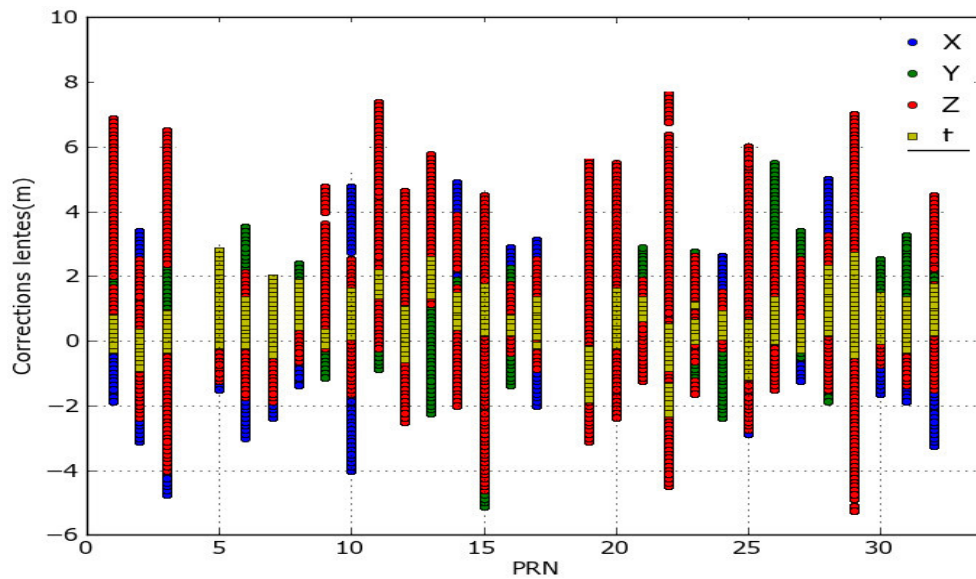


FIG.IV.13. Valeur des corrections lentes en mètres pour chaque satellite GPS

Il convient également de noter que la contribution des corrections rapides et lentes a le même impact sur la précision de positionnement. L'impact de la combinaison des corrections rapides et lentes a été aussi étudié par **[Jimenez-Baños D. et al, 2011]**. L'étude a montré que la non prise en compte des corrections rapides et lentes en même temps conduit à une erreur horizontale de 1.55 mètre et verticale de 2.41 mètres à 95 %.

IV.4.3 Impact des corrections ionosphériques sur la précision du positionnement

L'analyse de l'impact des corrections ionosphériques a été effectuée en comparant les corrections ionosphériques du modèle Klobuchar dans le positionnement standard GPS (SPP) avec les corrections ionosphériques fournies par EGNOS. Ces corrections sont transmises dans les messages complémentaires du système EGNOS. Cette correction très améliorée fournit des données de retard ionosphérique en quasi-temps réel; ils sont obtenus à partir d'un réseau de stations de référence utilisées pour produire une grille de corrections du retard ionosphérique équivalent en des points de la région couverte espacés de 5° en latitude et en longitude, comme cela est décrit au Chapitre III (section III.2.3) consacré aux corrections ionosphérique transmises par EGNOS.

La figure IV.14 (a) donne une comparaison de la correction ionosphérique calculée sur le site d'Alger à partir du modèle Klobuchar par rapport à la correction diffusée par EGNOS. Le modèle Klobuchar est un modèle simple de correction standard utilisée par la quasi-totalité des récepteurs GPS mono-fréquence en temps réel **[Su K. et al, 2019]**; il est transmis dans le message de navigation des satellites, ce modèle est présenté au chapitre I.

La figure montre également les angles d'élévation des satellites IV.14. (b); les corrections ionosphériques diminuent avec l'augmentation de l'élévation. On remarque que l'époque où la correction est au minimum présente l'époque où l'angle d'élévation est le plus grand, conformément avec la théorie qui confirme que les satellites à basse élévation sont les plus affectés par les délais ionosphériques **[Kaplan E.D. and Hegarty C.J., 2006]**.

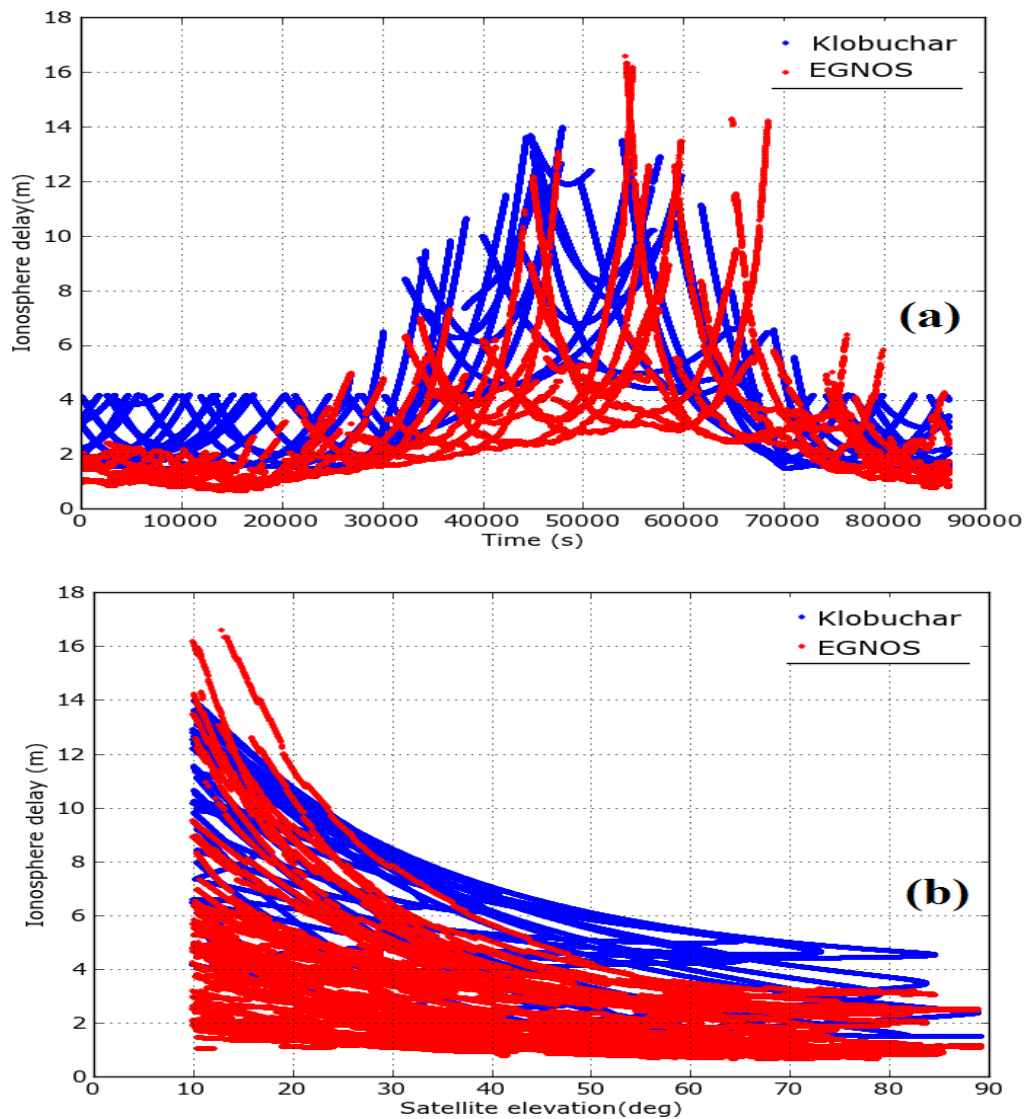


FIG. IV. 14. Corrections ionosphériques pour tous les satellites GPS obtenues à partir du modèle Klobuchar (bleu) d'une part et à partir des corrections diffusées par EGNOS (rouge) d'autre part

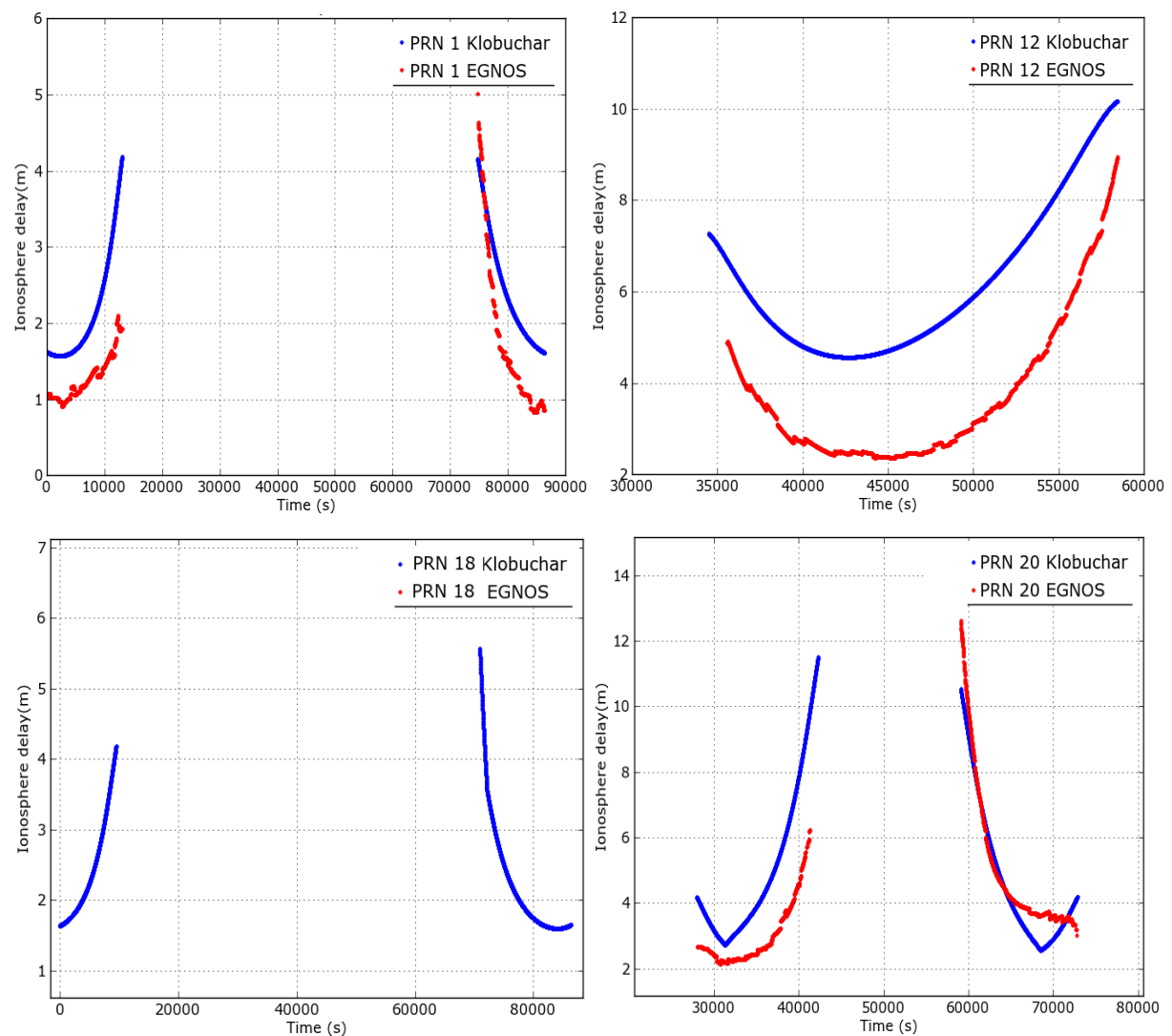
Les valeurs de la correction (GPS+EGNOS) du délai ionosphérique ont été tracées, à la figure IV.14, pour la journée du 09 Avril 2018 (*DoY 99*). Sur cette figure, chaque courbe représente un satellite différent. Le graphique montre que le délai ionosphérique peut varier très rapidement dans le temps. De plus, l'amplitude de la variation de ce délai n'est pas constante pour toute la durée de la journée et elle est aussi différente pour chacun des satellites. Les amplitudes maximales sont notées lorsque l'heure locale avoisine 14 h (50400 secondes).

On constate que les corrections ionosphériques utilisant EGNOS sont inférieures aux valeurs diffusées par GPS en utilisant le modèle Klobuchar; les valeurs sont entre 1 et 2 mètres, et elles peuvent aller jusqu'à 8 mètres lorsque les satellites sont à basses élévations ($<5^\circ$), tandis que pour le GPS uniquement basé sur le modèle Klobuchar, la correction ionosphérique varie particulièrement de 2 à 4 mètres environ, et peut atteindre 14 mètres

quand les satellites sont proches de l'horizon. Les résultats obtenus à partir de la grille ionosphérique transmise par EGNOS (figure IV.14) montrent que l'utilisation des observations sur L1 seulement donne des résultats meilleurs, en termes de précision verticale du positionnement, que ceux obtenus par GPS uniquement.

La Figure IV.15 donne les corrections ionosphériques calculées par le GPS et GPS+EGNOS pour la date du 9 Avril 2018 à Alger pour les PRN 1, 12, 18, 20, 27 et PRN 28; on y constate que le modèle Klobuchar et la grille EGNOS évoluent de la même manière, avec une différence aux alentours de deux mètres entre ces deux modèles. Toutefois, on ne peut pas valider lequel des deux modèles est le plus précis.

Il apparaît incontestablement que pour les cinq satellites : PRN 1, 12, 20, 27 et PRN 19, la correction ionosphérique calculée à partir du modèle Klobuchar est continue, contrairement aux corrections diffusées par EGNOS qui présentent des discontinuités (courbe en rouge). En observant la correction ionosphérique du PRN 18, on remarque clairement qu'aucune correction ionosphérique n'est fournie par le système EGNOS; ce satellite n'a pas été surveillé par les stations RIMS du système EGNOS, comme le montre la figure IV.11.



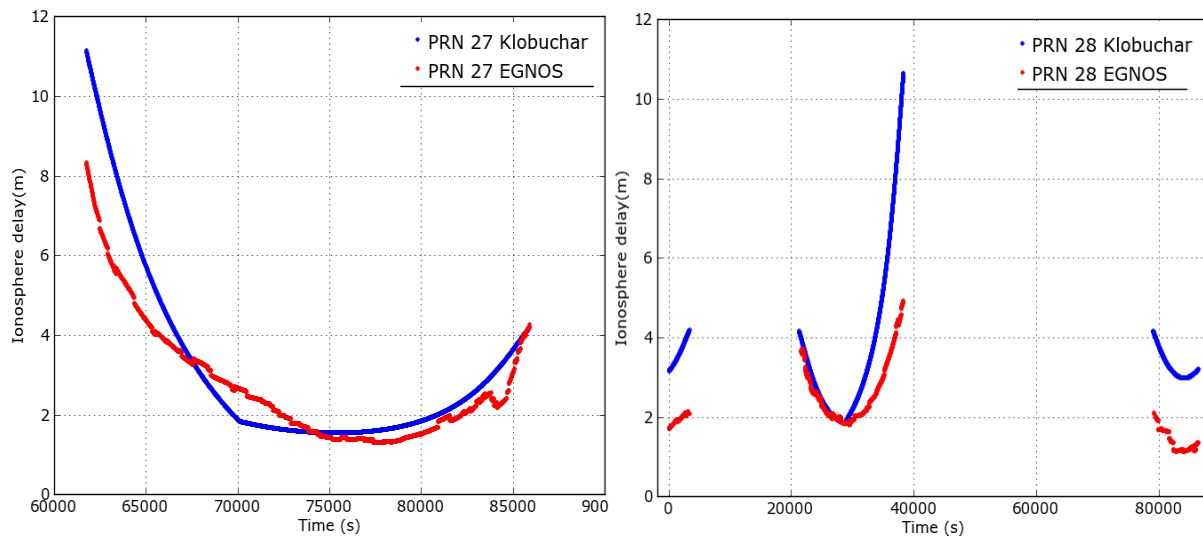


FIG. IV.15 Délai ionosphérique pour les satellites PRN 1, 12, 18, 20, 27 et PRN 28

IV.4.4 Impact de biais de code différentiel (DCB) sur le GPS+EGNOS

Il peut s’avérer intéressant d’examiner l’influence du biais de code différentiel (DCB) sur la précision du positionnement des deux solutions; GPS et GPS+EGNOS pour les mêmes sites, les résultats sont présentés au tableau IV.9.

TAB. IV.9. Erreur horizontale et verticale (95%) sans correction du DCB

Sites	GNSS	HPE(m)	VPE(m)
Oran (305)	GPS	3.70	6.15
	GPS+EGNOS	4.44	9.15
Alger (ASAL)	GPS	4.95	8.56
	GPS+EGNOS	5.61	7.87
Bejaia (B02)	GPS	4.79	7.60
	GPS+EGNOS	3.97	9.48
Bir Sbaa (BRS)	GPS	4.97	8.43
	GPS+EGNOS	4.04	10.11

Comme le montre le tableau IV.9, comparé à celui de tableau IV.5 de la section IV.3.2 (*Traitement et analyse des résultats selon les composantes horizontales et verticales*), que l'erreur de position du GPS mono-fréquence varie de 3 à 4,97 mètres en horizontal et de 6 à 8,43 mètres en vertical sans corriger le DCB, cette erreur varie de 2 à 3,65 mètres en horizontal et de 3 à 6,05 mètres en vertical quand le DCB est corrigé.

L'erreur de position du GPS+EGNOS mono-fréquence varie de 3 à 5,61 mètres en horizontal et de 7 à 10,11 mètres en vertical sans corriger le biais différentiel du code (DCB), tandis que cette erreur varie de 1 à 1,68 mètre en horizontal et 1 à 1,52 mètre en vertical quand le DCB est corrigé. Les résultats indiquent que la précision du positionnement du GPS est meilleure

que le GPS+EGNOS en ignorant le DCB. Cela peut être expliqué par le fait que les corrections GPS (correction des éphémérides et/ou d'horloge, correction de DCB) doivent être appliquées en premier lieu, suivies de celles fournies par EGNOS [ESA, 2011].

IV.5 Performance temporelle du site 305 à Oran

Dans le but d'étudier la validité des résultats, une analyse a été effectuée sur des données collectées pour le site d'Oran en quelques dates de 2017 et 2018; ces données ont été traitées en deux approches GPS et GPS+EGNOS.

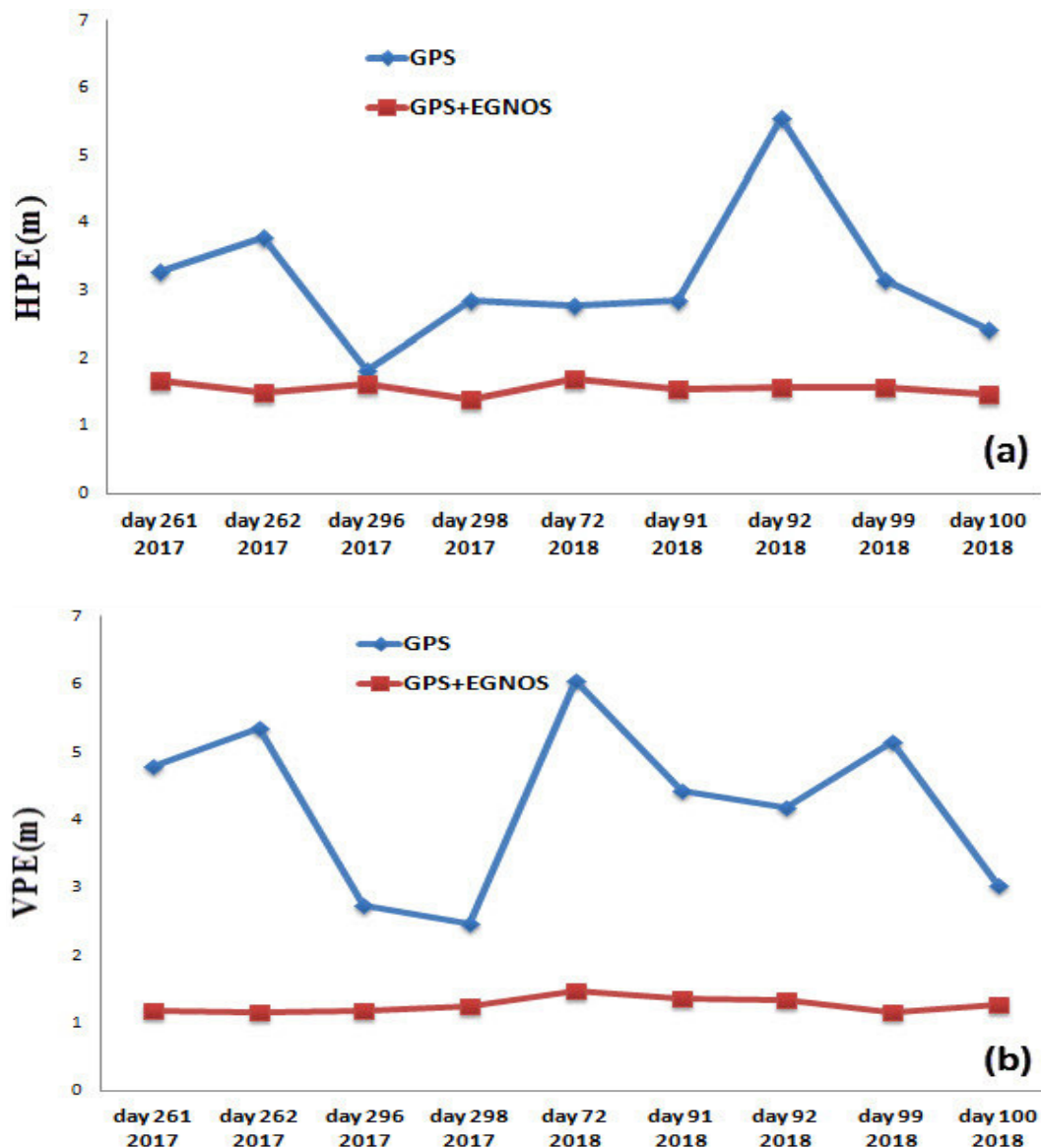


FIG. IV. 16 Erreur horizontale (a) et verticale (b) relativement à la position exacte du site d'Oran 305 durant 2017 et 2018

Les résultats (figure IV.16) ont confirmé que les corrections EGNOS ont une meilleure précision que le GPS uniquement, en particulier sur la composante verticale. Les performances d'EGNOS sont stables au même niveau sur quelques jours pour les années 2017 et 2018.

Sur le plan horizontal, la précision de positionnement en utilisant les corrections EGNOS est inférieure à 2 mètres. Néanmoins, dans le cas d'utilisation du GPS uniquement, cette erreur varie entre 1.80 et 6 mètres. Sur le plan vertical, la précision du positionnement en utilisant les corrections EGNOS est en moyenne de 1.5 mètres, alors que cette précision varie entre 2.5 et 7 mètres en utilisant le GPS uniquement.

IV.6 Conclusion

EGNOS est disponible en Europe et au Nord de l'Afrique, et il est actuellement en phase d'extension à toute la région Africaine. Il a été conçu pour des applications dans le domaine de l'aviation civile, mais il offre aussi d'intéressantes perspectives d'utilisation dans d'autres domaines : maritime, ferroviaire, routier, voies navigables intérieures, mobilité du personnel, agriculture, cartographie et géodésie

Dans ce chapitre, la solution GPS et GPS+EGNO par le logiciel gLAB a été comparée. Ce logiciel permet le traitement, en plus des données GPS, des messages EGNOS; ces messages portent sur les corrections dues à l'erreur de l'orbite et l'horloge du satellite, et l'erreur ionosphérique.

Les résultats de cette étude montrent que la précision du GPS corrigée par EGNOS est meilleure par rapport à celle du GPS uniquement; ceci est dû principalement aux corrections transmises par EGNOS, en particulier les corrections ionosphériques. La précision d'EGNOS est stable pendant plusieurs périodes d'observation.

Ces résultats nous permettent de conclure que l'ajout des corrections EGNOS à celles de GPS améliore de façon significative la précision verticale en utilisant seulement les observations sur la fréquence L1, spécialement lorsque le site se trouve dans une zone de service d'EGNOS.

Ce chapitre a porté sur l'amélioration de la précision de positionnement, la notion de confiance accordée à la position estimée est cruciale. Le chapitre suivant exprimera ce besoin pour des applications de l'aviation civile, avec une étude des performances préliminaires de faisabilité d'implantation de deux stations RIMS du système EGNOS en Algérie; une station à Oran et par la suite une deuxième à Adrar.

Chapitre V

Etude de faisabilité & choix optimal de stations RIMS d'EGNOS en Algérie

V.1 Introduction	94
V.2 Réseaux de stations RIMS.....	94
V.2.1 Types et fonctions des stations RIMS.....	96
V.2.2 Conditions d'installation d'une station RIMS.....	97
V.3 Choix optimal d'une station RIMS en Algérie.....	98
V.3.1 Site à Tamanrasset.....	98
V.3.2 Site au centre de l'Algérie.....	99
V.3.3 Site à Oran.....	100
V.4 Simulations et résultats pour la mise en place de deux stations RIMS en Algérie.....	101
V.4.1 Paramètres utilisés	102
V.4.2 Sites choisis.....	103
V.4.3 Disponibilité du système.....	104
V.4.4 Erreur sur la précision verticale de la grille ionosphérique.....	106
V.5 Analyse des performances du système EGNOS à partir des données réelles collectées sur les deux sites Oran et Adrar.....	109
V.5.1 Analyse de la précision pour les deux sites Oran et Adrar.....	109
V.5.2 Analyse de l'intégrité pour les deux sites Oran et Adrar.....	110
V.6 Conclusion	113

V.1 Introduction

EGNOS est un système satellitaire Européen du type SBAS destiné à améliorer et à garantir les performances de navigation de la constellation GPS initialement puis de GALILEO. Cette étude préliminaire de faisabilité d'implantation de deux stations RIMS (*Ranging and Integrity Monitoring Station*) du système EGNOS en Algérie, fait suite à une sollicitation de la Commission Européenne, et complète celle établie en septembre 2015 traitant des possibilités d'une seule station dont la latitude souhaitée est comprise entre 30° et 35° Nord.

Le choix d'un site au centre de l'Algérie a montré que les performances du système EGNOS sont les meilleures, en particulier dans la zone comprise entre [0°, 5°] en longitude et de [30°, 35°] en latitude.

Par la suite, le site d'Oran a été proposé par la Commission Européenne; les résultats préliminaires effectués en septembre 2015, ont montré que la mise en place d'un site à Oran n'apporte pas d'améliorations sensibles en positionnement temps réel, par rapport aux stations limitrophes (Europe du Sud et Agadir).

Néanmoins en août 2019, deux stations RIMS ont été proposées pour l'Algérie, un site à Oran et par la suite un site à Adrar. À cet effet, les conclusions finales sur l'opportunité de choix d'Adrar comme deuxième site, permettront de vérifier l'opportunité d'un choix optimal relativement au site initial unique et optimal au centre de l'Algérie.

L'objectif de ce chapitre est de présenter l'analyse liée à l'amélioration de l'extension du système EGNOS par l'introduction de deux stations RIMS en Algérie. L'amélioration de précision GPS en utilisant les corrections EGNOS pour les deux sites sélectionnés a été aussi étudiée, comparée et analysée.

V.2 Réseaux de stations RIMS

Les RIMS sont des stations de collecte de données et des informations concernant les satellites, les signaux GNSS et la traversée des signaux dans l'ionosphère, dans le but sont d'observer et vérifient le bon fonctionnement des satellites GPS.

Le système EGNOS permet la transmission des corrections différentielles et des messages d'intégrité pour les satellites de navigation observés par le réseau de stations de référence (RIMS), qui sont réparties sur la zone de service d'EGNOS. Certaines se trouvent en dehors de cette zone afin de disposer par anticipation de certaines informations. Le projet d'extension du système EGNOS vise à renforcer son segment terrestre dans le continent Africain et ce, par l'installation de stations RIMS dans les pays concernés. La liste des 39 stations RIMS et leur distribution géographique sont montrées à la figure V.1 et le tableau V.1, respectivement.

Il est clair d'après cette figure (FIG.V.1) que la répartition et le nombre de stations RIMS ne sont pas équitables entre la région Européenne et la région Africaine. On remarque qu'il y a environ 8 stations dans le continent Africain par rapport à l'Europe qui abrite plus de 30 stations.

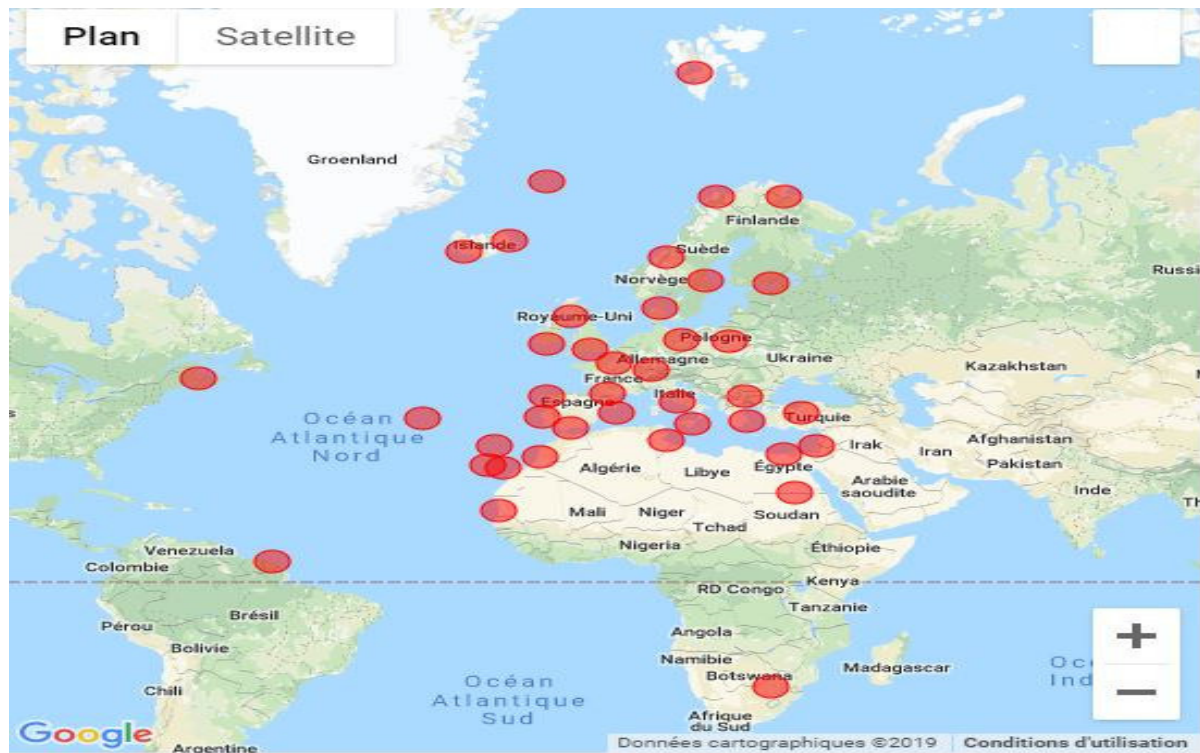


FIG. V.1. Distribution géographique des stations RIMS

TAB. V.1. Liste des stations RIMS actuelles

Id	Site	Pays	Id	Site	Pays
ABS	Abou Simbel	Égypte	LPI	La Palma	Espagne
ACR	Açores	Portugal	LSB	Lisbonne	Portugal
ALB	Aalborg	Danemark	LYR	Longyearbyen (Svalbard)	Norvège
AGA	Agadir	Maroc	MAD	Madeire	Portugal
ALY	Alexandrie	Egypte	MLG	Malaga	Espagne
ATH	Athènes	Grèce	MON	Moncton	Canada
BRN	Berlin	Allemagne	NOU	Nouakchott	Mauritanie
CNR	îles Canaries	Espagne	PAR	Paris	France
CRK	Cork	Irlande	PDM	Palma de Mallorca	Espagne
CTN	Catane	Italie	RKK	Reykjavik	Islande
DJA	Djerba	Tunisie	ROM	Rome	Italie
EGI	Egilsstadir	Islande	SDC	S. de Compostela	Espagne
GLG	Glasgow	Royaume Uni	SOF	Sofia	Bulgarie
GOL	Golbasi	Turquie	SWA	Swanwick	Royaume Uni
GVL	Gävle	Suède	TLS	Toulouse	France
HBK	Hartebeeshoek	Afrique du Sud	TRD	Trondheim	Norvège
JME	Jan Mayen	Norvège	TRO	Tromsoe	Norvège
KIR	Kirkenes	Norvège	WRS	Varsovie	Pologne
KOU	Kourou	Guyane Fr	ZUR	Zürich	Suisse
LAP	Lappeenranta	Finlande			

V.2.1 Type et fonction des stations RIMS

Les stations RIMS permettent de [Brocard. D et al, 2000]:

- Mesurer les Pseudo-distances Code / Phase (GPS L1 et L2 + GEO L1);
- Démoduler les messages satellites;
- Détecter et compenser le multi trajet et les interférences;
- Détecter les anomalies des signaux (e.g. EWF (*Evil Wave Form*) GPS/GEO-RIMS C);
- Transmettre les données en paquets aux MCC (*Mission Control Centre*) via EWAN (*EGNOS Wide Area Network*);
- Une RIMS spécifique permet de déterminer l'offset de temps UTC(k) / ENT.

Afin de garantir la sécurité, chaque station RIMS est composée de deux chaînes de réception indépendantes et dissemblables, RIMS A et RIMS B. Dans le but de détecter certaines pannes de satellite GPS, certaines stations sont équipées d'une troisième chaîne de collecte, les RIMS C [Colleu R., 2000]:

- RIMS du type A reçoit les mesures brutes des satellites qui sont utilisées par les centres de traitement principal CPF (*Central Processing Facility*) pour le calcul des corrections et l'estimation des seuils de confiance;
- RIMS du type B (FIG. V.2) reçoit également les mesures brutes des satellites qui sont utilisées pour garantir l'intégrité;
- RIMS du type C, dédiée à la détection de pannes spécifiques (forme d'onde dégradée du signal de navigation due à une panne à bord du satellite GPS), un exemple d'un site comprend trois stations RIMS du type A, B et C est donné par la figure V.3.



FIG .V.2. Antenne RIMS B à Alexandrie (Egypte) et Antenne RIMS VSAT à Las Palmas (Iles Canaries / Espagne)

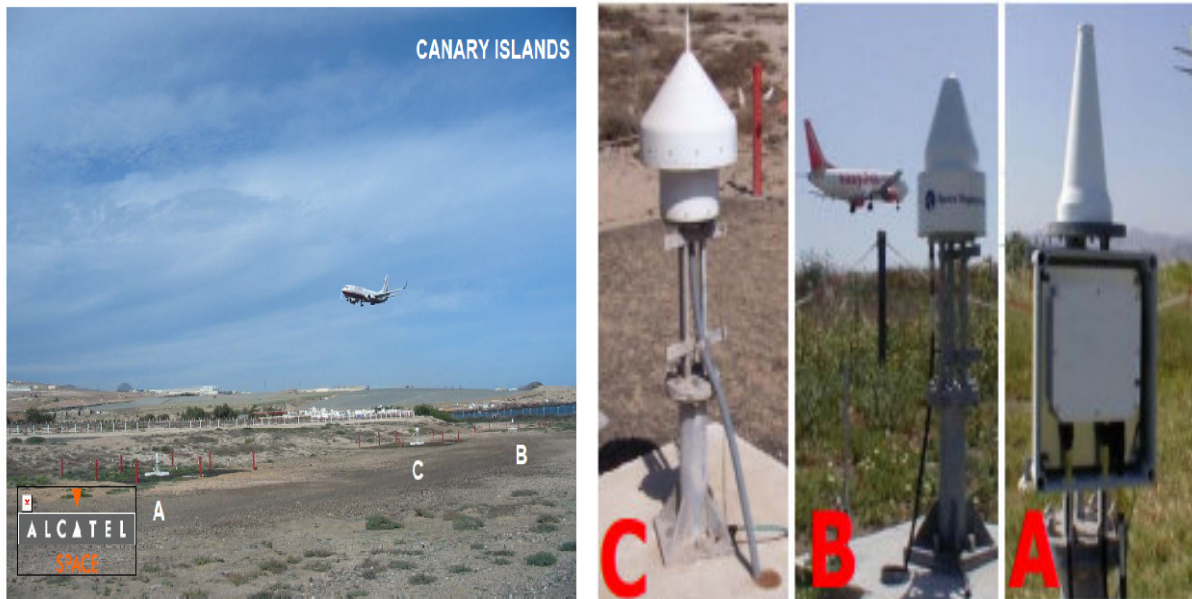


FIG. V.3. Site RIMS avec 3 récepteurs; Iles Canaries [Celestino U., 2017]

Il a été prévu l'installation d'une station RIMS à Tamanrasset de type A et B (02 antennes GPS redondantes) pour la collecte des données de positionnement en Algérie.

V.2.2 Conditions d'installation d'une station RIMS

Une attention particulière est portée à l'hébergement de stations RIMS par des organisations ayant une expérience dans ce domaine, ces stations doivent répondre aux exigences techniques, de sûreté et de sécurité. Les principales contraintes techniques relatives à l'installation d'une station RIMS sont les suivantes:

- Distance de séparation entre les antennes: les antennes de station RIMS du type A et B sur un site donné doivent être séparées de plusieurs dizaines de mètres (pas moins de 60 mètres, avec un objectif de 120 mètres si possible) selon les contraintes du site.
- Il est exigé que la localisation de l'antenne d'une station RIMS permette des observations avec un angle à l'horizon au-dessus de 5° d'élévation.
- Il est nécessaire que l'hébergement des équipements RIMS soit équipé des dispositifs de contrôle de la température.
- Les coordonnées des stations RIMS doivent être déterminées avec une grande précision (avec une précision de quelques cm dans le référentiel WGS 84).
- La sélection finale d'un site dépend des résultats des études de site (*site survey*), qui durent plusieurs jours et qui comprennent principalement une étude sur les interférences (trajets multiples et perturbations électromagnétiques). Dans le cas où l'étude du site aboutit à la non-faisabilité du site proposé; des sites alternatifs doivent être recherchés.

L'estimation de la durée d'installation d'une station RIMS est donnée par la figure V.4.

Typical Duration per RIMS Site

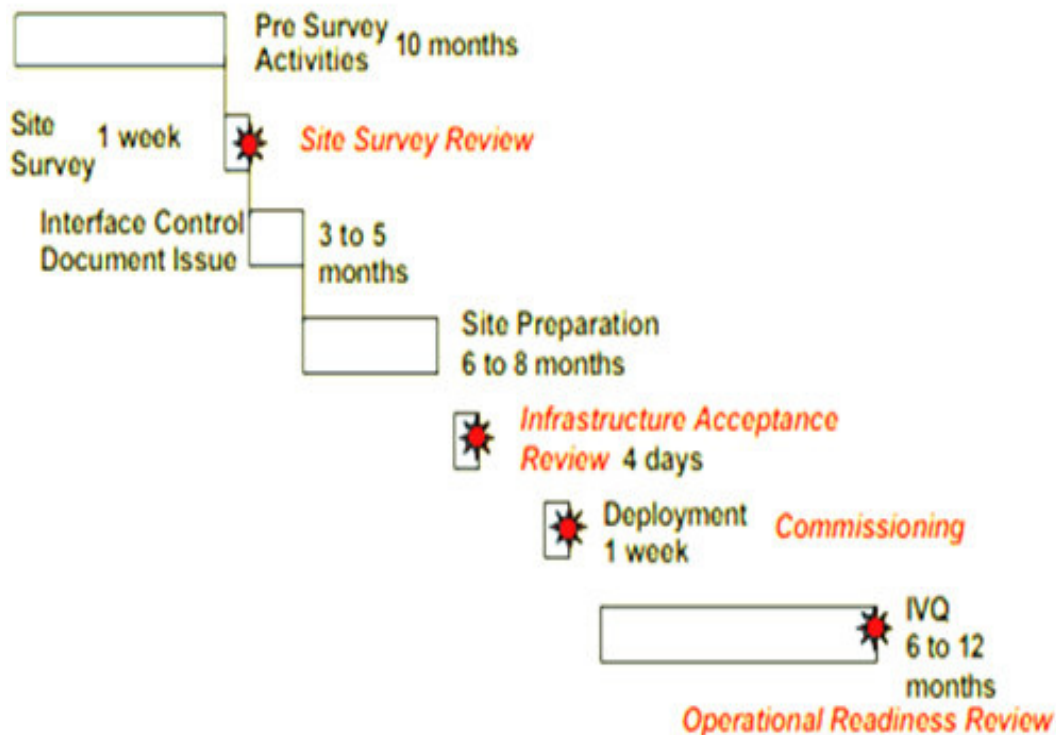


FIG. V.4. Durée d'installation d'une station RIMS [Brocard D. et al; 2000]

V.3 Choix optimal d'une station RIMS en Algérie

La mise en œuvre des installations sol de station RIMS en Algérie, permettra de recevoir les corrections émises par le système sur le territoire Algérien, et bénéficiera certainement des avantages offerts par ce système, notamment sur le plan de la précision, de la disponibilité, de l'intégrité et de la fiabilité.

V.3.1 Site à Tamanrasset

Initialement, il a été prévu l'installation d'une station (RIMS) au niveau de l'aéroport international de Tamanrasset, néanmoins ce site a été jugé techniquement peu favorable pour des raisons d'interférences (étude de site en 2012). Les résultats d'une simulation effectuée en 2013 sur ce site ont montré que les performances du système ne peuvent pas être atteintes sur tout le territoire Algérien, mais garantissent plutôt une meilleure couverture dans la direction du réseau principal des stations RIMS (vers l'Europe, donc plus au Nord). Les conclusions tirées ont été les suivantes [Tabti L. et Abidallah S., 2014]:

- Les corrections fournies par chaque station RIMS dépendent des stations voisines;
- L'amélioration de service EGNOS est interne du réseau des stations RIMS;
- La portée entre deux RIMS est importante; plus les stations sont voisines plus l'amélioration est importante, c'est-à-dire les stations isolées n'ont pratiquement aucune influence.

Pour toutes ces raisons, le déplacement du site vers un autre site situé plus au nord est primordial afin d'assurer une couverture meilleure par l'extension du système EGNOS en Algérie.

V.3.2 Site au centre de l'Algérie

C'est dans ce cadre que les simulations réalisées ont porté sur des sites abritant des aéroports situés entre 30 et 35 degrés de latitude, en excluant ceux situés à l'extrême Ouest, proches de la station marocaine d'Agadir, ou à l'extrême Est, couverts par la station de Djerba en Tunisie [Kahlouche S. et Tabti L., 2015]. Les sites choisis avec une délimitation en rouge sont présentés par la figure V.5.

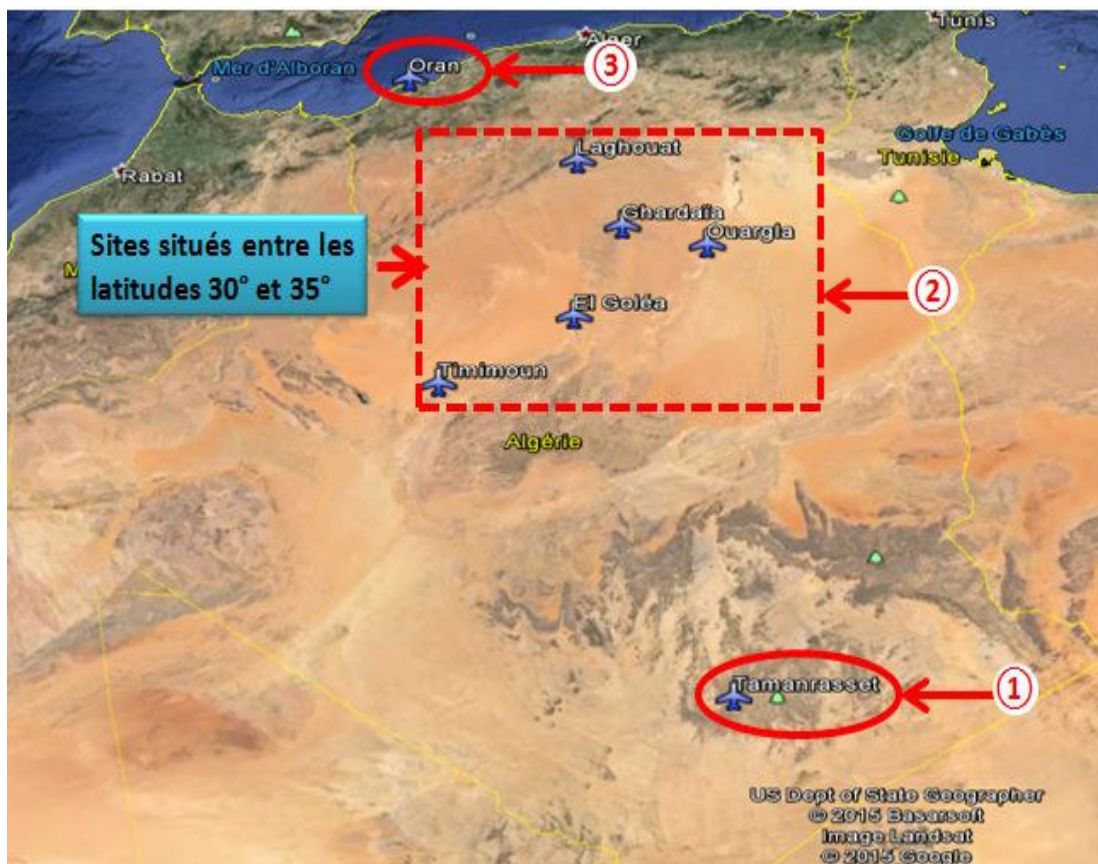


FIG. V.5. Emplacement des sites pour un choix optimal d'une station RIMS en Algérie

Les résultats de la simulation montrent que la disponibilité horizontale et verticale du système a été améliorée en incluant une station au centre de l'Algérie, en particulier au-dessus de la latitude de 30 degrés. La disponibilité verticale du système EGNOS passe à plus de 95 % en incluant le site d'El Goléa; dans la zone comprise entre $[0^\circ, 5^\circ]$ en longitude et de 30° en latitude comme le montrent les figures V.6 et V.7 [Tabti L. et al, 2018].

Les conclusions tirées de la simulation d'un site au centre de l'Algérie, ont été les suivantes:

- La mise en place d'un site au centre de l'Algérie au réseau actuel d'EGNOS permet d'avoir une bonne exploitation du système et en même temps étendre sa zone de service.

- Les sites d'El Goléa, Ghardaïa, Adrar et même Timimoune permettent d'avoir les meilleurs résultats. Ainsi, pour des raisons pratiques et logistiques, le site de Ghardaïa a été proposé par la partie algérienne pour abriter cette station EGNOS.

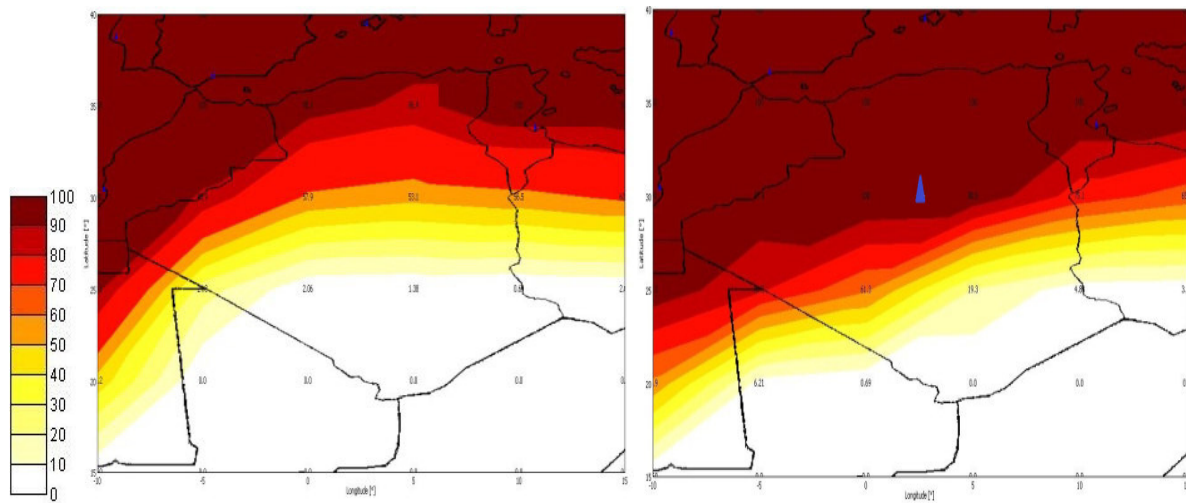


FIG. V. 6. Disponibilité horizontale en % avec 39 stations RIMS à gauche et 39 stations RIMS incluant le site d'El Goléa à droite

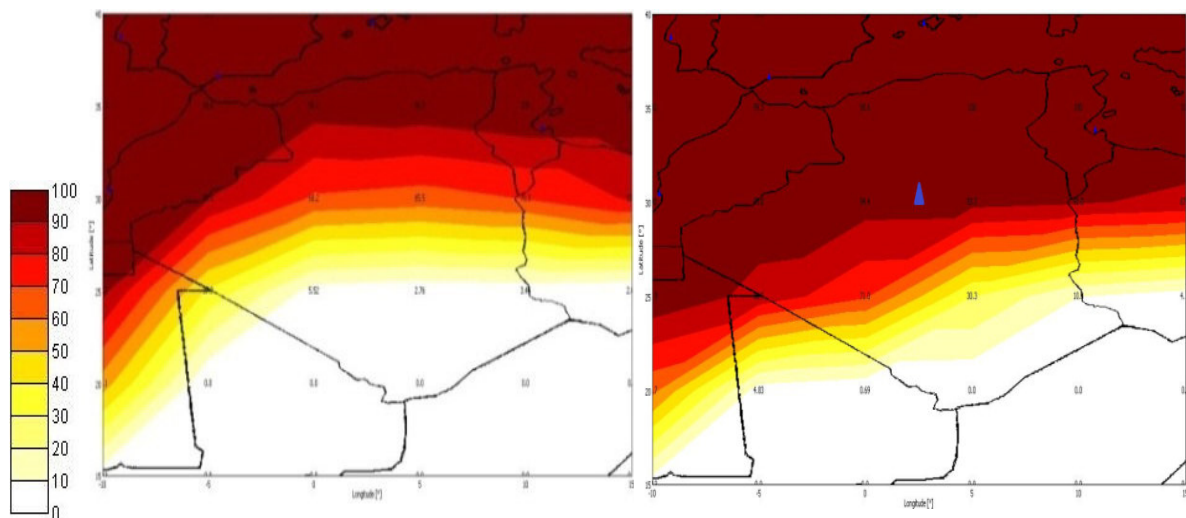


FIG.V. 7. Disponibilité verticale en % avec 39 stations RIMS à gauche et 39 stations RIMS incluant le site d'El Goléa à droite

V.3.3 Site à Oran

En août 2015, la commission Européenne a fait une nouvelle proposition pour la mise en place d'une station RIMS à Oran. Les résultats préliminaires de la mise en place de ce site montrent qu'il ne permet pas une amélioration des performances du système en Algérie en termes de qualité de positionnement. Cependant il permet d'améliorer d'une part la distribution géographique des stations RIMS et d'autre part la grille de corrections ionosphériques en Europe en améliorant l'homogénéité du réseau comme le montre la figure V. 8.

Pour l'aviation civile et la navigation maritime ou d'autres applications prioritaires (transport,...) au Nord (frange maritime), ce site peut être avantageux, néanmoins pour les utilisateurs au centre et au sud de l'Algérie en particulier, il ne permet pas une amélioration des services d'EGNOS, à cause de l'éloignement des utilisateurs des stations RIMS.

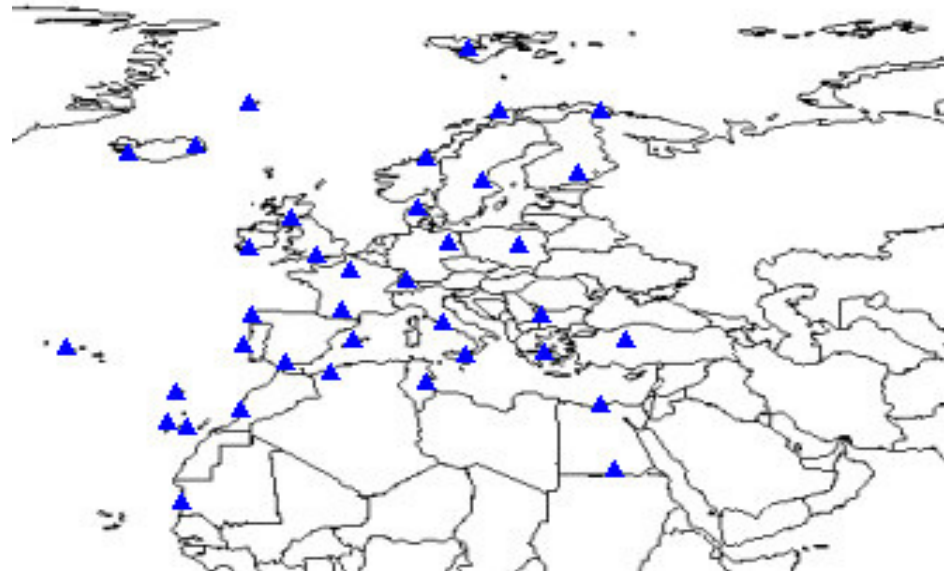


FIG. V.8. Distribution géographique des 39 stations RIMS avec le site d'Oran

Il est utile de relever que l'ESA a recommandé le site d'Oran pour la mise en place d'une station RIMS, après la proposition d'un site à El Goléa. Cette recommandation a été reprise dans un document officiel de l'ESA en 2016 [ESA, 2016] où il a été mentionné qu'il est primordial d'installer une station RIMS à Oran pour l'extension optimale du système EGNOS; extension répondant exclusivement aux besoins Européens pour une meilleure couverture de la Méditerranée Occidentale.

Par la suite (août 2019), la Commission Européenne a proposé de déployer deux sites pour la mise en place d'EGNOS en Algérie, on considérant que la station d'Oran sera installée à court terme; et une deuxième à Adrar, en vue de garantir une meilleure couverture sur l'espace aérien algérien.

V.4 Simulations et Résultats pour la mise en place de deux stations RIMS en Algérie

Pour confirmer le choix d'Adrar ou de maintenir un site au centre de l'Algérie (sans le site d'Oran), une étude a été effectuée pour analyser les performances du système EGNOS, en particulier sur des latitudes inférieures à 30°. Cette étude a été menée en utilisant le logiciel SBAS Simulateur V 1, développé par l'Agence Spatiale Européenne (ESA) en collaboration avec IGUASSU Software Systems [Vasile V. et al, 2018]. L'interface du logiciel est conçue pour permettre à l'utilisateur de générer des graphiques accompagnants un fichier résultant de ces traitements (fichier Meta et fichier DAT), le fichier Meta définit les paramètres donnés dans le fichier DAT dont les extensions sont données respectivement par (*.META et *.DAT) [ESA, 2010].

V.4.1 Paramètres utilisés

Les résultats dépendent du choix de plusieurs paramètres (RIMS filtre, RIMS network) et des conditions initiales (constellation, date, zone, masque d'élévation,...). Dans cette simulation on a considéré les paramètres suivants :

- Date : 1er août 2019 (journée 213), les almanachs de la constellation GPS ont été téléchargés à partir du site (<https://www.navcen.uscg.gov/>);
- Intervalle de temps d'enregistrement est de 10 secondes sur une période de 24 heures ;
- Dans cette étude, la zone choisie contient tout le territoire Algérien ainsi que les stations RIMS, elle est déterminée par :
 - longitude min = -20° , longitude max = 30° ;
 - et latitude min = 20° , latitude max = 50° ;
- Le modèle utilisé pour calculer l'erreur d'orbite du satellite et de l'horloge (UDRE) dépend de chaque satellite;
- Le modèle utilisé pour le calcul de σ_{flt} dépend de chaque satellite;
- δ UDRE = 1, $\sigma_{i,noise} = 0.36$ m;
- $\varepsilon_{fc} = \varepsilon_{rrc} = \varepsilon_{ltc} = \varepsilon_{er} = 0.0$, ces paramètres sont décrits dans le chapitre III;
- Le modèle utilisé pour calculer l'erreur ionosphérique (GIVE) est basé sur une interpolation qui dépend des stations RIMS actuelles;
- Réseau de stations RIMS : le choix a été porté dans un premier temps sur les stations opérationnelles en août 2019 qui sont au total de 39. Dans un deuxième temps, l'analyse a été faite sur l'ajout de deux sites nationaux aux stations déjà opérationnelles, en fixant le site d'Oran comme un site choisi pour la mise en place d'une station RIMS.

La figure V. 9 montre le panneau RIMS qui permet d'ajouter ou d'éliminer certaines stations RIMS.

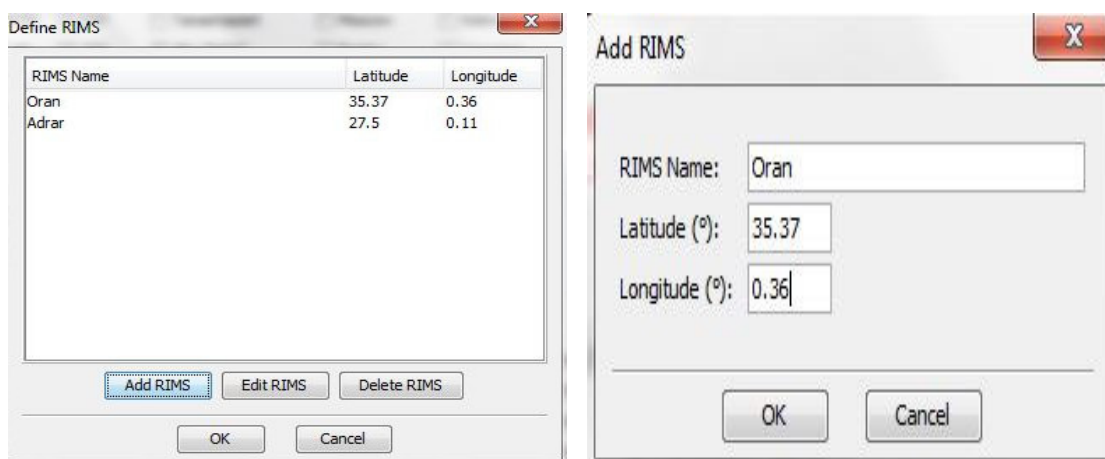


FIG. V. 9. Ajout de stations RIMS

La distribution géographique des stations RIMS ainsi que les sites choisis sont donnés par la figure V. 10.

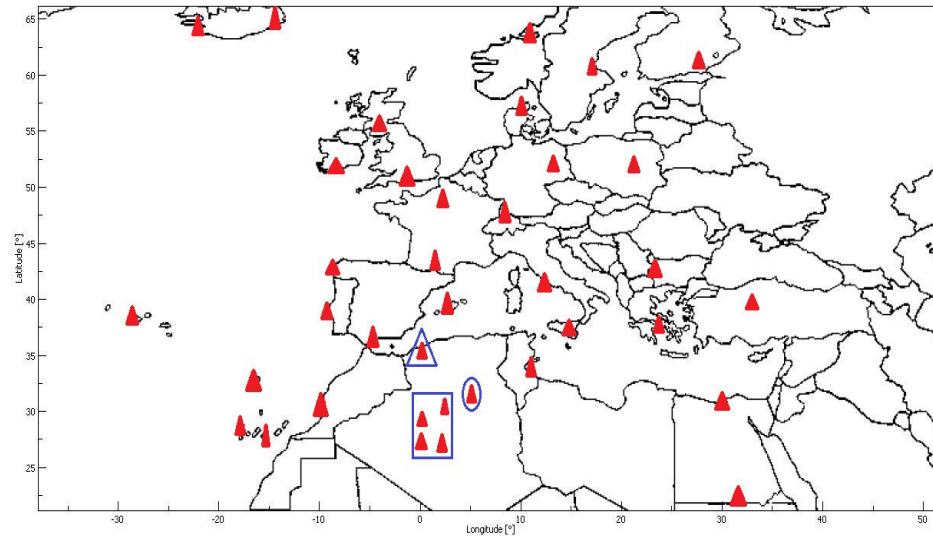


FIG. V. 10. Distribution géographique des 39 stations RIMS du système EGNOS ainsi que les sites choisis (encadrés en bleu) pour cette étude

Comme EGNOS est destiné essentiellement aux applications de navigation aérienne, ce sont les critères de cette application qui ont été considérés:

- niveau de protection HPL (*Horizontal Protection Level*) inférieur à HAL = 40 mètres (*Horizontal Alarm Limit*),
- et niveau de protection VPL (*Vertical Protection Level*) inférieur à VAL = 50 mètres (*Vertical Alarm Limit*),.

Les performances du système EGNOS ont porté sur la disponibilité au travers des variables suivantes : les niveaux de protection HPL et VPL basés sur des seuils d'alarme HAL et VAL ainsi que l'analyse de l'erreur ionosphérique sigma GIVE (*Grid Ionospheric Vertical Error*).

V.4.2 Sites choisis

Les simulations effectuées sur des zones au sud algérien en considérant la station d'Oran comme déjà opérationnelle, et comme la plupart des stations RIMS sont hébergées par des structures de l'aviation civile, cinq aéroports ont été considérés comme prioritaires et font l'objet de choix optimal d'une deuxième station RIMS d'EGNOS en Algérie. Il s'agit des sites se situant entre latitudes 27° et 32°, les sites choisis sont présentés par la figure V. 11 avec un encadrement en rouge.

Trois zones ont été définies pour évaluer les performances du système EGNOS, Oran comme un site opérationnel, Ouargla (à 31°) et quatre sites situés entre les latitudes 27° et 30°. Les sites choisis pour les simulations avec leurs coordonnées géographiques sont :

- Oran (Ahmed Ben Bella), coordonnées géographiques : 35° 37' 38" Nord, 0° 36' 41" Est,
- Ouargla (Ain Beida), coordonnées géographiques : 31° 55' 53" Nord, 5° 24' 24" Est,

- El Menia (El Goléa), coordonnées géographiques : 30° 34' 08" Nord, 2° 51' 53" Est,
- Timimoun (Timimoun), coordonnées géographiques : 29° 14' 28" Nord, 0° 17' 01" Est,
- Adrar (Touat Cheikh Sidi Mohamed Belkebir), coordonnées géographiques : 27° 50' 21" Nord, 0° 11' 07" Ouest;
- In Salah (In Salah), coordonnées géographiques : 27° 15' 13" Nord, 2° 30' 39" Est.

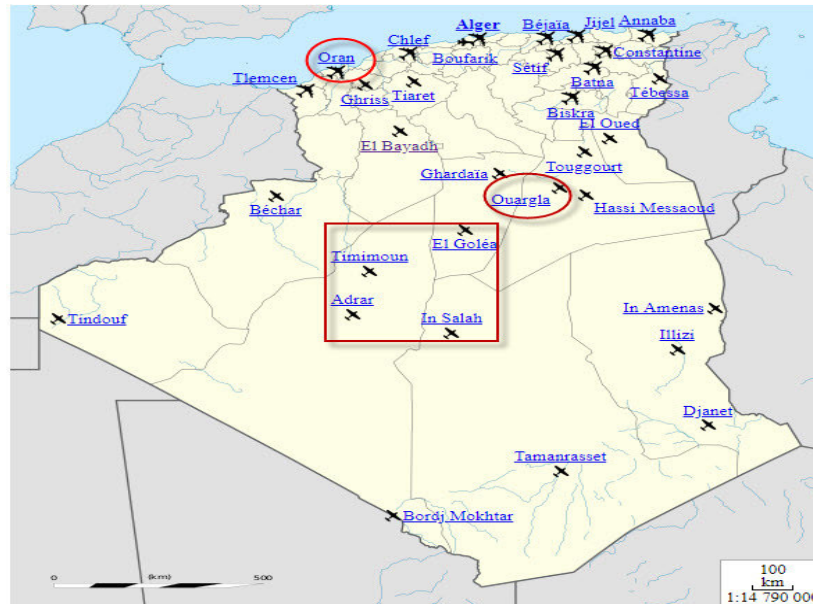


FIG. V. 11. Sites choisis pour cette étude

V.4.3 Disponibilité du système

L'utilisation des niveaux de protection (PL) offre une meilleure interprétation de la disponibilité du système EGNOS. Cette disponibilité est calculée par rapport au pourcentage de temps où les niveaux de protection (HPL et VPL) se situent en dessous de leurs valeurs seuils (fixées pour un type d'application par les limites d'alarme HAL et VAL), le tableau V. 2 montre les classes de disponibilité pour un système GNSS.

TAB. V. 2. Classes pour la disponibilité

Classe	Disponibilité	Remarque
Très haute	99.999 %	Exigence de l'aviation civile
Haute	99.9 %	/
Moyenne	99 %	/
Basse	90 %	/
Très basse	80 %	/

Pour l'aviation civile et l'approche APV I, la couverture est caractérisée par le pourcentage de temps pour que le système EGNOS puisse assurer une protection horizontale inférieure à 40 mètres et une protection verticale inférieure à 50 mètres. La figure V.12 présente la carte de disponibilité du système EGNOS en temps réel pour l'approche APV I obtenue à partir du site officiel d'EGNOS (<https://egnos-user-support.essp>).

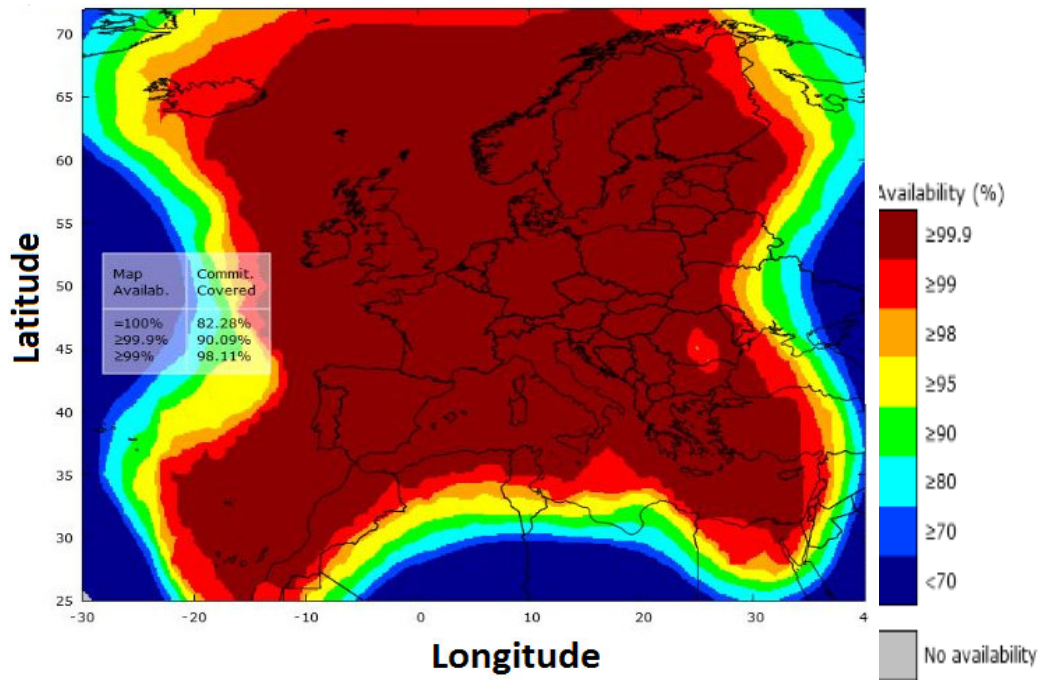


FIG. V. 12. EGNOS APV-I disponibilité horizontale et verticale, le 1er août 2019

Sur sa zone de service, EGNOS est aujourd’hui disponible à plus de 99 % du temps. D’après la figure V.12, on peut remarquer que le système EGNOS permet d’avoir une bonne disponibilité au nord de l’Algérie; par contre, en se dirigeant vers le sud, cette disponibilité s’affaiblit.

Les résultats de disponibilité de la mise en place de deux stations RIMS sont donnés par les tableaux V. 3 et V. 4 pour les latitudes 25, 30 et 35 degrés en approche APV I.

TAB. V. 3. Disponibilité horizontale (HPL<HAL = 40 mètres) avec 39 stations RIMS incluant le site d’Oran et un site choisi en %

φ : Latitude λ : Longitude	25°	30°	35°
	[0° 5°]	[0° 5°]	[0° 5°]
Sites			
39 stations	[2.06 9.66]	[60.0 64.8]	[87.5 93.7]
39 stations +Oran + Ouargla	[28.2 39.3]	[88.9 91.0]	100
39 stations + Oran+ El Goléa	[33.1 64.1]	[93.7 98.6]	100
39 stations + Oran +Timimoun	[26.9 73.1]	[96.5 100]	100
39 stations + Oran + Adrar	[30.3 79.3]	[98.6 100]	100
39 stations +Oran + In Salah	[42.0 82.7]	100	100

TAB. V. 4. Disponibilité verticale (VPL<VAL = 50 mètres) avec 39 stations RIMS incluant le site d'Oran et un site choisi en %

Sites	φ : Latitude		λ : Longitude	
	25° [0° 5°]	30° [0° 5°]	35° [0° 5°]	
39 stations	[3.45 9.66]	[67.5 69.6]	[97.9 99.3]	
39 stations + Oran + Ouargla	[34.4 42.7]	[98.6 100]	100	
39 stations + Oran + El Goléa	[44.1 76.5]	[99.3 100]	100	
39 stations + Oran + Timimoun	[36.5 82.0]	[98.6 100]	100	
39 stations + Oran+ Adrar	[39.3 92.40]	[99.3 100]	100	
39 stations + Oran + In Salah	[48.9 94.4]	[99.3 100]	100	

Les résultats de la simulation montrent que la disponibilité horizontale et verticale du système a été améliorée en incluant deux stations. On remarque bien que le pourcentage du temps pour que la disponibilité du système EGNOS est meilleure dans le cas d'Oran + Adrar et Oran + In Salah.

V.4.4 Erreur sur la précision verticale de la grille ionosphérique

L'erreur sur la précision verticale de la grille ionosphérique est évaluée à partir des indicateurs de précision sur la grille ionosphérique délivrés par EGNOS. Cette précision dépend du nombre des points IPP (*Ionospheric Pierce Point*); ce nombre est directement lié au nombre de satellites et au nombre de stations au sol, plus ce nombre augmente par l'ajout des stations RIMS, plus la précision des corrections ionosphériques σ_{GIVE} sera meilleure.

Le calcul de σ_{GIVE} permet de donner l'erreur verticale de la grille ionosphérique et chaque valeur correspond au nombre de points IPP surveillés par les points ionosphériques de la grille IGP. Dans cette étude ces considérations ont été prises :

- Nombre de points IPP ≥ 9 ($\sigma_{GIVE} = 0.54$ mètre);
- Nombre de points IPP = 8 ($\sigma_{GIVE} = 0.64$ mètre);
- Nombre de points IPP = 7 ou 6 ($\sigma_{GIVE} = 0.73$ mètre);
- Nombre de points IPP = 5 ($\sigma_{GIVE} = 0.82$ mètre);
- Nombre de points IPP = 4 ($\sigma_{GIVE} = 0.91$ mètre);
- Nombre de points IPP < 3 ($\sigma_{GIVE} = 45$ mètres).

Les valeurs de σ_{GIVE} incluant le site d'Oran et un site choisi sont fournies par le tableau V. 5.

TAB. V. 5. Sigma GIVE avec 39 stations RIMS incluant le site d'Oran et un site choisi en mètres

Sites	φ : Latitude	25°	30°	35°
	λ : Longitude	[0° 5°]	[0° 5°]	[0° 5°]
39 stations		[35.2 41.6]	[6.79 14.4]	0.54
39 stations +Oran + Ouargla		[14.4 25.7]	0.54	0.54
39 stations + Oran+ El Goléa		[4.38 7.77]	0.54	0.54
39 stations + Oran+ Timimoun		[2.19 6.85]	0.54	0.54
39 stations +Oran+ Adrar		[0.62 2.25]	0.54	0.54
39 stations +Oran +In Salah		[0.62 0.64]	[0.54 0.55]	0.54

On peut constater que l'ajout de deux stations RIMS permet de diminuer les valeurs de σ_{GIVE} , qui varie entre 0.54 mètre (Latitude 30°) et 25.7 mètres (Latitude 25°), cela est expliqué par l'augmentation de satellites surveillés donc l'augmentation du nombre de points IPP qui permettent d'améliorer la précision verticale de la grille ionosphérique.

L'ajout de deux stations (Oran+ Adrar ou même Oran+ In Salah) permet d'avoir une valeur maximale de sigma GIVE égale à 2.25 mètres à la latitude 25°, alors que sa valeur peut atteindre 12.3 mètres avec l'ajout seulement de la station d'El Goléa pour la même journée (1er août 2019), comme le montre la figure V. 13. Les résultats préliminaires des simulations antécédentes d'un site au centre de l'Algérie, ont confirmé l'amélioration de performance du système EGNOS en-dessus de latitude 30° [Tabti L. et al, 2018].

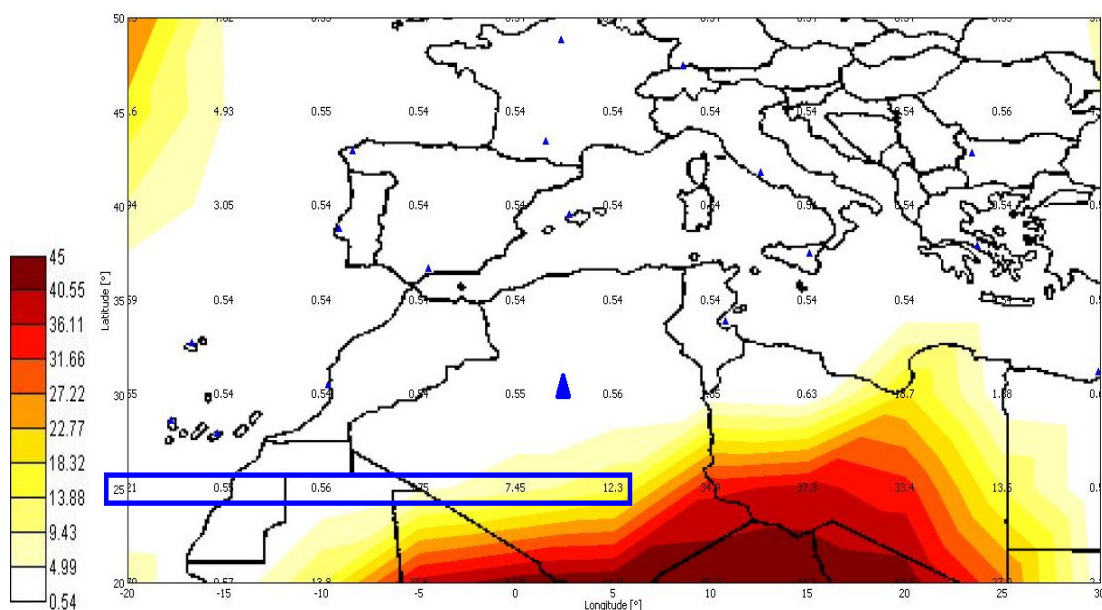


FIG. V. 13. Sigma GIVE en mètres avec 39 stations RIMS incluant le site d'El Goléa

L'ajout de stations d'Oran et Adrar permettait de réduire l'erreur ionosphérique jusqu'à 25° de latitude, comme le montre la figure V. 14.

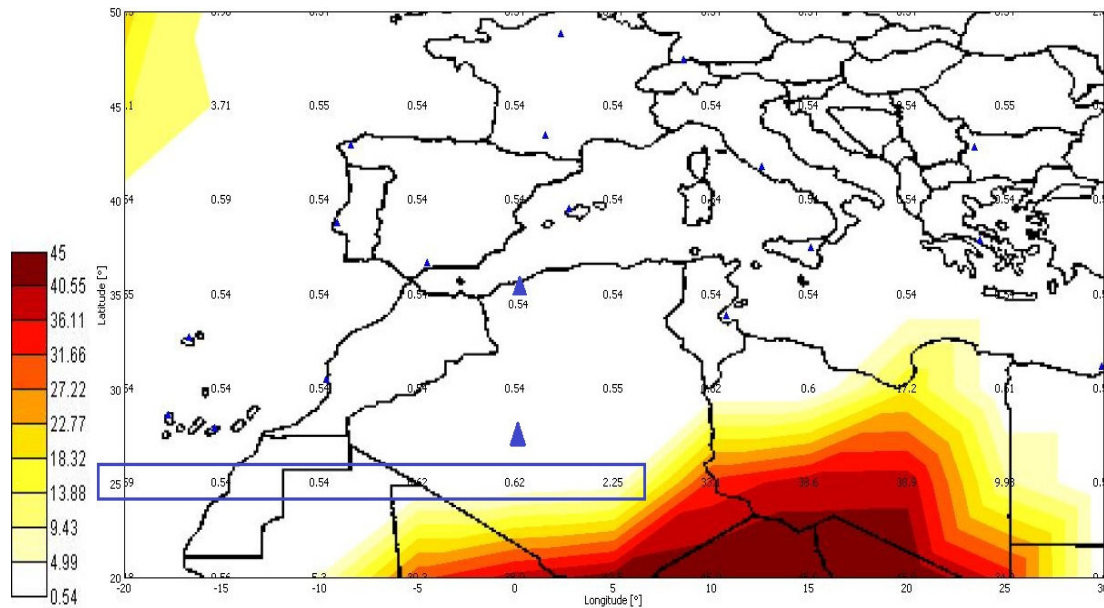


FIG. V. 14. Sigma GIVE en mètres avec 39 stations RIMS incluant le site d'Oran et Adrar

On constate que la couverture de la grille de corrections ionosphériques dépend de la répartition des stations RIMS, et elle est directement liée au nombre de satellites et au nombre de stations RIMS.

Les résultats de la simulation présentés dans la figure V. 15 comparés avec ceux de la figure V. 14, montrent que, considérant l'existence d'une première station à Oran, le site d'Adrar répond bien aux prescriptions techniques de précision et de bonne couverture de la partie sud de l'Algérie.

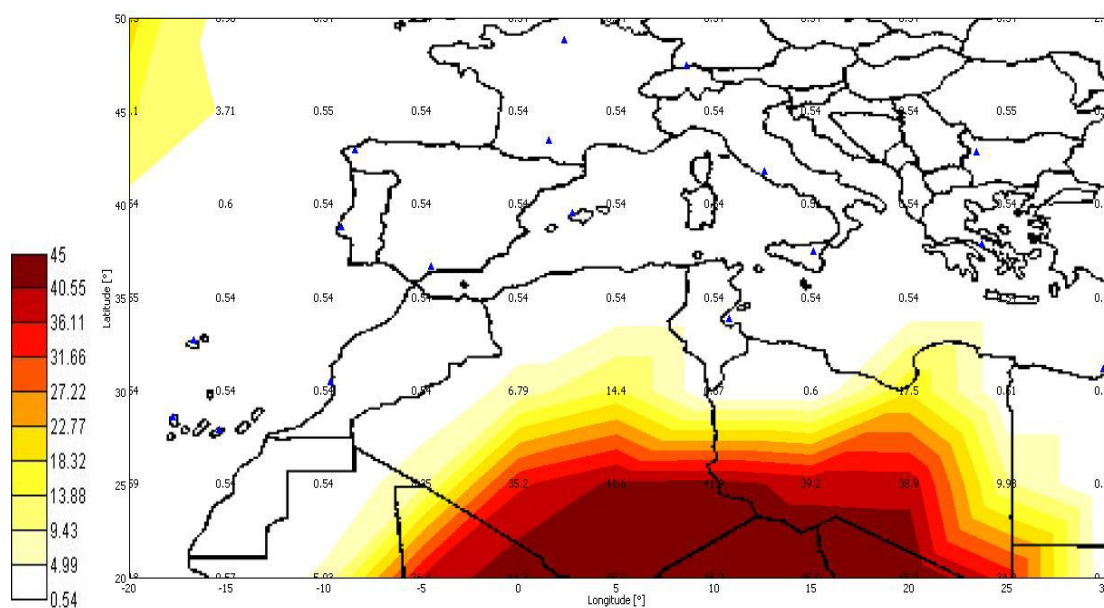


FIG. V. 15. Sigma GIVE en mètres avec 39 stations RIMS

V.5 Analyse des performances du système EGNOS à partir des données réelles collectées sur les deux sites Oran et Adrar

Les performances du système EGNOS en termes de précision et intégrité sont évaluées pour les deux sites proposés et sélectionnés pour la mise en place de deux stations RIMS (Oran et Adrar), suivant différents critères parmi lesquels figurait la précision de positionnement (horizontale et verticale) ainsi que l'intégrité.

L'objectif est de montrer l'importance de l'effet de proximité géographique au réseau déjà existant de stations RIMS et de vérifier si les performances obtenues pour les deux sites remplissent les exigences de sécurité imposées par l'OACI (*Organisation de l'Aviation Civile Internationale*). Pour atteindre cet objectif, des données GPS réelles collectées par des récepteurs bi-fréquences *Trimble NetR9* pour les deux sites sont utilisées. Les coordonnées issues du fichier RINEX pour chaque site ont été utilisées. Le choix des dates a été fait en fonction de la disponibilité des données GPS. Les résultats obtenus ne donnent qu'une première estimation sur les performances d'EGNOS en Algérie pour l'approche avec guidage vertical APV I.

V.5.1 Analyse de la précision pour les deux sites Oran et Adrar

Les résultats obtenus au chapitre IV, confirment que les corrections EGNOS offrent une précision meilleure que le GPS uniquement pour le site d'Oran. Cette précision se dégrade sur le site d'Adrar, les erreurs horizontales et verticales avec EGNOS sont de 2,50 mètres et 5,56 mètres (95%), par contre, 95 % des erreurs horizontales sont inférieures à 2,09 mètres et 95% des erreurs verticales sont inférieures à 4,22 mètres avec GPS uniquement, cela peut s'expliquer par l'éloignement du site d'Adrar par rapport au réseau de stations RIMS. Les résultats en termes de précision horizontale et verticale du site d'Oran et d'Adrar pour les 03 et 08 juillet 2019, respectivement, sont donnés par le tableau V. 6.

TAB. V. 6. Performance du système EGNOS en termes de précision pour les deux sites Oran et Adrar

GNSS		GPS		GPS+EGNOS	
Site	Date	HPE(m)	VPE(m)	HPE(m)	VPE(m)
Oran(305)	03/07/2019	4.50	7.78	3.61	6.45
Adrar(S090)	08/07/2019	2.09	4.22	2.50	5.56

Les résultats confirment que les performances du service ouvert d'EGNOS se dégradent progressivement en fonction de la distance entre l'utilisateur et la zone de service. On peut affirmer que la précision de position du GPS avec les corrections EGNOS est améliorée pour Oran comparativement au GPS uniquement, bien que pour Adrar, la précision est dégradée, ce qui est probablement dû au nombre de satellites exclus de la solution, comme le montre la figure V. 16.

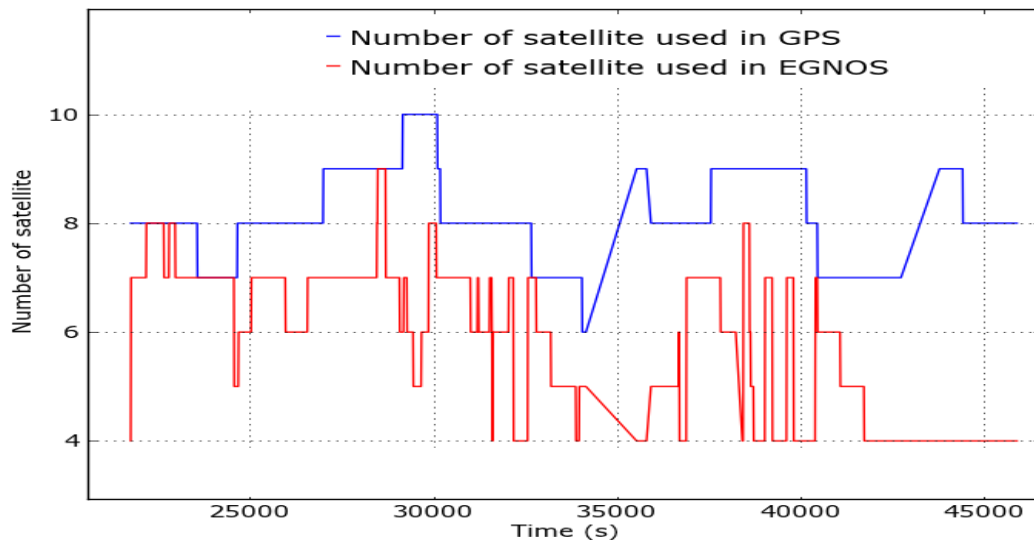


FIG. V. 16. Nombre de satellites utilisés dans la solution EGNOS (rouge) en comparaison avec le nombre de satellites utilisés dans la solution GPS (bleu) au site Adrar

La figure V. 16 indique le nombre de satellites GPS surveillé par EGNOS; on remarque que le nombre de satellites utilisés pour le GPS est compris entre 6 et 10, ce nombre diminue pour EGNOS, ce qui signifie que celui-ci a éliminé certains satellites GPS, ce qui cause une dégradation de calcul de la position.

V.5.2 Analyse de l'intégrité pour les deux sites Oran et Adrar

Les performances d'EGNOS en termes d'intégrité sont également analysées pour ces deux sites (Oran et Adrar). Les figures V. 17 et V. 18 illustrent l'erreur horizontale et verticale (en trait continu bleu), ainsi que les niveaux de protection horizontale et verticale (en trait continu vert), le nombre de satellites en vue par le récepteur est également reporté sur la même figure (en trait continu rouge).

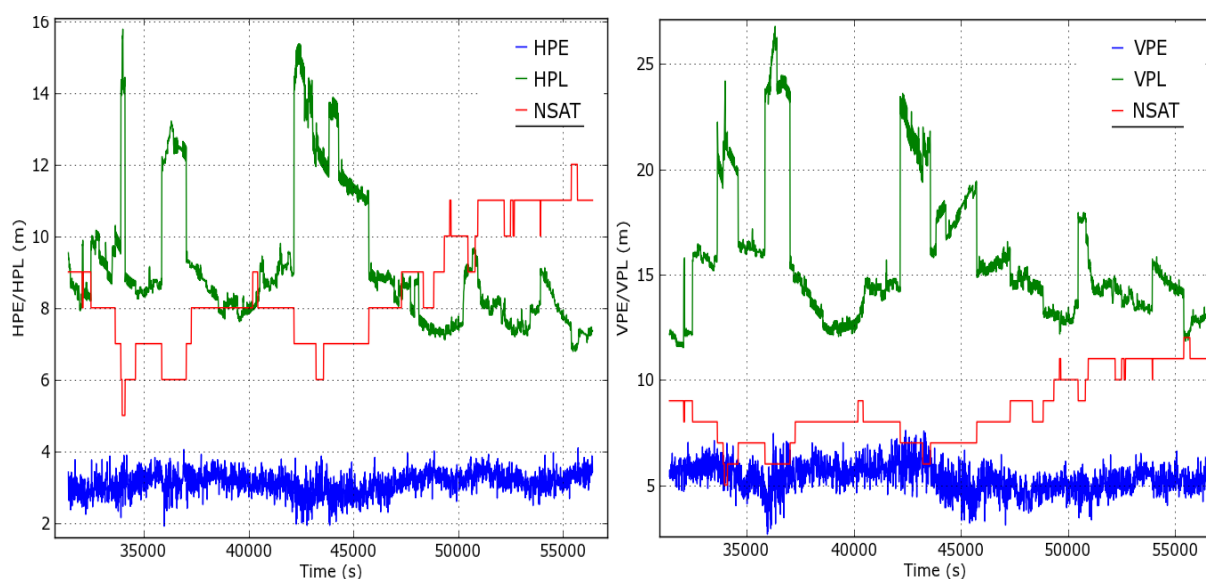


FIG. V. 17. Évolution du niveau de protection PL et de l'erreur de position PE pendant toute la durée d'observation au niveau du site d'Oran

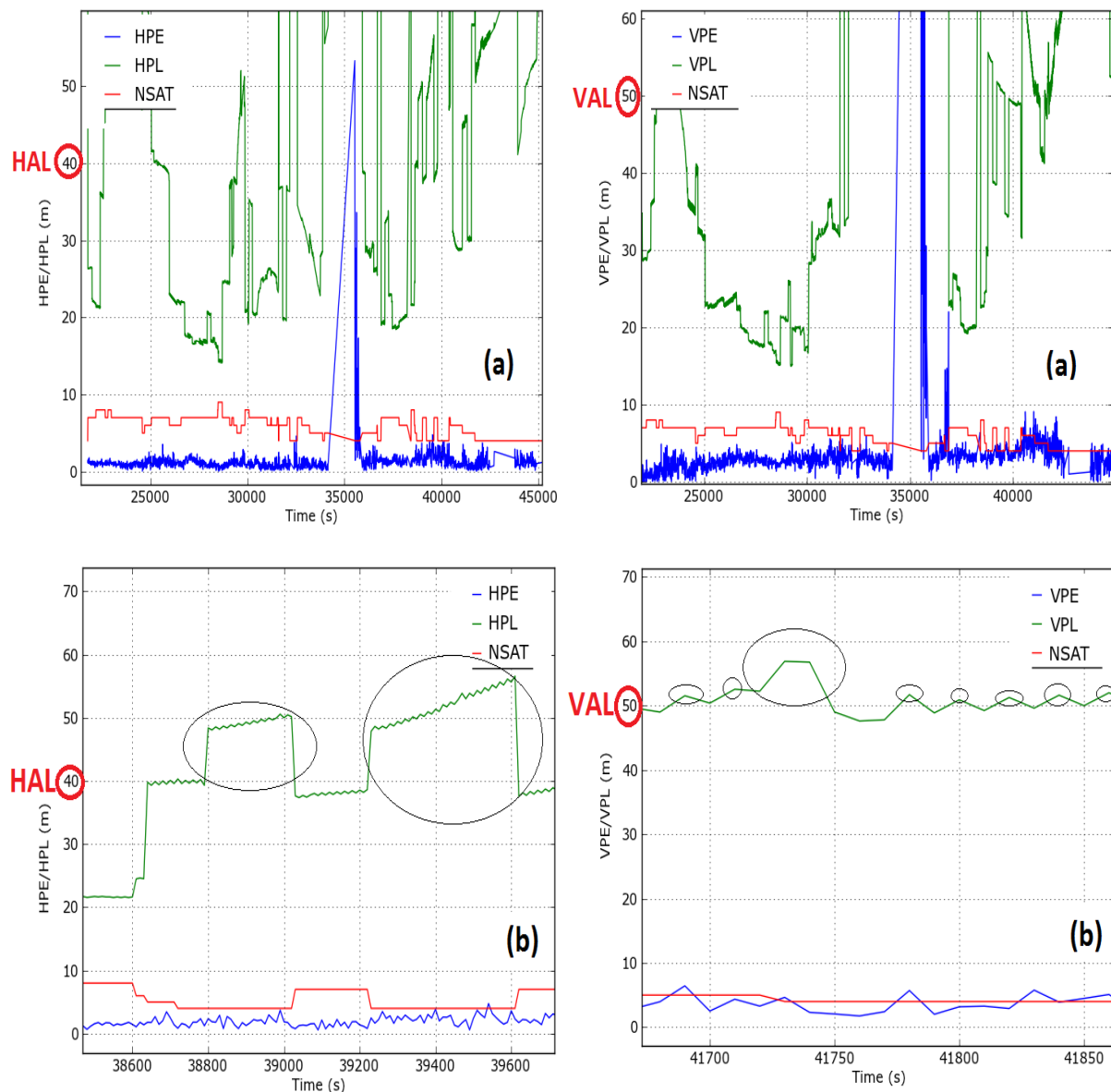


FIG. V. 18. Évolution du niveau de protection PL et de l'erreur de position PE au niveau du site d'Adrar, (a) correspond à toute la durée d'observation et (b) présente un zoom sur une période où $PL > AL$

On constate que les pics de niveaux de protection sont liés au nombre de satellites observés et que PL est globalement supérieur à PE, ce qui signifie que PL borne PE.

Pour le site d'Oran, les valeurs du niveau de protection sont inférieures à 16 mètres sur la composante horizontale et inférieure à 30 mètres sur la composante verticale. Le niveau de protection horizontale est toujours inférieur à la limite d'alarme ($HAL = 40$ mètres) pendant toute la durée d'observation, et le niveau de protection verticale est typiquement en dessous de la limite d'alarme ($VAL = 50$ mètres).

La valeur maximale de VPL peut atteindre 26.77 mètres. La validation d'EGNOS pour des approches avec guidage vertical APV I est possible au site d'Oran et l'intégrité est assurée pendant toute la durée d'observation.

D'autre part, pour le site d'Adrar et d'après la figure V. 18 (a), l'erreur de position est limitée par le niveau de protection; cependant le niveau de protection horizontal et vertical n'est pas continuellement inférieur à la limite d'alarme horizontale et verticale (HAL = 40 mètres et VAL = 50 mètres); de ce fait, les exigences pour l'approche APV I ne peuvent être satisfaites, l'intégrité n'est pas assurée et le système n'est pas disponible pendant toute la durée d'observation; cela peut-être expliqué par le manque de stations RIMS au centre de l'Algérie.

La figure V. 18 (b) montre aussi un zoom sur une fenêtre de temps dans lequel $PL > AL$. Ces instants représentent un problème d'intégrité. On constate que les performances d'intégrité spécifiées par l'OACI pour les normes aéronautiques, n'étaient pas atteintes pour le site d'Adrar.

On constate que les corrections d'EGNOS peuvent être utilisées seulement pour le territoire couvert par les stations RIMS du système, car même si le signal EGNOS est capté dans le centre de l'Algérie (Adrar), il n'y a pas de stations de référence qui transmettent des données relatives à cette région. L'absence de stations RIMS en Algérie est responsable de la perte du suivi de quelques satellites GPS ainsi que des informations permettant de garantir l'intégrité, ce qui permet de diminuer la disponibilité du système, puisque le système ne pas tenir en compte les satellites non surveillés. Ce problème sera surmonté lors de la mise en place de stations RIMS en Algérie.

L'intégrité peut être aussi analysée à l'aide du diagramme de "Stanford" plot présenté au chapitre III. Les figures V. 19 et V. 20 décrivent les performances d'intégrité suivant ce diagramme sur le plan horizontal et sur l'axe vertical pour les deux sites Oran et Adrar .

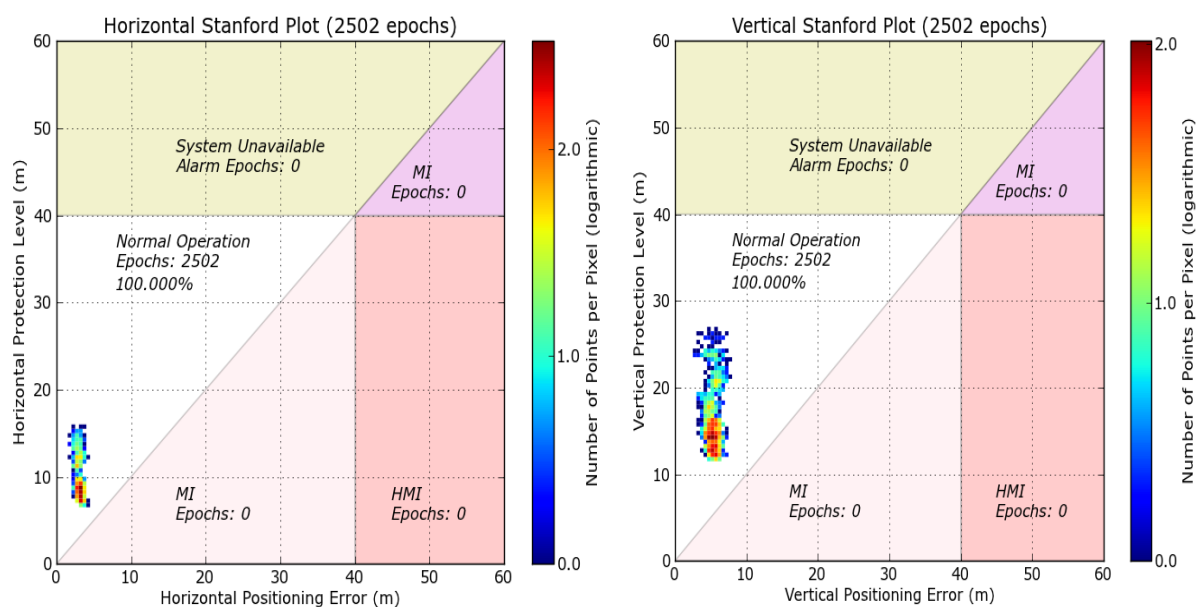


FIG. V. 19. Seuil de protection horizontal et vertical représenté par le diagramme de Stanford pour le site d'Oran

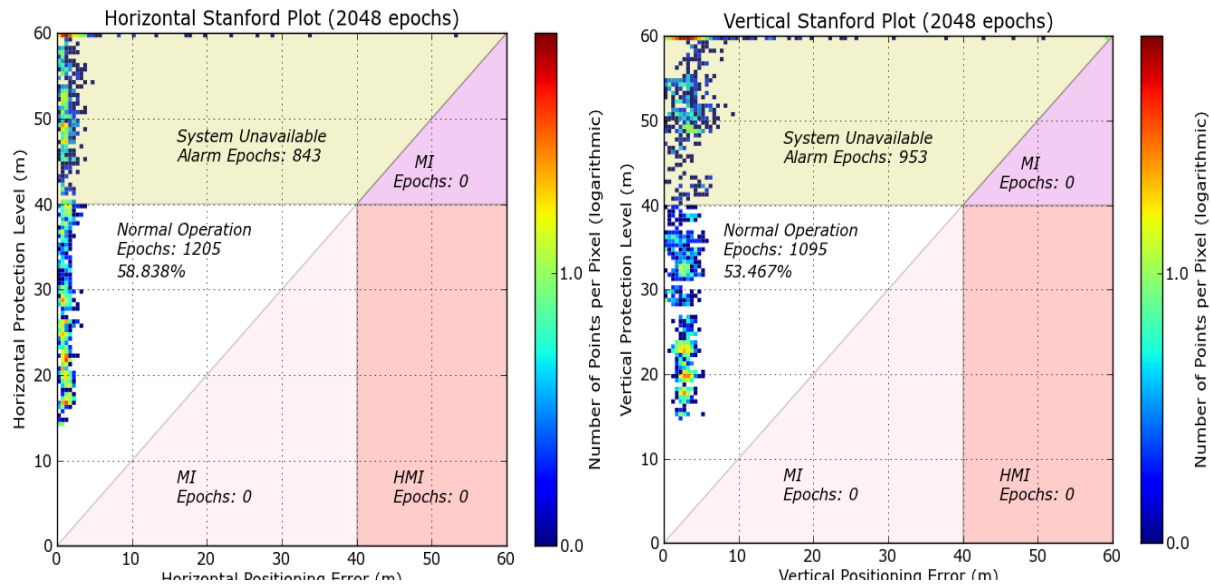


FIG. V. 20 . Seuil de protection horizontal et vertical représenté par le diagramme de Stanford pour le site d'Adrar

Pour le site d'Oran, on voit l'excellent niveau de performance puisque les points sont tous très éloignés de la diagonale d'une part et de la limite d'alarme d'autre part (HAL= 40 mètres et VAL = 50 mètres). Bien que pour le site d'Adrar, il y a des points qui se trouvent au-dessus des seuil d'alarme limite.

V.6 Conclusion

EGNOS offre des performances de navigation en termes de précision et d'intégrité; le projet d'extension du système EGNOS vise à renforcer son segment terrestre dans le continent Africain par l'installation de stations RIMS dans les pays concernés. En Algérie, le signal EGNOS couvre le nord du pays, néanmoins cette disponibilité diminue en se déplaçant vers le sud, notamment en ce qui concerne la fiabilité et l'intégrité.

La mise en place de deux stations RIMS permettra d'étendre la zone de couverture d'EGNOS jusqu'à 25° de latitude (500 km) au lieu de 30° avec la mise en place d'une seule station au centre de l'Algérie. Les deux sites d'Adrar et In Salah avec le site d'Oran offrent pratiquement les mêmes résultats en termes de disponibilité et de correction ionosphérique.

Néanmoins, Le choix final d'un site dépend des critères techniques liés au site (interférences,..) ou aux critères d'ordre pratique (facilité d'accès, sécurité, moyens logistiques,..) pour répondre aux préoccupations d'ordre institutionnel et juridique.

Ce chapitre confirme que la distance par rapport au réseau de stations RIMS est importante pour la fiabilité des corrections transmises par EGNOS. Ces corrections se dégradent progressivement lorsque l'utilisateur s'éloigne de la zone de service couverte par les stations RIMS. La mise en place de deux stations permet d'améliorer les résultats au niveau du site d'Adrar, au centre et sud de l'Algérie.

CONCLUSION GENERALE

La disponibilité du système GPS a poussé les utilisateurs à considérer ce système pour de nombreuses applications, On peut citer l'aviation civile, les systèmes de commande automatique des trains, les applications géodésiques, les transports de marchandises etc... . Cependant l'utilisation du GPS pour certaines applications pose de nombreux problèmes, car ce système ne fournit en retour aucune garantie de fonctionnement, tant au niveau de la précision, ou de la disponibilité du système, qui est parfois dégradé de manière volontaire et sans préavis, même la fiabilité du signal ne permet pas de se contenter du GPS comme unique moyen de positionnement et de navigation. Pour que ces applications puissent bénéficier d'un système de positionnement fiable, il a fallu de mettre en place des systèmes complémentaires permettant d'améliorer les performances du système en termes de précision et de fiabilité.

Plusieurs techniques ont été développées pour augmenter les performances du système de positionnement. Ces techniques varient en sophistication et en complexité depuis une seule station de référence, qui calcule son erreur de position pour l'utiliser avec des récepteurs situés à proximité, jusqu'à réseau à couverture régionale ou mondiale comme les systèmes d'augmentation spatiaux SBAS (*Satellite Based Augmentation Systems*), ces systèmes fournissent des données pour corriger les erreurs à partir de modèles d'erreurs, pour n'importe quelle position sur la terre.

Les systèmes SBAS utilisent un réseau de stations de référence détermine et continuellement met à jour les corrections des erreurs variant dans le temps et spatialement pour différents points de la région couverte. Il fait en sorte que les corrections soient disponibles pour tous les utilisateurs dans la région couverte par les satellites géostationnaires et le réseau de stations de référence.

Les systèmes d'augmentation spatiaux SBAS ont été mis en place pour améliorer l'intégrité, la précision, la continuité et la disponibilité des signaux GPS. Dans cette étude, on a procédé au calcul de positions en utilisant deux approches différentes sur quatre sites à savoir Oran, Alger, Bejaia et Ouargla (Bir Sbaa). La première approche est basée sur le positionnement absolu du GPS mono-fréquence, alors que la seconde utilise les messages de corrections EGNOS. Ces messages portent sur les corrections dues à l'erreur de l'orbite, à l'horloge du satellite et à l'erreur ionosphérique. La précision de positionnement a été examinée à partir des coordonnées précises de chaque site en utilisant le logiciel gLAB. 5 4.4. L'impact des corrections EGNOS sur la précision du positionnement ainsi que les corrections ionosphérique sont également été étudiés et comparés.

Les résultats sur les quatre sites utilisés dans le cadre de ce travail montrent que la précision du GPS corrigée par EGNOS est considérablement améliorée comparativement au GPS uniquement; ces résultats montrent qu'il y a une amélioration de précision du positionnement en trois dimensions, en particulier sur la composante verticale.

L'erreur horizontale du GPS+EGNOS est inférieure à 1,68 mètre (95 %), bien que, cette erreur puisse atteindre 3.65 mètres (95 %) en GPS uniquement. L'erreur maximale sur la composante verticale pour le GPS+EGNOS est comprise entre -2 et 2 mètres pour la période d'observation, alors qu'elle est entre -8 et 8 mètres avec le GPS uniquement.

En tenant compte des corrections rapides, lentes et des corrections ionosphériques transmises par EGNOS, on constate que les modèles utilisés par EGNOS pour calculer la position sont meilleurs que les modèles du GPS mono-fréquence.

L'application des corrections EGNOS améliore aussi l'écart-type des coordonnées géocentriques cartésiennes de chaque site par rapport au GPS, en particulier l'écart-type maximal en Z pour le site d'Alger passe de 1.34 mètre à 0.54 mètre, ceci est dû principalement aux corrections transmises par EGNOS et en particulier aux corrections ionosphériques.

Les corrections ionosphériques utilisant la grille ionosphérique d'EGNOS sont inférieures aux valeurs diffusées par GPS en appliquant le modèle Klobuchar généralement utilisé en mono-fréquence; les valeurs de l'erreur ionosphérique sont entre 1 et 2 mètres au zénith, et elles peuvent aller jusqu'à 8 mètres lorsque les satellites sont à basses élévations ($<5^\circ$), tandis que pour le GPS uniquement, la correction ionosphérique varie particulièrement au zénith de 2 à 4 mètres environ, et peut atteindre 14 mètres quand les satellites sont proches de l'horizon.

Pour confirmer la fiabilité des corrections EGNOS au nord de l'Algérie, la même comparaison a été effectuée sur le site 305 à Oran, durant différents jours de l'année 2017 et 2018, selon la disponibilité des données; les résultats ont montré une amélioration importante sur la précision du positionnement en utilisant les corrections d'EGNOS. L'ampleur observée de l'erreur de position horizontale et verticale (HPE et VPE) est inférieure à 2 mètres, alors que ces valeurs en GPS uniquement puissent atteindre 6 mètres en horizontale et en verticale. La précision d'EGNOS est stable, ce qui confirme que, les corrections EGNOS sont fiables au nord de l'Algérie.

Ces résultats ont été obtenus sans station RIMS (*Ranging and Integrity Monitoring Stations*) en Algérie; les perspectives d'étendre la couverture du système EGNOS en dehors de la zone de service actuelle, présente un grand intérêt pour l'Europe, non seulement au niveau technique, mais également au niveau commercial et politique. Enfin, l'étude faite sur la faisabilité d'installer deux stations RIMS en Algérie fait suite à la sollicitation de la Commission Européenne sur la possibilité de mise en place de deux stations RIMS du système EGNOS; une station à Oran et par la suite une deuxième à Adrar. À cet effet, cinq sites ont été étudiés et analysés afin de comparer la disponibilité et l'erreur sur la grille ionosphérique; Oran fixé comme site opérationnel, Ouargla (à 31°) et quatre sites situés entre les latitudes 27° et 30° (El Goléa, Timimoun, Adrar et In Salah).

Cette étude a permis de comprendre l'influence des stations RIMS pour améliorer la précision de positionnement, les principales conclusions sont :

- Les corrections fournies par chaque station RIMS sont dépendues des stations voisines;
- L'amélioration de service EGNOS est interne du réseau des stations RIMS;
- La portée entre deux RIMS est importante (le réseau RIMS est dense ce qui implique que l'amélioration est importante).

Actuellement, le système EGNOS permet d'avoir une bonne couverture au nord de l'Algérie, par contre en se dirigeant vers le sud cette couverture s'affaiblit. Les résultats des simulations ont prouvé que la mise en place d'une seule station au sud de l'Algérie, permet d'avoir une bonne exploitation du système et en même temps étendre sa zone de service, spécialement au-dessus de latitude 30°. Par contre, la mise en place de deux stations RIMS (une à Oran et l'autre au Sud) étendra la zone de couverture d'EGNOS jusqu'à 25° de latitude, ce qui permettrait certainement de recevoir des corrections fiables.

En outre, une analyse des performances du système EGNOS en termes de précision et intégrité a été effectuée pour les deux sites (Oran et Adrar) en utilisant des données réelles collectées par des récepteurs géodésiques; ces deux sites sont proposés comme des stations RIMS en Algérie.

Le traitement des données sur les sites d'Oran et d'Adrar a montré que le meilleur niveau de performance en termes de précision et d'intégrité atteignable par le GPS+EGNOS se trouve au niveau du site d'Oran, ce qui confirme l'hypothèse de l'éloignement du site d'Adrar par rapport au réseau de stations RIMS.

Finalement, les critères pour sélectionner le meilleur emplacement d'une station RIMS dépendent de nombreux facteurs, non seulement techniques, mais aussi institutionnels, politiques ou réglementaires et sans oublier les considérations de sécurité.

Les travaux de thèse ouvrent des perspectives prometteuses sur l'évaluation de la précision et l'intégrité du système EGNOS en Algérie avant et après la mise en place de deux stations RIMS en Algérie.

Sur le plan expérimental, il serait intéressant de continuer la suite de ce travail sur une longue période et sur des différents sites dans le nord de l'Algérie afin de pouvoir étudier l'amplitude de la précision du système EGNOS en comparant avec le GPS.

Les résultats obtenus à travers ce travail sont satisfaisants et nécessitent d'autres jeux de données par la suite, en particulier sur les parties où les corrections EGNOS ne sont pas fiables, dont le but est d'étudier et analyser le degré de fiabilité des corrections EGNOS dans différents sites nationaux situés au centre et au sud de l'Algérie.

Il serait aussi intéressant de tester le service ouvert OS (*Open Service*) du système EGNOS, qui est disponible depuis 2009, ce service est destiné à offrir de nombreux avantages pour des applications générales qui nécessitent une précision métrique en temps réel (domaine maritime agriculture, transport routier, rail, cartographie...).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Arbesser-Rastburg B., 2002 :** *Ionospheric Corrections for Satellite Navigation Using EGNOS*. Proceeding Conference: XXVII General Assembly of the International Union of Radio Science. Netherlands.
- Asgari J., 2005 :** *Etude de modèles prédictifs dans un réseau de stations GPS permanentes*. Thèse de doctorat. Observatoire de PARIS.
- Banville S., 2007 :** *Aspects liés à la résolution des ambiguïtés de phase dans le positionnement ponctuel de précision (PPP) par GPS*. Thèse de Maître èssciences. Université Laval. Québec.
- Beldjilali B. and Benadda B., 2016:** *Optimized Station based on GNSS Signals Acquisition and Meteorology Parameters for the Estimation of the Atmospheric Integrated Water Vapor IWV*. ETRI Journal, <https://doi.org/10.4218/etrij.16.0116.0093>.
- Benoît L., 2014 :** *Positionnement GPS précis et en temps-réel dans le contexte de réseaux de capteurs sans fil type Geocube : application à des objets géophysiques de taille kilométrique*. Thèse de doctorat, IGN.
- Bijjahalli S., Sabatini R. and Gardi A., 2019 :** *GNSS Performance Modeling and Augmentation for Urban Air Mobility*. Sensors 2019, 19, 4209; DOI: 10.3390/s19194209. Available at www.mdpi.com/journal/sensors.
- Bilewski M. and Zalewski P., 2018 :** *Assessment of GNSS position integrity with the use of post-processed EGNOS data in the area of szczecin-świnoujście waterway*. Annual of navigation. Volume 25: Issue 1, pp 67-77. DOI: 10.1515/aon-2018-0005.
- Blăgescu D-L. and Bătrînache I-A., 2015 :** *Matlab based approach of decoding EGNOS message*. Journal of Young Scientist. Volume III. ISSN 2344 - 1283; ISSN; ISSN Online 2344 - 1305; ISSN-L 2344 – 1283.
- Brocard D., Maier T. and Busquet C., 2000:** *EGNOS Ranging and Integrity Monitoring Stations (RIMS)*. GNSS May. 2000 Conference, Edinburgh, Scotland, UK.
- Bureau des radiocommunications, 2010 :** *Manuel transfert et diffusion par satellite de signaux horaires et de fréquence*. ISBN 978-92-61-13302-3. Genève. Suisse.
- Capderou M., 2012:** *Satellites : de Kepler au GPS*. ISBN-13: 978-2-287-99049-6. Springer-Verlag France, Paris 2012.
- Celestino U., 2017 :** *EGNOS status, roadmap, extension to Euromed*. Joint ACAC/ICAO Workshop on GNSS. Rabat. Morocco.
- Chen X., Parini CG., Collins B., Yao Y. and Rehman MU., 2012:** *Antennas for global navigation satellite systems*. Electronic book available at www.wiley.com. ISBN 978-1-119-99367-4. Published by John Wiley & Sons, Ltd. United Kingdom.

- China Satellite Navigation Office, 2011:** *BeiDou Navigation Satellite System. Signal in Space. Interface Control Document*. BeiDou-SIS-ICD-Test.
- Choy S., Kuckartz J., Dempster A.G., Rizos C. and Higgins M., 2016 :** *GNSS satellite-based augmentation systems for Australia*. GPS Solution, volume number 21. Issue number 3. PP 835- 848. DOI.org/10.1007/s10291-016-0569-2.
- Ciećko A. and Grunwald G., 2017 :** *Examination of Autonomous GPS and GPS/EGNOS Integrity and Accuracy for Aeronautical Applications*. Periodica Polytechnica Civil Engineering. 61 (4), pp. 920–928, 2017. <https://doi.org/10.3311/PPci.10022>.
- Ciollaro M., 2008 :** *GNSS multi system integrity for precision approaches in civil aviation*. Doctoral thesis, University of Naples "Federico II".
- Collins P. and Langley R.B., 1999 :** Tropospheric delay. GPS WORLD, page 53-58. Available at: <https://www.gpsworld.com/>.
- Cui J., Yan R., Deng C., Tang W., Zou X., Shen M., Liu Q., Wang Y. and Li Y., 2019:** *GPS + BDS Network Real-Time Differential Positioning Using a Position Domain Estimation Method*. Remote Sensing, 11, 1480. DOI: 10.3390/rs11121480. Available at www.mdpi.com/journal/remotesensing.
- Das PP. and Nakamura S., 2016:** *Analysis of GPS Single Point Positioning and Software Development*. International Journal of Electronics & Communication Technology (IJEET) Vol. 7, Issue 1. ISSN: 2230-7109 (Online) | ISSN: 2230-9543 (Print).
- De Lellis E., Corrado F., Ciniglio U., Canzolino P., Garbarino L., Gaglione S. and Nastro V., 2009 :** *An EGNOS Based Navigation System for Highly Reliable Aircraft Automatic Landing*. Conference Proceedings of the European Navigation Conference (ENC). University of Naples, Italy.
- Delaporte T., 2009:** *Real-time kinematic software using robust Kalman filter and dual-frequency GPS signals for high precision positioning*. Doctoral thesis. Quebec University.
- Desai MV. and Shah SN., 2019 :** *Estimation of ionospheric delay of NavIC/IRNSS signals using the Taylor Series Expansion*. Journal of. Space Weather Space Clim.9, A23, doi <https://doi.org/10.1051/swsc/2019023>.
- El-Rabbani A., 2002:** Introduction to GPS, the Global Positioning System. Artech House Mobile Communications Series, second edition. Norwood. Artech House.
- ESA, 2004:** *EGNOS Message Server (EMS) User Interface Document*, GNSS-1 Project Office Ref: E-RD-SYS-E31-011-ESA Issue: 2.
- ESA, 2010:** *SBAS simulator user manual*. Available: at www.egnos-pro.esa.int/sbas/simulator.
- ESA, 2016:** *EGNOS V3 Phases C/D - Summary Statement of Work*. EGNOS Project Office.

- ESA, 2017:** *EGNOS Open Service (OS) Service Definition Document*. OS-SDD. Issue, 2.3. Available at: <http://egnos-portal.eu/library/technical-documents>.
- ESA, 2019 (a):** *EGNOS Service Definition Document – Safety of Life Service*. Issue 3.3. ISBN 978-92-9206-040-4. DOI: 10.2878/80122. Available at: <http://egnos-portal.eu/library/technical-documents>.
- ESA, 2019 (b) :** *EGNOS Data Access Service (EDAS) Service Definition Document Issue 2.2*. ISBN 978-92-9206-038-1. DOI: 10.2878/729922. Available at: <http://egnos-portal.eu/library/technical-documents>.
- Eurocontrol, 2003:** *Technical Notes on SBAS*; Doc No: PEG-TN-SBAS, Issue: I, Project: PEGASUS.
- Fonseca A., Azinheira J. and Soley S., 2006 :** *Contribution to the operational evaluation of EGNOS as an aeronautical navigation system*. 25TH International congress of the aeronautical sciences.
- gAGE (2017) (a):** GNSS-Lab tool Software User Manual. Iss./Rev: 1.8. Barcelona, Spain.
- gAGE, 2017 (b):** ESA GNSS Education; GNSS-Lab tool Software; user Manual. Iss./Rev 1.8 Research Group of Astronomy & Geomatics. Technical University of Catalonia. Spain.
- gAGE, 2017 (c):** gLAB Upgrade with SBAS data processing; Software User Manual for SBAS processing. Iss./Rev 1.6 Research Group of Astronomy & Geomatics. Technical University of Catalonia. Spain.
- Ganeshan A.S., Satish S.V., Kartik A., Nirmala S. and Ramesh G., 2016:** *Indian’s Satellite-Based Augmentation System, GAGAN-redefining navigation over the Indian region*. Inside GNSS. PP 42-48.
- Ge Y., Zhou F., Sun B., Wang S. and Shi B., 2017:** *The Impact of Satellite Time Group Delay and Inter-Frequency Differential Code Bias Corrections on Multi-GNSS Combined Positioning*. *Sensors* 17(3), 602; <https://doi.org/10.3390/s17030602>.
- Georges G., 2016 :** *Algorithmes de calcul de positions GNSS bases sur les méthodes des moindres carrés avancées*. Thèse de doctorat. Université de Technologie de Belfort-Montbéliard.
- Grunwald G., Bakula M., Ciecko A. and Kazmierczak R., 2015 :** *Examination of GPS/EGNOS integrity in north-eastern Poland*. The Institution of Engineering and Technology (IET) Radar, Sonar & Navigation, pp. 1–8. ISSN 1751-8784. doi: 10.1049/iet-rsn.2015.0053.
- Grunwald G., Ciecko A. and Tanajewski D., 2019 :** *Analysis of Applying the EGNOS System in APV-1 and LPV200 Operations*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 221 012075, DOI:10.1088/1755-1315/221/1/012075.
- Guay J-C., 2010 :** *Récepteur SBAS-GNSS logiciel pour des applications temps-réel*. Maîtrise en génie électrique. Université du Québec.

- Gurtner W., 2007:** *RINEX: The Receiver Independent Exchange Format Version 2.11*. Boulder: UNAVCO. Available at: <https://www.ngs.noaa.gov/CORS/RINEX211.txt>.
- Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H. and Wasle E., 2008:** *GNSS – Global Navigation Satellite Systems GPS, GLONASS, Galileo, and more*. ISBN 978-3-211-73012-6 Springer Wien NewYork.
- Ibáñez D., Rovira-García A., Sanz J., Juan JM., Gonzalez-Casado G., Jimenez-Baños D., López-Echazarreta C. and Lapin I., 2018.** *The GNSS Laboratory Tool Suite (gLAB) updates: SBAS, DGNSS and Global Monitoring System*. 9th ESA Workshop on Satellite Navigation Technologies (NAVITEC 2018), Noordwijk. Noordwijk. The Netherlands. DOI: 10.1109/NAVITEC.2018.8642707.
- ICAO, 2015 :** *Services EGNOS/SBAS en Afrique en tant que programme régional*. Note présentée par le bureau du programme conjoint d'EGNOS Afrique (JPO). Yamoussoukro, Côte d'Ivoire. Groupe Régional AFI De Planification Et De Mise En Œuvre Vingtième Réunion (APIRG/20) APIRG– WP/14.
- ICAO, 2019:** *Guidance on GNSS implementation in the mid region*. Report of the ninth meeting of CNC sub-group CNS SG/9-WP/12. Cairo, Egypt.
- ICAO, OACI, and NCAO, 2016:** *SBAS safety assessment guidance related to anomalous ionospheric conditions*. Edition 1.0. Adopted by APANPIRG/27. International civil aviation organization Asia and pacific office.
- Jaferník H., Fellner A., Mrozík M. and Krasuski K., 2017:** *Results of aircraft positioning tests in post-processing using the GNSS*. Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport. 2017, 95, 67-74. ISSN: 0209-3324. DOI: <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2017.95.7>.
- Jan S., 2003:** *Aircraft landing using a modernized global positioning system and the wide area augmentation system*. Doctorat thesis. Stanford University.
- Jeffrey C., 2010 :** *An introduction to GNSS; GPS, GLONASS, Galileo and Global Navigation Satellite Systems*. First edition. ISBN: 978-0-9813754-0-3. Calgary, Canada.
- Jimenez-Baños D., Powe M., Mathur AR., Toran F., Flament D. and Chatre E., 2011 :** *EGNOS Open Service Guidelines for receiver manufacturers*. 24th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Portland OR, September 19-23, 2011.
- Jin S., 2012:** *Global Navigation Satellite Systems – Signal, Theory and Applications*. InTech Rijeka, Croatia. Numerical book is available at: www.intechopen.com. ISBN 978-953-307-843-4.
- Jin S., Jin R. and Li D., 2016:** *Assessment of BeiDou differential code bias variations from multi-GNSS network observations*. Annales Geophys. DOI: 10.5194/angeo-34-259-2016 www.ann-geophys.net/34/259/2016/.

- Jin S.G., Cardellach E. and Xie F., 2014:** *GNSS Remote Sensing; theory, Methods and Applications*. ISSN 1567-3200. ISBN 978-94-007-7481-0. ISBN 978-94-007-7482-7 (eBook). DOI 10.1007/978-94-007-7482-7. Springer. New York. London.
- Kahlouche S., Tabti L., 2015:** *Feasibility study and site choice for EGNOS station in Algeria*. International Committee on Global Navigation Satellite Systems (GNSS). 15-18 December. Vienna. Austria.
- Kahlouche S., Tabti L., 2017 :** *EGNOS performance using L1/L5 dual frequency on the Algerian area*, European Geosciences Union General Assembly EGU 23–28 April Vienna. Austria.
- Kahlouche S., Touam S., Anzidei M., 1998 :** *Integration of GPS Algerian sites in west Mediterranean geodynamical studies - case of TYRGEONET project - in 'Geodesy on the move' - International Association of Geodesy Journal Vol 119 [pp 425 - 430] – ISBN 3-540-64605- Springer Verlag Editor.*
- Kaplan E.D. and Hegarty C.J., 2006 :** *Understanding GPS; Principles and Applications*. Second Edition. ISBN 1-58053-894-0. ARTECH HOUSE.
- Kazmierski K., Santos M. and Bosy J., 2016 :** *Tropospheric delay modelling for the EGNOS augmentation system*. Survey Review, DOI: 10.1080/00396265.2016.1180798. Available at: <http://dx.doi.org/10.1080/00396265.2016.1180798>.
- Kozuba J., Krasuski K., Cwiklak J. and Jafernik H., 2018:** *Aircraft position determination in SBAS system in air transport*. Engineering for rural development. DOI: 10.22616/ERDev2018.17.N464. Jelgava.
- Krasuski K., 2017:** *Application of the GPS/EGNOS solution for the precise positioning of an aircraft vehicle*. Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport. ISSN: 0209-3324. DOI: <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2017.96.81-93>.
- Leick A., Rapport L. and Tatarnikov D., 2015:** *GPS satellite surveying*. Numerical book, fourth Edition. ISBN 978-1-118-67557-1. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken. Canada.
- Lesouple J., 2019 :** *Estimation parcimonieuse de biais multi trajets pour les systèmes GNSS*. Thèse de doctorat. Université de Toulouse.
- Li L., Jia C., Zhao L., Cheng J., Liu J. and Ding J., 2016:** *Real-Time Single Frequency Precise Point Positioning Using SBAS Corrections*. Sensors, 16, 1261. DOI:10.3390/s16081261. Available at: www.mdpi.com/journal/sensors.
- Lim C-S., Park B., So H., Jang J., Seo S., Park J., Bu S-C. and Lee C-S., 2016:** *Analysis on the Multi-Constellation SBAS Performance of SDCM in Korea*. Journal of positioning navigation and timing (JPNT) 5(4), 181-191, <https://doi.org/10.11003/JPNT.2016.5.4.181>. Online ISSN: 2289-0866.

- Liu J., Chen R., Chen Y., Kröger T. and Pei L., 2012:** *Performance evaluation of EGNOS in challenging environments*. Journal of Global Positioning Systems, 11(1), 145–155.
- Liu Z., Lia Y., Guoa J. and Lia F., 2016 :** *Influence of higher-order ionospheric delay correction on GPS precise orbit determination and precise positioning*. Geodesy and Geodynamics, 7(5), 369–376.
- Liu Z., Lia Y., Guoa J. and Lia F., 2016:** *Influence of higher-order ionospheric delay correction on GPS precise orbit determination and precise positioning*. Geodesy and Geodynamics (2016), vol 7 no 5, 369e376, <http://dx.doi.org/10.1016/j.geog.2016.06.005>.
- Lo SC., 2002 :** *Broadcasting GPS integrity information using LORAN-C*. Doctoral thesis. Sanford University.
- Lupsic B. and Takács B., 2019:** *Analysis of the EGNOS ionospheric model and its impact on the integrity level in the central Eastern Europe region*. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-4/W14, Bucharest, Romania. Available at: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W14-159-2019>.
- Ma L. and Wang M., 2013:** *Influence of ephemeris error on GPS single point positioning accuracy*. Artificial satellites, Vol. 48. No. 3. DOI: 10.2478/arsa-2013-0011.
- Magdaleno S., Lacarra E., Casa Cdl., López M., Roldán R. and Blanco N., 2019:** *SBAS guidelines for shipborne receiver: EGNOS performance based on IMO RES. A.1046 (27)*. Annual of navigation 26/2019. Volume 26: Issue 1. DOI: 10.1515/aon-2019-0008.
- Mukesh R., Karthikeyan V., Soma P., Sindhu P. and Elangovan R.R., 2019:** *Performance analysis of Navigation with Indian Constellation satellites*. Journal of King Saud University – Engineering Sciences, doi.org/10.1016/j.jksues.2019.06.002.
- Nie Z., Zhou P., Liu F., Wang Z. and Gao Y., 2019:** *Evaluation of Orbit, Clock and Ionospheric Corrections from Five Currently Available SBAS L1 Services: Methodology and Analysis*. Remote sensing Remote 2019, 11, DOI: 10.3390/rs11040411, www.mdpi.com/journal/remote_sensing.
- Nouvel O., Sihrener M., Issler J.L., Lestarquit L., Macabiau C. and Julien O., 2007:** *SBAS C/A Code Interferences, Observations and Induced Tracking Errors*. Proceedings of the 20th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS), Fort Worth, TX, pp. 950-959.
- Nurmi J., Lohan E-S., Sans S. and Hurskainen H., 2015:** *GALILEO Positioning*. Numerical book Technology, Signals and communication technology 182. ISSN 1860-4870. ISBN 978-94-007-1829-6, doi 10.1007/978-94-007-1830-2. Springer, New yoek.London.
- OACI, 2012 :** *Question de mise en œuvre du système mondial de navigation par satellite*. Deuxième conférence de navigation aérienne. N-Conf/12-WP/21 .Montréal.

- Oliveira J. and Tiberius C., 2009:** *Quality Control in SBAS: Protection Levels and Reliability Levels*. The Journal of Navigation, 62, 509–522. The Royal Institute of Navigation. DOI: 10.1017/S0373463309005311. United Kingdom.
- Orliac E., 2002 :** *Modèle du retard troposphérique pour la navigation satellitaire*. Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik. Available at www.library.ethz.ch <http://www.e-periodica.ch>.
- Paparini C., 2013:** *Improvement of ionospheric corrections applied to the European geostationary navigation overlay system (EGNOS) for applications to terrestrial positioning*. Doctoral thesis. Trieste, Italy.
- Penna N., Dodson A. and Chen W., 2001:** *Assessment of EGNOS Tropospheric Correction Model*. Journal of Navigation, 54(1), 37–55, DOI: 10.1017/s0373463300001107, Volume 54, Issue 1, pp. 37-55.
- Powell J.D., Walter T., Kim E. and Peled U., 2007:** *Use of the Wide Area Augmentation System (WAAS) as a Reference for Flight Inspection*. Final Report FAA Contract. AC-05-00695.
- Prasad R. and Ruggieri M., 2005:** *Applied satellite navigation using GPS, GALILEO, and augmentation systems* mobile communications series. Artech House. ISBN 1-58053-814-2. London.
- Rathan M P., Raghu N., Basnet A. and Chethan S., 2018:** *Tracking and Analysis of GAGAN and GPS Satellites in Flight Indian Region*. IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology. 18-19 May. Bangalore, Inde.
- Roturier B., 2004 :** *Les procédures APV EGNOS, une réponse performante et sûre au besoin de guidage vertical pour les approches*. Revues techniques -Bulletin STNA-58 collection mémoire de l'aviation civile.
- Rovira-Garcia A., Juan JM., Sanz Subirana J., González-Casado G. and Ibáñez D., 2015:** *Accuracy of ionospheric models used in GNSS and SBAS: methodology and analysis*. J Geod (2016) 90:229–240 DOI 10.1007/s00190-015-0868-3. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- RTCA, 2001:** *Minimum Operational Performance Standards for Global Positioning System/wide area augmentation system airborne equipment*. Washington, DC 20036. Supersedes DO-229B.
- Sakai T., 2016:** *Japanese SBAS Program: Current Status and Dual-Frequency Trial*. International Symposium on GNSS. December. Tainan, Taiwan.
- Sakai T., Fukushima S., Arai N., and Ito K., 2006:** *Implementation of Prototype Satellite-Based Augmentation System (SBAS)*. International Global Navigation Satellite Systems Society IGNSS Symposium 2006 Holiday Inn Surfers Paradise. Australia.

- Santerre R., Pan L., Cai C. and Zhu J., 2014:** *Single Point Positioning Using GPS, GLONASS and BeiDou Satellites*. Scientific Research, 5, 107-114. Available at SciRes: <http://www.scirp.org/journal/pos> <http://dx.doi.org/10.4236/pos.2014.54013>.
- Sanz Subirana J., Juan Zornoza J.M., Hernández-Pajares M., 2013:** *GNSS Data Processing, Volume I: Fundamentals and Algorithms*. Numerical book. European Space Agency TM-23/1. Netherlands. 233 p. ISBN 978-92-9221-886-7. ISSN 1013-7076.
- Sauer K., 2003:** *Integrated high precision kinematic positioning using GPS and EGNOS observations*. Doctoral thesis. University of London, United Kingdom.
- Sitruk A., and Plattard S., 2017:** *The Governance of Galileo*. Report 62. European Space Policy Institute, ESPI. ISSN: 2076-6688. Vienna. Austria.
- Specht C., Pawelski J., Smolarek L., Specht M. and Dabrowski P., 2019:** *Assessment of the Positioning Accuracy of DGPS and EGNOS Systems in the Bay of Gdansk using Maritime Dynamic Measurements*. The journal of Navigation, volume 72, Issue 3, PP 575–587. Cambridge. Doi: 10.1017/S0373463318000838.
- Speidel J., Tossaint M., Wallner S. and Angelavila-Rodriguez J., 2013:** *Integrity for aviation; comparing future concepts*. Inside GNSS.
- Storm van Leeuwen S., Marel HV.D., Tossaint M. and Martelluci A., 2004:** *Validation of SBAS MOPS Troposphere Model over the EGNOS Service Area*. Nationaal Lucht- En Ruimtevaart laboratorium. NLR-TP-2004-22.
- Su K., Jin S. and Hoque M. M., 2019:** *Evaluation of ionospheric delay effects on multi-GNSS positioning performance*. Remote Sensing, 11, 171. Available at: www.mdpi.com/journal/remotesensing.
- Tabti L., and Kahlouche S., 2016 :** *Improving availability of the EGNOS system in Algeria for dual frequency SBAS*. 9th annual BAŠKA GNSS conference. Baška, Krk Island, Croatia. ISSN 1849-7306.
- Tabti L., et Abidallah S., 2014 :** *Etude de faisabilité d'une station EGNOS à Tamanrasset*. Bulletin des Sciences Géographiques, INCT, N°29, pp. 23-28.
- Tabti L., Kahlouche S. and Benadda B., 2019:** Preliminary study of improving position in north of Algeria using GPS and EGNOS corrections. IEEE Part Number: CFP1968Y-USB. ISBN: 978-1-7281-1243-5- International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC). 19-20 June. Istanbul – Turkey.
- Tabti L., Kahlouche S. and Benadda B., 2018 :** Improving availability of the EGNOS system in Algeria for dual frequency. Coordinate Magazine, january. ISSN 0973-2136, pp.36-40.
- Tabti L., Kahlouche S. et Benadda B., 2018 :** Étude de faisabilité et choix optimal d'une station RIMS d'EGNOS en Algérie. Revue XYZ, N° 157 – 4e trimestre 2018, 40ème année. ISSN 0290-9057, pp.52-56.

- Tabti L., Kahlouche S., Benadda B. and Beldjilali B., 2020:** *Improvement of a single frequency GPS positioning performance based on EGNOS corrections in Algeria.* Journal of Navigation, Cambridge University, UK. DOI:10.1017/S037346331900095X. available at: <https://www.cambridge.org/core/terms>. <https://doi.org/10.1017/S037346331900095X>.
- Takács B., Siki Z. and Markovits-Somogyi R., 2017:** *Extension of RTKLIB for the calculation and validation of protection levels.* The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-4/W2, FOSS4G-Europe–Academic Track, Marne La Vallée, France.
- Tetley L. and Calcutt D., 2001:** *Electronic Navigation Systems.* Butterworth-Heinemann Great Britain. Second edition ISBN 0 7506 51385.
- Tsui JBY., 2005:** *Fundamentals of Global Positioning System Receivers: A Software Approach.* Numerical book, second Edition. ISBN 0-471-70647-7. John Wiley & Sons, Inc.
- Vasile V., Magu G., Cosnita R., Nafornita C., Isar A. and Borda M., 2018:** *EGNOS Performance Improvements Using Monitoring Stations in Romania.* International Symposium on Electronics and Telecommunications (ISETC), Timisoara, pp. 1-6. DOI: 10.1109/ISETC.2018.8583900.
- Vassilev B. and Vassileva B., 2011:** *The Satellite Navigation System EGNOS and Safety of Life Service Performance in Sofia.* Information technologies and control. PP 32-39.
- Vázquez J., Lacarra E., Morán J., Sánchez M.A., González A., Bruzual J. and Rioja J., 2019:** *EDAS (EGNOS data access service) differential GNSS corrections: a reliable free-of-charge alternative for precision farming in Europe.* Annual of navigation, volume 26, issue 1, PP 46–58. DOI: 10.1515/aon-2019-0005.
- Walter T., 1999:** *WAAS MOPS: Practical Examples,* Proceedings of the National Technical Meeting of the Institute of Navigation. January. San Diego, CA, pp. 283-293.
- Walter T., Blanch J. and Enge P., 2012:** *L1/L5 SBAS MOPS to Support Multiple Constellations.* Proceedings of the 25th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS), September 17-21. Nashville, TN, pp. 1287- 1297.
- Xie W., Huang G., Cui B., Li P., Cao Y., Wang H., Chen Z. and Shao B., 2019:** *Characteristics and Performance Evaluation of QZSS Onboard Satellite Clocks.* Sensors 19, 5147. DOI: 10.3390/s19235147. Available at: www.mdpi.com/journal/sensors.
- Zahidul M., Bhuiyan H., Kuusniemi H., Soderini A., Honkala S. and Marila S., 2017:** *Performance of EGNOS in North-East European Latitudes.* Proceedings of the International Technical Meeting of the Institute of Navigation, Monterey, California, 627–636. <https://doi.org/10.33012/2017.14881>.

Références internet :

<ftp://serenad-public.cnes.fr/>

<https://egnos-user-support.essp-sas.eu/>

<https://www.navcen.uscg.gov/>

<https://egnos-user-support.essp>

<https://gage.upc.es/gLAB/>

www.iguassu.cz/sbas-sim/

ANNEXES

Annexe 1 : Exemple d'un fichier SBAS " <i>output</i> "	128
Annexe 2 : Format du fichier RINEX.....	130
Annexe 3 : Format de fichier de corrections EGNOS RINEX-b.....	133
Annexe 4 : Publications.....	133

Annexe 1 : Exemple d'un fichier SBAS "output"

```

INFO gLAB version v5.4.4, built on May 10 2019 12:15:44
INFO Processing with broadcast products
INFO Forcing ionospheric model for this processing
INFO RINEX observation input file: C:\Users\Ltabti\obs_Alger_04 2018\Alger
09_04_2018\00570990.18o
INFO RINEX navigation message input file: C:\Users\Ltabti\obs_Alger_04 2018\Alger
09_04_2018\00570990.18n
INFO SBAS message data input file: C:\Users\Ltabti\obs_Alger_04 2018\Alger
09_04_2018\M1200990.18b
INFO File for P1-P2 DCB corrections same as for navigation
INFO SBAS processing mode activated
INFO INPUT Station marker: 0057
INFO INPUT Antenna type: TRM55971.00 NONE
INFO INPUT Receiver type: Geo Explorer 3 [Unknown]
INFO PREPROCESSING Prealign carrier phase measurements: ON
INFO PREPROCESSING Decimation 1
INFO PREPROCESSING Usable frequencies [GPS]: F1 F2 F5
INFO PREPROCESSING Elevation mask: 10.00
INFO PREPROCESSING Discard satellites under eclipse conditions: NO
INFO PREPROCESSING Receiver a priori position: 5108082.4260 268514.5980 3797820.7820
[SET]
INFO PREPROCESSING N-consecutive: ON [Min:3]
INFO PREPROCESSING Cycle-slip Data Gap: OFF (all cycle-slip detectors disabled)
INFO PREPROCESSING SNR Mask (dBHz): G01-32: 33
INFO MODELLING Receiver Antenna Reference Point (ARP): 0.0000 0.0000 0.1220
INFO MODELLING Relativistic clock correction: ON
INFO MODELLING Ionosphere model: SBAS
INFO MODELLING Troposphere model: ON
INFO MODELLING Troposphere model: UNB-3 Nominal
INFO MODELLING Troposphere model: Simple Mapping
INFO MODELLING P1-P2 DCB model: RINEX
INFO MODELLING SBAS Navigation Mode: PA
INFO MODELLING SBAS GEO acquisition time: 300 (seconds)
INFO MODELLING SBAS switching cooltime: 0 (seconds)
INFO MODELLING SBAS MT 1 (PRN Mask) timeout PA: 600 (seconds)
INFO MODELLING SBAS MT 6 (Integrity Info) timeout PA: 12 (seconds)
INFO MODELLING SBAS MT 7 (Fast Correction Degradation Factor) timeout PA: 240 (seconds)
INFO MODELLING SBAS MT 18 (Ionospheric Grid Points Mask) timeout PA: 1200 (seconds)
INFO MODELLING SBAS MT 25 (Long Term Satellite Corrections) timeout PA: 240 (seconds)
INFO MODELLING SBAS MT 26 (Ionospheric Delay Corrections) timeout PA: 600 (seconds)
INFO MODELLING SBAS Kh factor PA: 6
INFO MODELLING SBAS Kv factor PA: 5.33
INFO MODELLING SBAS Receiver type: user defined
INFO MODELLING SBAS Receiver sigma multipath: 0.13 + 0.53*e^(-elev/10) (metees)
INFO MODELLING SBAS Receiver sigma noise: 0.36 (meters)
INFO MODELLING SBAS Receiver sigma divergence: 0 (meters)
INFO FILTER Measurement: 1 C1C G01-32: StdDev^2: SBAS variance
INFO FILTER Parameters [Phi,Q,P0] Position: 0.00e+000 1.00e+008 1.00e+008
INFO FILTER Parameters [Phi,Q,P0] Clock: 0.00e+000 9.00e+010 9.00e+010

```

INFO FILTER Parameters [Phi,Q,P0] Troposphere: 1.00e+000 1.00e-004 2.50e-001

INFO FILTER Parameters [Phi,Q,P0] Ambiguity: 1.00e+000 0.00e+000 4.00e+002

INFO OUTPUT Coordinate system for Reference file: Cartesian WGS84 (X Y Z)

INFO OUTPUT Satellite Velocity: ITRF

SATSEL 2018 099 2700.00 GPS 19 selected

SATSEL 2018 099 2700.00 GPS 22 selected

SATSEL 2018 099 2700.00 GPS 23 selected

SATSEL 2018 099 2700.00 GPS 28 selected

SATSEL 2018 099 2700.00 GPS 31 selected

**OUTPUT 2018 099 2700.00 2.4829 5108081.7290 268515.4600 3797821.0640 -0.6970
0.8620 0.2820 1.6359 1.2021 1.4297 36.777051329 3.009085618 361.6910 0.6155
0.8974 -0.3524 1.0989 1.2039 1.8730 1.4506 1.2920 0.6596 0.8093 1.0071 0.0000
0.0000 0.0000 11 2**

**SBASOUT 0057 PA 2018 099 2700.00 1996 89100.00 120 0.6155 0.8974 -0.3524
1.0882 7.3117 0.3524 9.9377 -45534.0800 12 11 +G01 +G03 +G08 +G11 +G14 +G17
+G19 +G22 +G23 +G28 +G31 -G18**

INFO ----- SBAS Summary -----

INFO Horizontal Alarm limit: 40.00 meters

INFO Vertical Alarm limit: 50.00 meters

INFO First epoch of summary: 09/04/2018 00:00:00.00 / 2018 099 0.00 / 1996 86400.00

INFO Last epoch of summary: 09/04/2018 23:59:50.00 / 2018 099 86390.00 / 1996 172790.00

INFO Total epochs processed: 8640

INFO Total epochs processed with PA solution: 8634 (99.931%)

INFO Total epochs processed with PA solution under alarm limits: 8633 (99.919%)

INFO Total epochs skipped due to less than 4 valid satellites available: 6 (0.069%)

INFO Horizontal 95 Positioning Error Percentile: 1.51 meters

INFO Vertical 95 Positioning Error Percentile: 1.45 meters

INFO Horizontal 95 Protection Level Percentile: 13.28 meters

INFO Vertical 95 Protection Level Percentile: 21.15 meters

INFO Maximum Horizontal Positioning Error: 3.38 meters at epoch 09/04/2018 00:01:50.00 / 2018 099 110.00 / 1996 86510.00

INFO Maximum Vertical Positioning Error: 3.58 meters at epoch 09/04/2018 05:40:30.00 / 2018 099 20430.00 / 1996 106830.00

INFO Maximum Horizontal Protection Level: 69.48 meters at epoch 09/04/2018 00:01:00.00 / 2018 099 60.00 / 1996 86460.00

INFO Maximum Vertical Protection Level: 71.92 meters at epoch 09/04/2018 00:01:00.00 / 2018 099 60.00 / 1996 86460.00

INFO Station: 0057 Lon: 3.00907557 Lat: 36.77704578 Height: 362.0434 HWIR: 0.2454 VWIR: 0.1814 MIs: 0 Hor_MIs: 0 Ver_MIs: 0 HPE_Percentile: 95 1.51 VPE_Percentile: 95 1.45 MaxHPE: 3.38 MaxVPE: 3.58 HPL_Percentile: 95 13.28 VPL_Percentile: 95 21.15 MaxHPL: 69.48 MaxVPL: 71.92 Avail%: 99.919 Cont_Risk: 0.0000E+000

Annexe 2 : Format d'un fichier RINEX

Le récepteur NetR9 utilisé dans le cadre de ce travail, est un récepteur GNSS à fréquences multiples, les caractéristiques de ce récepteur sont les suivantes :

- Il dispose de 440-canaux;
- Il peut suivre GPS L1/L2/L2C/L5;
- Il peut suivre GLONASS L1 C/A et P code non crypté, L2 C/A, P code non crypté;
- Il peut suivre Galileo : SBAS L1C/A et L5 prenant en charge WAAS, EGNOS, et MSAS;
- Il peut suivre L-Band: Omni STAR VBS/HP/XP

Le récepteur est destiné à une utilisation avec une antenne *Zephyr Geodetic Modèle 2* ou une antenne *'Choke Ring'* GNSS de Trimble. La figure 1 montre le boîtier du récepteur auquel on connecte l'antenne.



FIG 1. Récepteur Trimble NetR9

Lors de l'acquisition des données GPS par le récepteur NetR9 de Trimble, le format brut des fichiers est de la forme **ssssdddf. TO** spécifique à Trimble.

Pour exploiter ces fichiers à l'aide du logiciel gLAB, il faut dans un premier temps les convertir en format RINEX (*Receiver Independent Exchange Format*). Le format RINEX a été conçu pour faciliter l'échange des données GPS produites par des récepteurs construits par des fabricants différents.

La plupart des fabricants de récepteur GPS offrent des utilitaires qui permettent de transformer les données brutes en format RINEX. La conversion de ces fichiers s'effectue avec l'outil *"Convert to RINEX"* de Trimble présenté par la figure 2, qui fait la conversion des données directement au format RINEX (*fichier d'observation + fichier de navigation*).

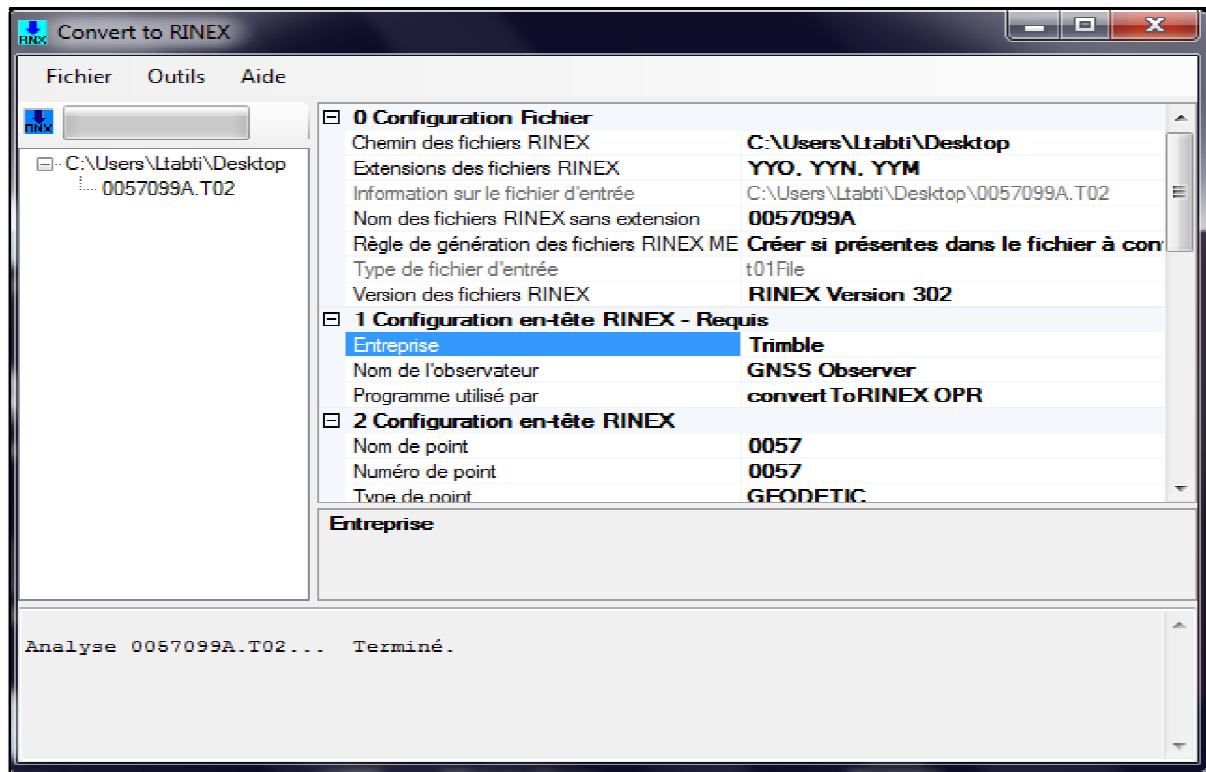


FIG 2. Outil "Convert to RINEX" de Trimble

Pour réaliser un calcul en approche SPP, deux fichiers sont nécessaires:

1. Un fichier contenant les données d'observation ; il se présente sous la forme ssssdfff.yyo, la structure de ce fichier est donnée par la figure 3.

```

3.02      OBSERVATION DATA      Mixed(MIXED)      RINEX VERSION / TYPE
cnvtToRINEX 2.60.0      convertToRINEX OPR      29-Jan-20 14:52 UTC      PGM / RUN BY / DATE
-----
0057
GNSS Observer      Trimble      OBSERVER / AGENCY
5445R50057      Geo Explorer 3      4.93      REC # / TYPE / VERS
      TRM55971.00      NONE      ANT # / TYPE
      5108081.6093      268515.5695      3797820.2245      APPROX POSITION XYZ
      0.1220      0.0000      0.0000      ANTENNA: DELTA H/E/N
G      8      C1C C2W C2X C5X L1C L2W L2X L5X      SYS / # / OBS TYPES
      10.000      INTERVAL
      2018      4      9      0      0      0.0000000      GPS      TIME OF FIRST OBS
      2018      4      9      23      59      50.0000000      GPS      TIME OF LAST OBS
      0      RCV CLOCK OFFS APPL
      G01      2469      2469      2469      2469      2469      2469      2469      PRN / # OF OBS
      G03      2465      2441      2453      2454      2454      2441      2453      2454      PRN / # OF OBS
      G08      2214      2214      2214      2214      2214      2214      2214      2214      PRN / # OF OBS
      G11      2295      2295      0      0      2295      2295      0      0      PRN / # OF OBS
      G14      2844      2844      0      0      2844      2844      0      0      PRN / # OF OBS
      G17      2820      2757      2813      0      2815      2757      2813      0      PRN / # OF OBS
      DBHZ      SIGNAL STRENGTH UNIT
      END OF HEADER
> 2018 04 09 00 00 0.0000000 0 11
G01 20538109.445 8 20538109.852 7 20538109.102 8 20538107.824 9 107928524.602 8 84100164.519 7
G03 20778695.523 8 20778694.719 7 20778694.852 8 20778694.848 9 109192666.477 8 85085294.875 7

```

FIG 3. Structure du fichier d'observation Rinex ("o" file)

1. Un fichier contenant les messages de navigation. Il se présente sous la forme ssssdddf.yyn, la structure de ce fichier est donnée par la figure 4.

3.02	N: GNSS NAV DATA	G: GPS	RINEX VERSION / TYPE		
cnvtToRINEX 2.60.0	convertToRINEX OPR	29-Jan-20 14:52 UTC	PGM / RUN BY / DATE		
			COMMENT		
GPSA	0.1118D-07	0.1490D-07	-0.5960D-07	-0.5960D-07	IONOSPHERIC CORR
GPSB	0.8806D+05	0.1638D+05	-0.1966D+06	-0.1311D+06	IONOSPHERIC CORR
GPUT	-0.1862645149D-08	-0.355271368D-14	319488	1996	TIME SYSTEM CORR
18					LEAP SECONDS
					END OF HEADER
G17	2018 04 09 00 00 00	-0.108647625893D-03	0.329691829393D-11	0.000000000000D+00	0.000000000000D+00
		0.580000000000D+02	-0.328125000000D+01	0.417624538595D-08	0.314116256299D+01
		-0.596046447754D-07	0.122722985689D-01	0.467710196972D-05	0.515379159546D+04
		0.864000000000D+05	0.268220901489D-06	-0.287297506349D+01	-0.145286321640D-06
		0.982618601323D+00	0.297125000000D+03	-0.178161297028D+01	-0.784925552443D-08
		0.475019786481D-10	0.100000000000D+01	0.199600000000D+04	0.000000000000D+00
		0.240000000000D+01	0.000000000000D+00	-0.111758708954D-07	0.580000000000D+02
		0.863580000000D+05	0.400000000000D+01	0.000000000000D+00	0.000000000000D+00
G32	2018 04 08 23 59 44	-0.522350426763D-03	0.329691829393D-11	0.000000000000D+00	0.000000000000D+00
		0.000000000000D+00	0.168125000000D+02	0.457947646786D-08	-0.223742802721D+01
		0.922009348869D-06	0.192900421098D-02	0.742636620998D-05	0.515364755630D+04
		0.863840000000D+05	-0.763684511185D-07	0.211349581616D+00	-0.372529029846D-08
		0.957598611849D+00	0.235531250000D+03	-0.262835599349D+01	-0.795247410961D-08
		0.975040614355D-10	0.100000000000D+01	0.199600000000D+04	0.000000000000D+00
		0.240000000000D+01	0.000000000000D+00	0.465661287308D-09	0.000000000000D+00
		0.805380000000D+05	0.400000000000D+01	0.000000000000D+00	0.000000000000D+00
G 3	2018 04 09 00 00 00	0.465880148113D-04	0.807176547823D-11	0.000000000000D+00	0.000000000000D+00
		0.230000000000D+02	-0.256562500000D+02	0.447590072495D-08	0.230646154264D+00

FIG. 4. Structure du fichier de navigation Rinex ("n" file)

En ce qui concerne la nomenclature, ssss est l'acronyme de la station, ddd est le jour de l'année du premier enregistrement, f est le numéro de la session dans le jour (avec 0 pour une journée complète), yy est l'année et la dernière lettre représente le type du fichier (par exemple o pour observation et n pour navigation).

Annexe 3 : Format de fichier de corrections EGNOS RINEX-b

Pour réaliser un calcul en approche SBAS, il faut disposer de trois fichiers distincts. Un fichier d'observation "o" file, Un fichier de navigation "n" file et un fichier de corrections EGNOS en format RINEX-b. Les corrections EGNOS sont archivées en fichier de 24 heures et peuvent être téléchargées à partir du site de CNES, le format de ce fichier est donné par la figure 5.

```

2.12          B          RINEX VERSION / TYPE
NTMF V2.2.0.  CNES-NTMF      18/04/12 00:43    PGM / RUN BY / DATE
          SBAS consolidation file for PRN 120  COMMENT
          END OF HEADER

120 18 04 09 00 00 00.1 L1 32 0 SBA
  2 53 0A 00 0C 00 3F E0 00 00 00 3F D8 00 00 30 00 C0
  00 00 00 01 79 7B B9 7B 97 B9 4C D7 1A C0
120 18 04 09 00 00 01.1 L1 32 0 SBA
  18 9A 49 64 00 00 00 FF FF FF C0 00 00 00 1F FF C0 00 01
  FF FC 00 00 3F FF E0 01 FC 00 21 12 EA 40
120 18 04 09 00 00 02.1 L1 32 0 SBA
  24 C6 60 00 00 03 FF BF F4 00 00 03 B9 D7 B8 90 34 2A 0D
  FF 7E 80 33 55 BF BF F0 50 06 3A 8D 15 C0
120 18 04 09 00 00 03.1 L1 32 0 SBA
  3 53 0C 00 00 00 3F CB F9 C0 00 00 3F F7 FE BF D8 00 00
  00 01 00 07 B9 57 B9 59 7B 99 BB 8B 0F 80
120 18 04 09 00 00 04.1 L1 32 0 SBA
  2 9A 08 00 0C 00 3F E0 00 00 00 00 3F D4 00 00 2C 00 C0
  00 00 00 01 79 7B B9 7B 97 B9 41 69 DD C0
120 18 04 09 00 00 05.1 L1 32 0 SBA
  9 C6 25 CC 00 1E F2 36 B6 C6 F3 E0 60 40 00 00 00 00 00
  00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 11 7A A1 40
120 18 04 09 00 00 06.1 L1 32 0 SBA
  24 53 60 00 00 03 FF 7F F4 00 00 03 B9 DB B8 A0 28 3D F1
  09 82 BF 64 0E 83 41 10 20 0C 32 20 07 C0
120 18 04 09 00 00 07.1 L1 32 0 SBA

```

FIG.5. Format de fichier de corrections EGNOS RINEX-b, le 09 avril 2018

Annexe 4 : Publications

Improvement of Single-Frequency GPS Positioning Performance Based on EGNOS Corrections in Algeria

Lahouaria Tabti^{1,2}, Salem Kahlouche², Belkacem Benadda¹ and Bilal Beldjilali²

¹(Tlemcen Telecommunications Laboratory, Faculty of Technology, Aboubekr Belkaid University of Tlemcen, Chetouan, Algeria)

²(Department of Space Geodesy, Centre of Space Techniques, Algerian Space Agency, Arzew, Algeria)

(E-mail: ltabti@cts.asal.dz)

The main objective of the European Geostationary Navigation Overlay System (EGNOS) is to improve the positioning accuracy by correcting several error sources affecting the Global Positioning System (GPS) and to provide integrity information to GPS signals for users in real time. This research presents analysis used to investigate improvement in the performance of single-frequency GPS positioning using EGNOS corrections in Algeria. In this study, we performed position measurements with two calculation approaches, the first based on GPS single-point positioning and the second using EGNOS differential corrections. Positioning accuracy was determined by comparison with the known precise coordinates of the sites; and then the improved ionospheric correction using EGNOS was investigated. The results revealed that GPS + EGNOS performance was significantly improved compared with GPS alone, when measurements of horizontal and vertical accuracy were taken into account, and that the EGNOS corrections improved east and north components slightly, and the up component significantly.

KEY WORDS

1. EGNOS. 2. GPS Single-Point Positioning (SPP). 3. Accuracy. 4. Ionospheric Correction.

Submitted: 26 February 2019. Accepted: 11 November 2019.

1. INTRODUCTION. Global positioning system (GPS) is used to calculate the position of a user anywhere in the world and the accuracy of this system has been enhanced during the last few years. Unfortunately, a real-time GPS service cannot guarantee the reliability and precision required for some applications, such as aircraft navigation (ESA, 2011). Satellite-based augmentation systems (SBAS) have been developed to overcome the limitations of GPS measurements related to precision and integrity.

The basic function of this system, aims to improve positioning accuracy by correcting several error sources affecting GPS signals and to provide integrity data to the users. The corrections transmitted by SBAS contribute to mitigate the ranging error sources



Figure 1. Locations of EGNOS RIMS stations.

related to satellite clocks, satellite position and ionospheric effects. The other errors (tropospheric effects, multipath and user receiver contributions) are local effects which cannot be corrected by augmentation systems.

SBAS consist of widely dispersed reference stations each of which monitors and gathers data from GPS satellites. These data are forwarded to the master station for processing to determine the integrity and differential corrections for each monitored satellite (Krasuski, 2017). The integrity information and differential corrections are then sent to a ground earth station, uplinked to geostationary satellites and broadcast to users (Kaplan and Hegarty, 2006).

Several countries have implemented their own SBAS. European Geostationary Navigation Overlay System (EGNOS) is the European satellite-based augmentation system; it covers Europe and North Africa with the possibility of extending to include all of Africa and the Middle East (El-Rabbani, 2002).

EGNOS consists of a space segment of three geostationary satellites and a ground segment with a network that includes 40 ranging and integrity monitoring stations (RIMS) (ESA, 2019). RIMS are the key components of the system; they are used for gathering raw data to provide differential corrections and integrity. Figure 1 shows the current locations of RIMS, represented by red points. It is clearly seen that Algeria is not included in the RIMS network. Algeria is the largest country in Africa, bordering the Mediterranean Sea between Morocco and Tunisia. It is located between latitudes 18° and 38° North and longitudes 9° West and 12° East.

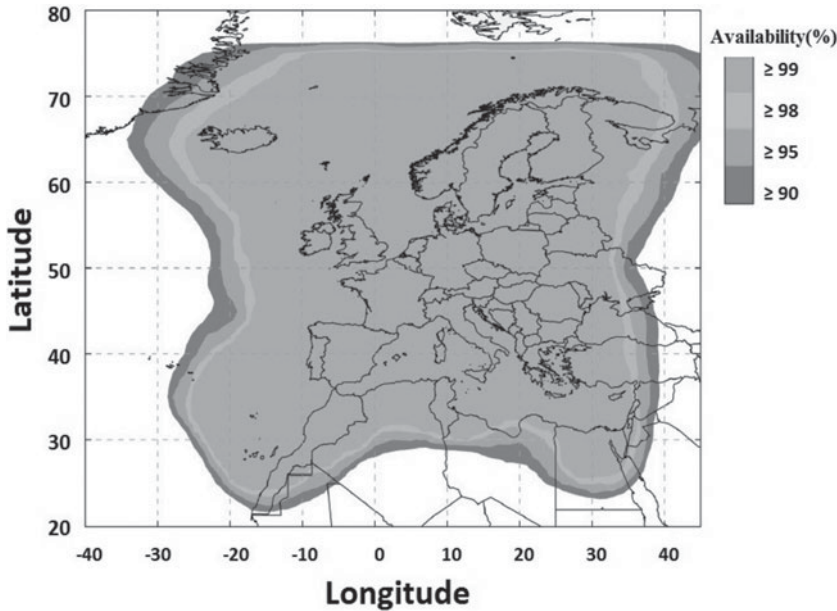


Figure 2. EGNOS open service availability area (horizontal position error < 3 m and vertical position error < 4 m), published in Open Service Definition Document (ESA, 2017).

This study is a contribution to optimise the use of EGNOS open service (standard positioning service), which was first provided in 2009. This service is intended to offer a wide range of benefits to users for general purpose applications which require real-time metric precision (e.g., agriculture, road transport, maritime domain) but where safety is not critical, or those for which accuracy to within a metre or less is necessary (geodetic techniques, etc.) (ESA, 2017).

In the EGNOS open service provision area, the requirements for horizontal and vertical accuracy are that 95% of horizontal and vertical navigation system errors should be less than 3 m and 4 m, respectively. Figure 2 represents the availability of the EGNOS system; the use of EGNOS open service is possible beyond the grey area, however, its performance will be gradually degraded as the user moves away from it.

Preliminary analysis was carried out to investigate the improvement in position accuracy with the help of EGNOS correction messages. The navigation and observation data of the GPS system in the Receiver Independent EXchange (RINEX) format were recorded through the Trimble NetR9 multifrequency receiver, positioned at four sites in Algeria. The positioning errors of GPS and GPS with EGNOS were calculated by comparison with the reference precise position for each site.

2. SBAS SIGNAL SPECIFICATION. The SBAS correction signal is broadcast on 1,575.42 MHz L1 frequency with 1.023 binary phase shift keying (BPSK) spread spectrum modulation by a C/A code of PRN 120 to 138. The data are always half convolutional encoded rate with a forward error correction code (Hofmann-Wellenhof et al., 2008). Therefore, the symbol rate that the GPS receiver must process is 500 symbols per second. The convolutional coding has a constraint length 7, as standard for Viterbi decoding,

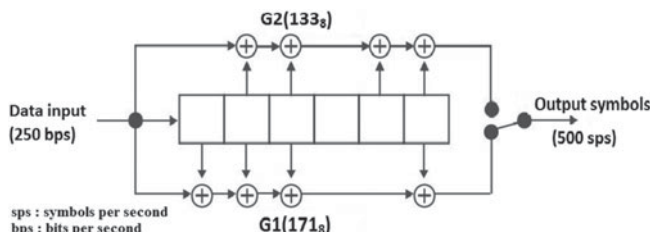


Figure 3. Convolutional encoding.

Table 1. Differential correction messages for SBAS.

Message Type	Data Type
1	PRN mask
2–5	Fast correction for 13 satellites
6	Integrity for 51 satellites
24	Mixed fast/long-term satellite error correction for 2–6 satellites
25	Long-term satellite error corrections
18	IGP masks
26	Ionospheric delay corrections

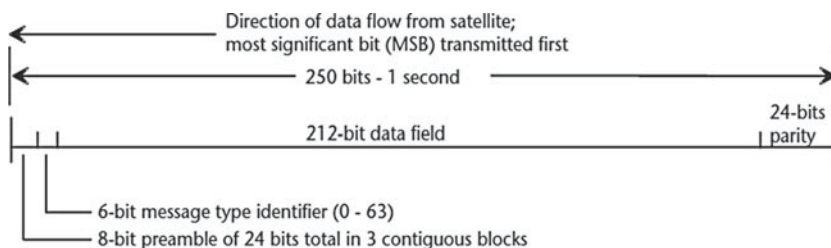


Figure 4. SBAS data block format.

with a convolutional encoder logic arrangement as illustrated in Figure 3 (De Lellis et al., 2009).

The 250-bits per second data from each SBAS is packed into 1 s blocks. Each block includes an 8-bit preamble (one of three parts of a 24-bit unique word, 01010011 10011010 11000110), a 6-bit message-type field (allowing for up to 64 message types), and a 212-bit payload with unique meaning specifically defined for each message type (see Table 1); the last 24 bits correspond to the parity bits, which ensure that the data were not corrupted during transmission (no bit error), as shown in Figure 4 (ESA, 2011; Kaplan and Hegarty, 2006).

EGNOS generates three types of differential corrections, as summarised in Table 1.

In addition to differential corrections, the SBAS system also monitors and broadcasts the integrity of GPS satellite signals. With integrity information, the user can determine which satellites are usable for reliable positioning computation (Liu et al., 2012).

3. APPLICATION OF DIFFERENTIAL CORRECTIONS. The components of satellite corrections are spread across many messages in the L1 SBAS, these messages can

provide corrections from up to 51 satellites (of one or more global navigation satellite system (GNSS) constellations); between six and 12 messages are needed to form a full correction (Walter et al., 2012).

The data of SBAS corrections are used in single-point positioning (SPP) to determine the receiver position. The corrected pseudo range is given by:

$$PR_{i,corrected}(t) = PR_{i,measured}(t) + RC_{fast}(t) + RC_{clock} - RC_{iono}(t) + RC_{tropo}(t) \tag{1}$$

where $PR_{i,corrected}$ represents corrected pseudo range, $PR_{i,measured}$ is measured pseudo range, RC_{fast} is fast corrections, RC_{clock} is clock corrections, RC_{iono} is ionospheric corrections and RC_{tropo} represents tropospheric corrections (RTCA, 2001; Eurocontrol, 2003).

3.1. *Fast corrections.* Fast corrections (message type 2–5) broadcast by SBAS are intended to correct quickly changing errors such as GNSS clock errors (Sauer, 2003); fast corrections (RC_{fast}) for a given satellite are calculated as:

$$RC_{fast}(t) = PRC(t_1) + RRC(t_1) \times (t - t_1) \tag{2}$$

where t is user time, PRC is pseudo range corrections, t_1 is the applicability time of the most recent fast corrections and RRC is range-rate corrections, which is given by:

$$RRC(t_1) = \frac{PRC(t_1) - PRC(t_0)}{t_1 - t_0} \tag{3}$$

where t_0 is the previous applicability time of pseudo range correction (Eurocontrol, 2003).

3.2. *Long-term corrections.* Long-term corrections are transmitted to correct long-term variations in the ephemeris errors (δx , δy and δz) and clock errors (δa_f) for each GNSS visible satellite (message types 24 and 25). The pseudo range correction resulting from SBAS clock correction RC_{clock} is given by (Eurocontrol, 2003):

$$RC_{clock}(t) = [\delta a_{f0} + \delta a_{f1}(t - t_0)] \times c \tag{4}$$

where t is user time, δa_{f0} , δa_{f1} are clock correction parameters, t_0 is the applicability time of clock correction parameters, and c is speed of light.

3.3. *Ionospheric corrections.* Ionospheric corrections are broadcast using a world map ionospheric grid point (IGP) divided by bands in message types MT18 and MT26 (Nie et al., 2019). Ionospheric corrections for visible satellites are determined with an interpolation using vertical ionospheric delay values. To obtain the ionospheric correction (RC_{iono}), which is added to the pseudo range measurement, the vertical delay τ_{VPP} at the ionospheric pierce point (IPP) is multiplied by the obliquity factor F , where RC_{iono} , F and τ_{VPP} are calculated as (Kaplan and Hegarty, 2006):

$$RC_{iono} = -F \times \tau_{VPP} \tag{5}$$

$$F = \left[1 - \left(\frac{R_e \cos E}{R_e + h_I} \right)^2 \right]^{-1/2} \tag{6}$$

$$\tau_{VPP} = \sum_{i=1}^q w_i(x_{p,p}, y_{p,p}) \times \tau_{IGPi}/q = 3 \text{ or } 4 \tag{7}$$

where E is the satellite elevation angle, $R_e = 6378.137$ km (semi major radius of the earth), and h_I is the maximum ionisation height of the ionosphere ($h_I = 350$ km).

w_i is the weighting function depending on the pierce point position, $x_{p,p}, y_{p,p}$ are the relative positions of the pierce point and τ_{IGP_i} are the broadcast grid point vertical delay values at the IGP (RTCA, 2001).

When three or four IGPs surrounding the IPP of a given line-of-sight are monitored, the estimated ionospheric correction and model variance due to ionosphere can be obtained (Jimenez-Banos et al., 2011).

3.4. *Tropospheric corrections.* Correction for tropospheric delay is defined by the minimum operational performance standard (MOPS); this standard is obtained through a fairly simple model using estimated receiver position, satellite elevation and day of the year. The meteorological parameters used in the tropospheric correction model are interpolated using tabulated values; estimated tropospheric delay takes the following form (Eurocontrol, 2003):

$$RC_{\text{tropo}} = -(d_{\text{hyd}} + d_{\text{wet}})M(E) \quad (8)$$

where d_{hyd} and d_{wet} are a dry and wet contribution to zenith delay respectively; they are calculated from the receiver's height and estimates of five meteorological parameters: pressure [P (mbar)], temperature [T (K)], water vapour pressure [e (mbar)], temperature 'lapse' rate [β (K/m)] and water vapour 'lapse rate' [λ (dimensionless)] (RTCA, 2001). $M(E)$ is the mapping function, calculated by:

$$M(E) = \frac{1.001}{\sqrt{0.002001 + \sin^2(E)}} \quad (9)$$

This mapping function is valid when satellite elevation angle E is not less than 5° (Sanz et al., 2013).

4. PURPOSE AND STUDY RESULTS. The main purpose of this research is to test the performance of the current EGNOS in Algeria without RIMS. The raw GPS data were collected by a geodetic multifrequency receiver (Trimble NetR9), which was installed on four sites located in Algeria (Figure 5) during several days in 2018, and over a time interval from 6 h to 24 h; these sites were in an area covered by EGNOS. The sampling interval was 10 s, and the elevation cut-off angle was set at 10° .

The position of each site was determined by the GNSS-Lab (gLAB) software (version 5.3.0). The tool can process data from several receiver models, RINEX navigation as well as observation files and SBAS messages (Ibáñez et al., 2018). EGNOS corrections data from the S120 and S123 geostationary satellites were used.

In the first step, the computation of a precise position for each site was established with differential mode; the 305 site in Oran from TYRhenian GEODETIC NETWORK (TYR-GEONET) is used as a reference known position. The coordinate accuracy of each site is given in Table 2.

TYRGEONET is composed of 50 points distributed in the western Mediterranean area, of which two stations are in Algeria (Oran and Algiers). GPS observations were processed with Bernese 4.0 software; the coordinates, with a centimetric absolute accuracy, were expressed in the International Terrestrial Reference Frame (Kahlouche et al., 1998) and then transformed to WGS 84.

In the second step, analyses were performed with two computation approaches. The first processing run only used the GPS data in SPP, which is based on the



Figure 5. Locations of measurement sites.

Table 2. Coordinates accuracy for each site (in metres) from Oran TYRGEONET point.

Site	Date	Day of year	$\sigma \Delta X$	$\sigma \Delta Y$	$\sigma \Delta Z$
Oran (305)	13/03/2018	(072)	/	/	/
Algiers (ASAL)	09/04/2018	(099)	0.007	0.009	0.017
Bejaia (B02)	08/05/2018	(128)	0.024	0.030	0.011
Bir Sbaa (BRS)	15/11/2018	(319)	0.003	0.001	0.002

code observations type, C/A code measurement in L1 frequency. The second included EGNOS differential corrections, the files containing these corrections were downloaded from the CNES Navigation and Time Monitoring Facility (NTMF) FTP server (ftp://serenad-public.cnes.fr/SERENAD0/FROM_NTMFV2/MSG/). These files are provided in the RINEX 2.11 type B format (Gurtner, 2007).

4.1. *Positioning accuracy.* The precise position of each site is known with great accuracy, which enables us to assess the position error properly. Horizontal and vertical position errors at a defined time epoch are computed as the difference between measured position and the true position in the north, east and up components for GPS single-frequency (SPP) with and without EGNOS. Table 3 provides the comparison of position error when using EGNOS to correct the clock, ephemeris and ionospheric errors; horizontal and vertical position errors at 95% confidence levels were obtained for each site.

It can be seen that the position accuracy of GPS with EGNOS correction is remarkably higher than GPS alone. EGNOS horizontal and vertical errors are not worse than 1.68 m (95%), whereas, in GPS alone, horizontal error could be 3.65 m (Algiers), and vertical error can exceed 6 m (Oran). Specifically, the greatest horizontal (1.68 m) and vertical position errors (1.52 m) of GPS with EGNOS were obtained in Oran and Bir Sbaa, respectively.

Table 3. Horizontal position errors (HPE) and vertical position errors (VPE) using EGNOS.

Site	Day of year, 2018	GNSS	HPE (m)	VPE (m)
Oran (305)	072	GPS	2.78	6.05
		GPS + EGNOS	1.68	1.47
Algiers (ASAL)	099	GPS	3.65	5.02
		GPS + EGNOS	1.51	1.44
Bejaia (B02)	128	GPS	2.37	3.84
		GPS + EGNOS	1.58	1.46
Bir Sbaa (BRS)	319	GPS	2.39	3.33
		GPS + EGNOS	1.65	1.52

The improvement of vertical accuracy for GPS with EGNOS is better than for horizontal accuracy, mostly due to the better mitigation of ionospheric error as compared with GPS alone. In this respect, our results are similar to those of other studies (Zahidul et al., 2017) which found that the vertical position error is less than the horizontal position error.

These results were obtained by correcting all SPP errors, particularly differential code biases (DCB), which can achieve 10 nano-seconds (Jin et al., 2016). Results indicate that ignoring the DCB gives the worst solution, and the positioning accuracy is better with DCB correction (Ge et al., 2017). In order to see improvements of GPS with and without EGNOS, positioning errors in the north, east and up components are plotted in the same figure.

For each site, Figure 6 shows the scatter plot of position errors in north and east components together (corresponding to horizontal position error) for GPS only and GPS with EGNOS. After applying EGNOS corrections, it can be seen that the points are less dispersed in GPS with EGNOS, which corresponds to smaller errors than in GPS alone.

For all sites, we can clearly see, in Figure 6, that the east error is limited to approximately 1.5 m, while the north error is around 2 m in GPS with EGNOS. On the other hand, the east and north errors in GPS alone could be as much as 3 m and 6 m, respectively.

Further, in order to see improvement in the up component, we compared error before and after adding EGNOS corrections. Figure 7 shows the difference between calculated coordinates and reference known coordinates in the up component over the whole observation.

For all sites, the maximum error in GPS with EGNOS is bounded between -2 and 2 m during the time of observation, whereas it is between -8 and 8 m in GPS alone. This shows again that the position accuracy is improved by applying EGNOS correction messages.

In Figures 7(b) and 7(c), there is an error peak in GPS with EGNOS at approximately 20,000 s and 43,000 s, which does not appear in GPS alone. At these epochs, some satellites have cycle-slip; after a cycle-slip, EGNOS processing needs 360 s to converge the smoothing before using the satellite again in solution computation, while in GPS only there is no need to wait for the smoothing.

To investigate the consistency of results, we analysed data from the Oran site on several dates in 2017 and 2018. The results (Figure 8) confirm that EGNOS corrections provide better accuracy performance than GPS alone. The performance of EGNOS was stable at the same level during the observations on several dates in 2017 and 2018.

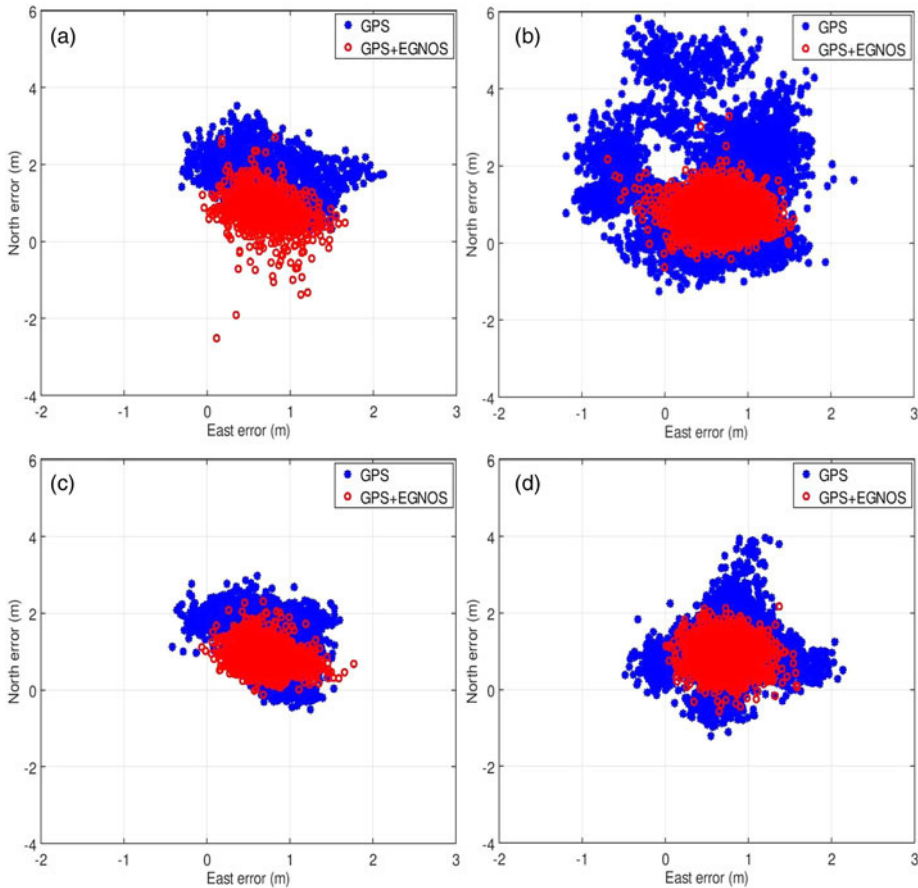


Figure 6. Comparison of horizontal position error when using GPS only and GPS with EGNOS for all sites: (a) Oran, (b) Algiers, (c) Bejaia, (d) Bir Sbaa.

Horizontal and vertical position errors depend on the number of GPS satellites used in position calculation and ionospheric correction. To investigate the cause of the improvement, we analysed the component of ionospheric corrections transmitted by EGNOS from all satellites used for the Algiers site, this site was observed during a 24 h period.

4.2. *Corrections analysis.* The corrections transmitted by EGNOS contribute to mitigate the ranging error sources related to satellite clocks, satellite position and ionospheric effects. EGNOS can also prevent users from receiving unhealthy satellite data which could lead to wrong positioning. Figure 9 presents the number of GPS satellites used in the solution at the Algiers site.

Figure 9 shows the number of monitoring GPS satellites by EGNOS; it can be seen that the number of satellites used in GPS is between 7 and 12, and this number decreases in EGNOS, which means that EGNOS has eliminated some GPS satellites.

The objective of EGNOS is to take into account the status of each GPS satellite. Corrections of some satellites are not generated, however, as they are not monitored by the RIMS network, being either 'Not Monitored' or, where an anomaly with the satellite has

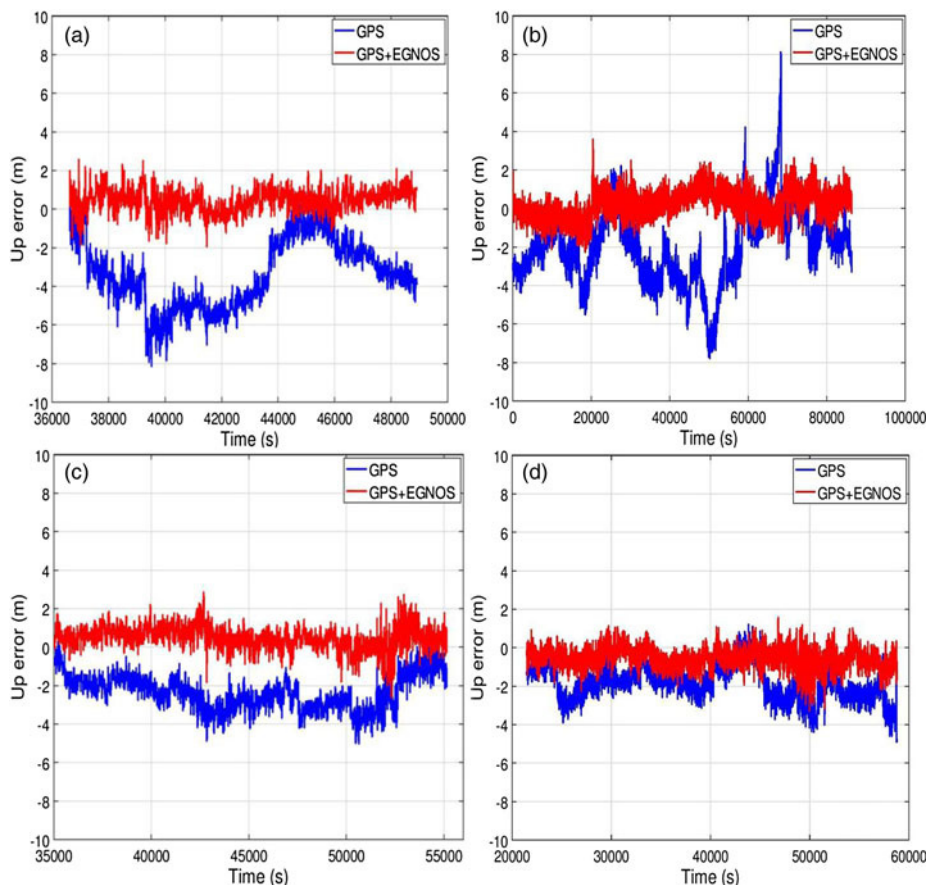


Figure 7. Comparison of vertical position error when using GPS only and GPS with EGNOS for all sites (a) Oran, (b) Algiers, (c) Bejaia, (d) Bir Sbaa.

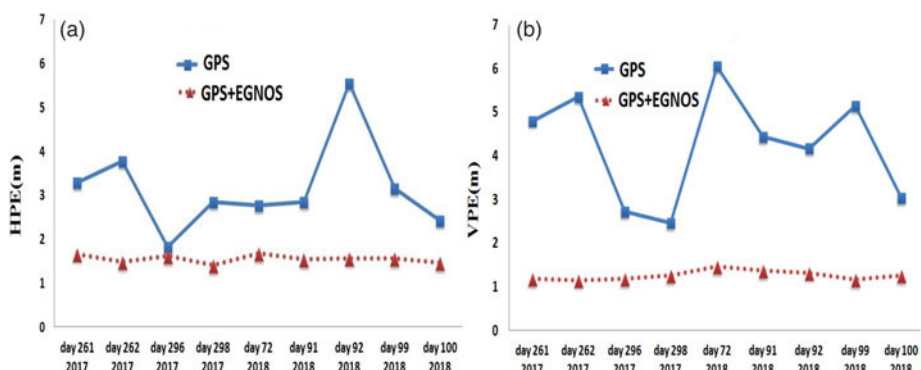


Figure 8. Horizontal positioning errors (HPE) (a) and vertical positioning errors (VPE) (b) at Oran site.

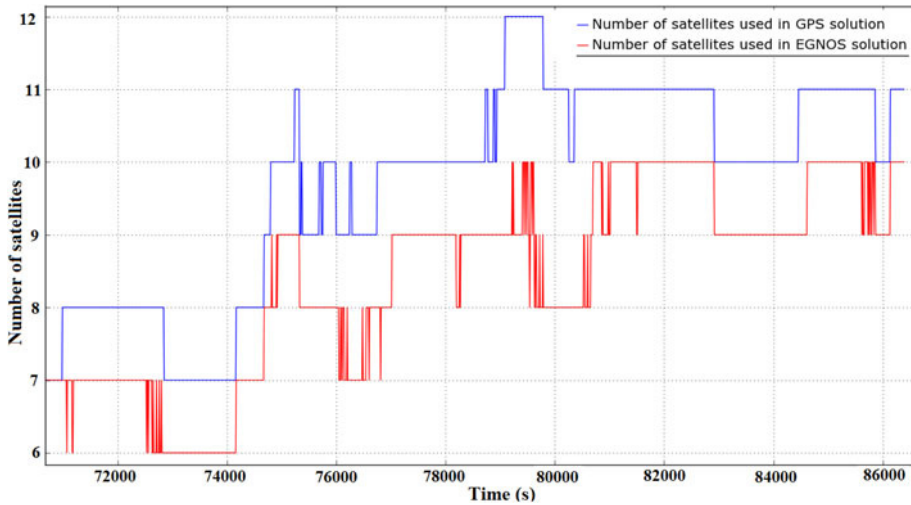


Figure 9. Number of satellites used in EGNOS solution (red) compared with number of satellites used in GPS solution (blue) at Algiers site.

been detected, flagged ‘Don’t Use’. Data from such satellites will be discarded (Liu et al., 2012).

At the Algiers site, during a period of between 79,000 s and 80,000 s, 8–10 satellites were used by EGNOS, while 10–12 satellites were used by GPS. EGNOS eliminated some satellites needed to calculate a position, which has a direct impact on positioning accuracy; these satellites were:

- PRN9, PRN18 and PRN23: satellites flagged as ‘Not Monitored’
- PRN6, PRN7: satellites not used because the IPP was outside the IGP
- PRN32: satellite flagged as ‘Don’t Use’.

These satellites are not used; this is probably caused by the lack of RIMS stations between latitude 25° and 30° in Algeria, therefore EGNOS corrections are not transmitted for satellites being tracked over the area. Consequently, corrections would be available if a RIMS station were installed in Algeria (Tabti et al., 2018).

Figure 10 shows the ionospheric delay provided by EGNOS when compared with GPS only (provided by Klobuchar model). The Klobuchar model corrects the ionospheric delay, which has the advantages of convenient calculation and simple structure (Su et al., 2019). Ionospheric delay uses eight parameters, broadcast in the navigation message and typically updated once per day (Rovira-Garcia et al., 2015). This model allows for correction of only the first order of ionosphere effect; as the higher order (second and third order) ionospheric correction on L1 frequency is centimetric (Liu et al., 2016), it will be neglected in this study. The ionospheric plots also show the elevation angles of satellites; the expected corrections decrease with the increase of the elevation.

Positioning accuracy obviously is highly dependent on EGNOS ionospheric corrections. As can be seen on almost all satellites, ionospheric correction using EGNOS is lower than the broadcast values (Klobuchar); the mean values range between 1 m and 2 m, and it can reach 8 m when the satellites are at low elevation ($<5^{\circ}$). In GPS alone using the Klobuchar

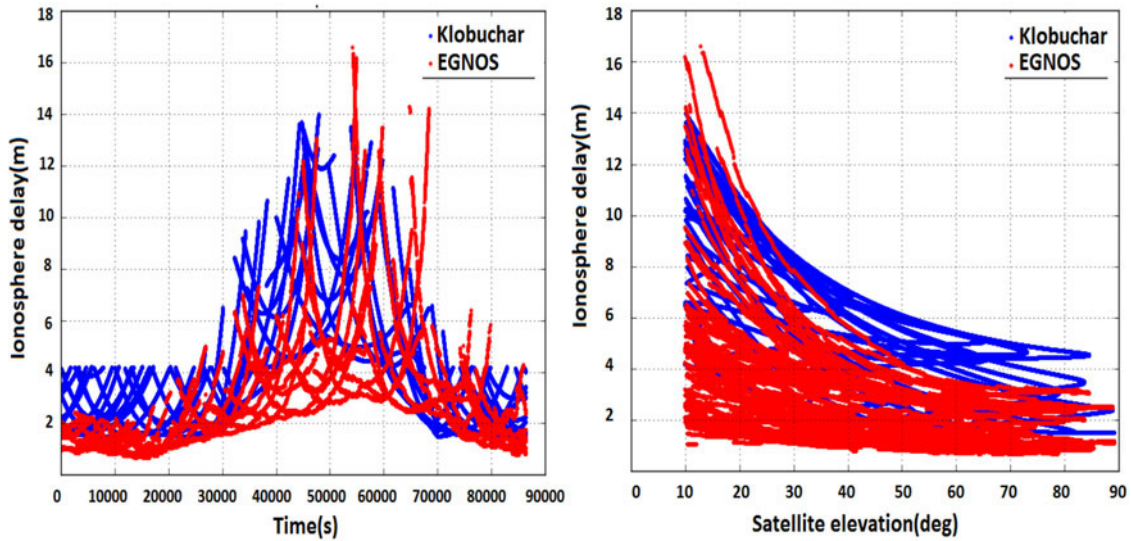


Figure 10. Ionospheric delay for all satellites used at Algiers site.

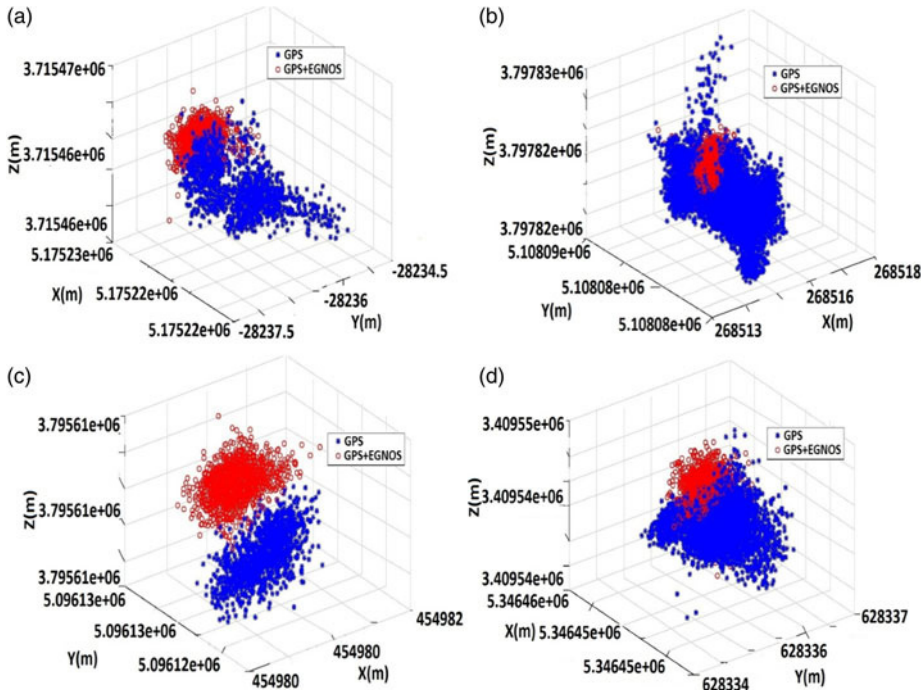


Figure 11. Absolute positions for each site using GPS alone (blue) and GPS with EGNOS (red) (a) Oran, (b) Algiers, (c) Bejaia, (d) Bir Sbaa.

Table 4. Standard deviation (in metres).

	GPS			GPS + EGNOS		
	X	Y	Z	X	Y	Z
Oran	1.42	0.52	0.99	0.57	0.26	0.48
Algiers	1.85	0.53	1.34	0.57	0.26	0.54
Bejaia	0.91	0.44	0.63	0.50	0.27	0.42
Bir Sbaa	1.05	0.40	0.62	0.42	0.22	0.39

model, ionospheric correction varies mainly from about 2 m to 4 m, and it can reach 14 m when the satellites are near the horizon.

By using ionospheric corrections provided by EGNOS, it is possible to reduce ionospheric error in the pseudo range measurements. However, from Figure 10, it is not possible to confirm which of the two models (EGNOS or Klobuchar) is more accurate.

In order to reveal positioning performance, corresponding figures in three-dimensional view for each site are shown in Figure 11. It shows the coordinates determined by GPS alone and coordinates determined by GPS with EGNOS. According to these figures, it is clearly seen that positions calculated by GPS with EGNOS are less dispersed. Table 4 gives more details about the coordinate accuracy by calculating the standard deviation of the X, Y and Z coordinates for each site.

Position accuracy was significantly improved by applying EGNOS corrections for each coordinate of all sites, mainly due to using a better ionospheric correction. The GPS-only positions are based on single-frequency measurements and the Klobuchar ionospheric model.

5. CONCLUSION. EGNOS offers improved navigation performance for an open service, in terms of precision and integrity; the performance gradually degrades as a user moves away from the service area. Our results show that there is an improvement in the three-dimensional positioning accuracy of single-frequency GPS when corrections from EGNOS are included. It is demonstrated that horizontal and vertical positioning errors of GPS with EGNOS are less than 2 m (95%), while for GPS only the errors are around 4 m in horizontal and 8 m in vertical. The results of the experiment are briefly summarised as:

- Compared with GPS only, with EGNOS the improvement of vertical accuracy is greater than the horizontal improvement using single-frequency measurements.
- The positioning accuracy is obviously highly dependent on the correction accuracy of EGNOS, which is at the metre level.
- The performance of EGNOS was at the same level during various days of the year in 2018, and the observed horizontal and vertical position errors for each site were similar.
- For the Oran site, the position error of GPS with EGNOS was stable during various days of 2017 and 2018.

Finally, we note that this improvement is obtained without any RIMS in Algeria. The implementation of RIMS in the country will permit further improvement of the corrections transmitted by the EGNOS system and real-time positioning in the area, and allow Algeria to benefit from the advantages offered by this system.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors acknowledge the gAGE research team from the Polytechnic University of Catalonia for the gLAB program library (available at <http://www.gage.upc.edu>); and would like to thank particularly Dr Deimos Ibáñez of the gAGE team for his useful help and clarifications.

REFERENCES

- De Lellis, E., Corrado, F., Ciniglio, U., Canzolino, P., Garbarino, L., Gaglione, S. and Nastro, V. (2009). An EGNOS Based Navigation System for Highly Reliable Aircraft Automatic Landing. Conference Proceedings of the European Navigation Conference (ENC), University of Naples, Italy.
- El-Rabbani, A. (2002). Introduction to GPS, the Global Positioning System. Artech House Mobile Communications Series, second edition. Norwood: Artech House.
- ESA. (2011). User Guide for EGNOS Application Developers. ED 2.0. Luxembourg: European Commission, Available at: <https://egnos-user-support.esspsas.eu/>
- ESA. (2017). EGNOS Open Service Definition Document, OS-SDD Issue 2.3. Available at https://egnos-user-support.essp-sas.eu/new_egnos_ops/
- ESA. (2019). EGNOS Safety of Life (SoL) Service Definition Document Issue 3.3. Available at https://egnos-user-support.essp-sas.eu/new_egnos_ops/
- Eurocontrol. (2003). Technical Notes on SBAS; DocNo: PEG-TN-SBAS, Issue: I, Project: PEGASUS.
- Ge, Y., Zhou, F., Sun, B., Wang, S. and Shi, B. (2017). The impact of satellite time group delay and inter-frequency differential code bias corrections on multi-GNSS combined positioning. *Sensors*, 17(3), 602.

- Gurtner, W. (2007). RINEX: The Receiver Independent Exchange Format Version 2.11. Boulder: UNAVCO. Available at: <https://www.ngs.noaa.gov/CORS/RINEX211.txt>
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. and Wasle, E. (2008). GNSS – Global Navigation Satellite Systems GPS, GLONASS, Galileo, and More. Vienna and New York: Springer.
- Ibáñez, D., Rovira-García, A., Sanz, J., Juan, J. M., Gonzalez-Casado, G., Jimenez-Baños, D., López-Echazarreta, C. and Lapin, I. (2018). The GNSS Laboratory Tool Suite (gLAB) Updates: SBAS, DGNS and Global Monitoring System. 9th ESA Workshop on Satellite Navigation Technologies (NAVITEC), Noordwijk, The Netherlands.
- Jimenez-Banos, D., Matthew, P., AnkitRaj, M., Felix, T., Didier, F. and Chatre, E. (2011). EGNOS Open Service Guidelines for Receiver Manufacturers. Proceedings of the 24th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS), Portland, OR, 2505–2512.
- Jin, S. G., Jin, R. and Li, D. (2016). Assessment of BeiDou differential code bias variations from multi-GNSS network observations, journal of European Geosciences Union (EGU). *Annales Geophys*, 34, 259–269. Available at: www.ann-geophys.net/34/259/2016/
- Kahlouche, S., Touam, S. and Anzidei, M. (1998). Integration of GPS Algerian sites in west Mediterranean geodynamical studies - case of TYRGEONET project. In: *Geodesy on the Move*. International Association of Geodesy Journal, 119, 425–430.
- Kaplan, E. D. and Hegarty, C. J. (2006). *Understanding GPS Principles and Applications*, International Standard Book Number: 1-58053-894-0, second edition. Boston/London: Artech house.
- Krasuski, K. (2017). Application of the GPS/EGNOS solution for the precise positioning of an aircraft vehicle. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. 96..
- Liu, J., Chen, R., Chen, Y., Kröger, T. and Pei, L. (2012). Performance evaluation of EGNOS in challenging environments. *Journal of Global Positioning Systems*, 11(1), 145–155.
- Liu, Z., Lia, Y., Guoa, J. and Lia, F. (2016). Influence of higher-order ionospheric delay correction on GPS precise orbit determination and precise positioning. *Geodesy and Geodynamics*, 7(5), 369–376.
- Nie, Z., Zhou, P., Liu, F., Wang, Z. and Gao, Y. (2019). Evaluation of orbit, clock and ionospheric corrections from five currently available SBAS L1 services: methodology and analysis. *Remote Sensing*, 11(4), 411. Available at: www.mdpi.com/journal/remotesensing
- Rovira-García, A., Juan, J. M., Sanz, J., González-Casado, G. and Ibáñez, D. (2015). Accuracy of ionospheric models used in GNSS and SBAS: methodology and analysis. *Journal of Geodesy*, 90, 229–240.
- RTCA. (2001). *Minimum Operational Performance Standards for Global Positioning System/Wide Area Augmentation System Airborne Equipment*. Washington, DC 20036. Supersedes DO-229B.
- Sanz, J., Juan Zornoza, J. M. and Hernández-Pajares, M. (2013). *GNSS Data Processing, Volume I: Fundamentals and Algorithms*. European Space Agency, the Netherlands. ISBN 978-92-9221-886-7.
- Sauer, K. (2003). *Integrated high precision kinematic positioning using GPS and EGNOS observations*. Ph.D. thesis, University of London, Department of Civil and Environmental Engineering, Imperial College, London, United Kingdom.
- Su, K., Jin, S. and Hoque, M. M. (2019). Evaluation of ionospheric delay effects on multi-GNSS positioning performance. *Remote Sensing*, 11, 171. Available at: www.mdpi.com/journal/remotesensing
- Tabti, L., Kahlouche, S. and Benadda, B. (2018). Improving availability of the EGNOS system in Algeria for dual frequency. *Coordinates Magazine*, XIV(1), 36–40.
- Walter, T., Blanch, J. and Enge, P. (2012). L1/L5 SBAS MOPS to Support Multiple Constellations. Proceedings of the 25th International Technical Meeting of the Satellite Division. Institute of Navigation (ION GNSS), Nashville, TN, 1287–1297.
- Zahidul, M., Bhuiyan, H., Kuusniemi, H., Soderini, A., Honkala, S. and Marila, S. (2017). Performance of EGNOS in North-East European Latitudes, Proceedings of the 2017 International Technical Meeting of The Institute of Navigation, Monterey, California, January 2017, 627–636. <https://doi.org/10.33012/2017.14881>

Étude de faisabilité et choix optimal d'une station RIMS d'EGNOS en Algérie

■ Tabti LAHOUIARIA - Kahlouche SALEM - Benadda BELKACEM

Les performances du système EGNOS ont été évaluées en matière de disponibilité au travers des variables suivantes : les niveaux de protection HPL et VPL (Horizontal and Vertical Protection Level) basés sur des seuils d'alarme HAL et VAL (Horizontal and Vertical Alarm Limit) et l'analyse de l'erreur ionosphérique. Pour effectuer notre étude, nous avons opté pour cinq aéroports à savoir : Tamanrasset, Ghardaïa, Laghouat, Ouargla et Timimoun, ces sites ont été ajoutés aux réseaux actuels des stations RIMS (Ranging and Integrity Monitoring Stations) du système EGNOS. En Algérie, nous avons constaté que le système EGNOS permet d'avoir une bonne couverture au Nord, par contre ; en se dirigeant vers le Sud cette couverture s'affaiblit. La mise en place d'une station au centre de l'Algérie permettrait une bonne exploitation du système et en même temps étendrait la zone de couverture. Les résultats de simulation de la station Ghardaïa montrent qu'en Algérie les performances du système EGNOS deviennent meilleures, en particulier dans la zone comprise entre $[0^\circ, 5^\circ]$ en longitude et de 30° en latitude.

Introduction

Les GNSS (Global Navigation Satellite System) parmi lesquels le système américain GPS (Global Positioning System) ont tous pour objectif principal de donner la position et la vitesse d'un utilisateur à tout instant, en tout lieu et dans un référentiel global. La modernisation du GPS, du système Russe GLONASS et l'arrivée de nouvelles constellations, à l'instar de Galiléo pour l'Europe ou de Beidou pour la Chine, et même les systèmes d'augmentation créeront de nouvelles applications innovantes.

Les systèmes d'augmentation spatiaux ou SBAS pour "Space Based Augmentation Systems" sont des systèmes de radionavigation par satellites destinés à compléter les systèmes GNSS pour fournir conjointement des performances supérieures en termes de précision, de positionnement, de disponibilité, de continuité du service et d'intégrité des informations fournies. Ces systèmes permettent la transmission des corrections différentielles et des messages d'intégrité pour les satellites de navigation qui sont en vue par un réseau de stations de référence.

MOTS-CLÉS

EGNOS, GPS, niveau de protection, alarme limite, correction ionosphérique, stations RIMS.

Plusieurs nations ont mis en place leur propre système d'augmentation satellitaire ; ainsi, les Européens ont mis en place le SBAS nommé EGNOS : European Geostationary Navigation Overlay Service. Il couvre le continent européen et s'appuie sur un segment spatial de 3 satellites géostationnaires (PRN 120, PRN 123 et PRN 136) et sur un réseau de stations terrestres composé des stations de références RIMS, des stations MCC de calcul (Mission Control Centres) et des stations de transmission NLES (Navigation Land Earth Stations). Les stations RIM comprenant 39 stations pour lequel la station d'Agadir (Maroc) a été ajoutée à la fin de



Figure 1. Distribution géographique des stations RIMS du système EGNOS [ESSP, 2015]

2013 et la station de Djerba (Tunisie) est opérationnelle depuis 2009. La distribution géographique de ces stations est donnée par la figure 1.

Messages transmis par EGNOS

Le système EGNOS diffuse ses messages sur la bande L1 (1575.42 MHz) à un débit de 250 bits par seconde. Il utilise la même modulation que celle du GPS, mais avec un débit 5 fois plus élevé. Donc à chaque seconde un message est à la disposition de l'utilisateur sous le format suivant [ESA ; 2011] : - 8 bits de préambule, 6 bits pour identifier le type de message, 212 bits de correction actuelle d'EGNOS, et 24 bits de parité ; permettant de s'assurer que les données n'ont pas été corrompues pendant la transmission (pas d'erreur de bit).

Un total de 63 types de messages peut être transmis, mais pour l'instant seulement 20 sont définis et 18 sont utilisés par EGNOS [Jimenez-Baños D. et al. ; 2011].

Corrections rapides

Les corrections rapides (PRC_f) sont diffusées par EGNOS pour chaque satellite vu par les stations RIMS dont le but est de corriger les erreurs qui varient rapidement comme les erreurs d'horloge et les erreurs d'éphémérides. L'application de ces corrections est effectuée au niveau des pseudo-distances mesurées par le récepteur, en plus de cette correction, une variation de correction RRC (Range Rate Correction) est aussi ajoutée à la mesure afin de compenser celle-ci lors de la réception des messages [Guay. J-C. ; 2010]. L'équation (1) présente le calcul de pseudo distance corrigée [EUROCONTROL ; 2003] :

$$PR_{corrigé}(t) = PR_{mesuré}(t) + PRC_f(t_{of}) + RRC(t - t_{of}) \quad (1)$$



Tel que :

$$RRC(t_{of}) = \frac{PRC_{fcourant} - PRC_{fprécédent}}{t_{ofcourant} - t_{ofprécédent}} \quad (2)$$

Où : t est instant d'applicabilité, et t_{of} est le temps d'applicabilité du message le plus récent en s , $PR_{corrigé}$ est la pseudo-distance corrigée, et $PR_{mesuré}$ la pseudo-distance mesurée en (m), PRC_f est la correction rapide, et RRC est la variation de la correction en (m).

■ Corrections lentes

Le but des corrections lentes ou corrections à long terme transmises par EGNOS est :

- de corriger les erreurs qui varient lentement comme la position des satellites fournie par les éphémérides radio diffusées;
- d'actualiser les erreurs d'horloges des satellites (δa_{f0}).

L'application des corrections lentes est effectuée au niveau du biais d'horloge et de la position des satellites dans le format WGS-84. La correction d'horloge des satellites $\delta\Delta T_{sat}$ doit être ajoutée à la correction ΔT_{sat} provenant des éphémérides du GPS [Guay J-C. ; 2010]. La mise à jour des horloges est donnée par l'équation suivante [Gillieron P.Y. ; 2004] :

$$\delta\Delta T_{sat}(t) = \delta a_{f0} + \delta a_{f1}(t - t_0) \quad (3)$$

Où t : instant d'applicabilité, et t_0 : instant de réception du message (s), $\delta\Delta T_{sat}$ est la correction d'horloge (s) ; δa_{f0} est la correction d'erreur d'horloge (s) ; δa_{f1} est la dérive de correction et elle est égale à zéro lorsque le *Velocity Code* est nul (s). La correction de pseudo distance est donné par :

$$RC_{clock}(t) = \delta\Delta T_{sat}(t) \times c \quad (4)$$

■ Corrections ionosphériques

Les corrections ionosphériques sont diffusées par EGNOS pour chacun des points d'une grille virtuelle située à 350 km d'altitude. Ces points sont appelés IGP (*Ionospheric Grid Points*). L'application des corrections ionosphériques par l'utilisateur se divise en cinq étapes :

1. Récupérer les points ionosphériques de la grille IGP transmise par EGNOS ;
2. Récupérer le délai à chacun des IGP transmis ;
3. Calculer les lignes de vue entre le récepteur et les satellites pour déter-

miner les IPP (*Ionospheric Pierce Point*). Le IPP est défini comme étant l'intersection entre la couche d'atmosphère située à 350 km d'altitude et la demi-droite ayant pour origine le récepteur, et pour direction celle du satellite GPS considéré ;

4. Calculer les délais ionosphériques par interpolation aux IPP pour chacun des satellites corrigés ;
5. Appliquer la correction ionosphérique correspondante (IC), elle est donnée par :

$$IC = F_{pp} \times \tau_{IPP}(m) \quad (6)$$

Tel que $\tau_{IPP}(m)$ est le délai pour chaque IPP. Le récepteur prend en compte un facteur d'Obliquité (F_{pp}) entre l'IPP et l'utilisateur [Arbesser-Rastburg.B ; 2002]. Le F_{pp} se calcule par :

$$F_{pp} = \left[1 - \left(\frac{R_e \cos E}{R_e + h_I} \right)^2 \right]^{-1/2} \quad (5)$$

Où E est l'angle d'élévation du satellite par rapport à l'utilisateur (radians) ; R_e est le rayon approximatif de la Terre (6378,1363 km) ; h_I est la hauteur de la densité maximale d'électrons.

À ces trois types de corrections s'ajoutent l'information sur le système EGNOS, l'information sur la dégradation des corrections et l'information sur l'intégrité [Sauer K. ; 2003].

Pour la correction troposphérique, Le système EGNOS ne transmet pas de corrections troposphériques. Elle est corrigée grâce à un modèle assez simple en utilisant la position estimée du récepteur, élévation du satellite et le jour de l'année (VanLeeuwen S. et al. ; 2004). L'estimation du retard troposphérique prend alors la forme suivante (Eurocontrol ; 2003):

$$RC_{tropo} = -(d_{hyd} + d_{wet}) \frac{1.001}{\sqrt{0.002001 + \sin^2(E_i)}} \quad (7)$$

Avec : RC_{tropo} estimation du retard troposphérique ; E_i : angle d'élévation du satellite, d_{hyd} contribution sèche au délai zénithal et d_{wet} contribution humide au délai zénithal.

La variance des résidus des corrections troposphériques est donnée par :

$$\sigma_{i,tropo} = 0.12 \times m(Eli) \quad (8)$$

$m(Eli)$ est calculé par l'équation 9 pour des angles d'élévations supérieures à 5°.

$$m(Eli) = \frac{1.001}{\sqrt{0.002001 + \sin^2(Eli)}} \quad (9)$$

Niveau de protection

EGNOS diffuse des paramètres permettant à l'utilisateur d'évaluer le degré de confiance dans les corrections différentielles et d'estimer une limite de son erreur de position ; ces paramètres appelés niveaux de protection (PL) définissent une zone où la position réelle de l'utilisateur se trouve avec une très haute certitude. Les niveaux de protection sont calculés à chaque instant par le récepteur en utilisant les paramètres suivants :

- UDRE : erreur de distance différentielle de l'utilisateur (*User Differential Ranging Error*) ; qui caractérise l'estimation des erreurs résiduelles sur les corrections orbite/horloge de chaque satellite ;
- GIVE (*Grid Ionospheric Vertical Error*) qui décrit le niveau d'erreur des corrections ionosphériques [Perrin O. ; 2004].

Ces deux paramètres sont transmis par EGNOS, tandis que les niveaux de protection horizontal et vertical sont calculés par le récepteur, ils sont calculés par :

$$HPL = K_h \times \sigma \quad VPL = K_v \times d \quad (10)$$

Pour l'aviation civile K_h est fixé à 6 et K_v est fixé à 5.33 pour les phases PA (*Precision Approach*). Ce paramètre peut néanmoins être modifié pour d'autres applications, par exemple terrestres ou maritimes, permettant ainsi de disposer de HPL réduits pour des probabilités plus importantes.

σ et d : Variance verticale et horizontale de la position estimée en fonction de la matrice G et W telle que :

$$G_i = \begin{bmatrix} -\cos Eli \sin Azi & -\cos Elicos Azi & -\sin Eli \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} = \text{ième ligne de G} \quad (11)$$

$$W = \begin{bmatrix} 1/\sigma_1^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1/\sigma_2^2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1/\sigma_N^2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

σ_i^2 est la somme des variances pour chaque satellite (m^2), elle est calculée par :

$$\sigma_i^2 = \sigma_{i,flt}^2 + \sigma_{i,UIRE}^2 + \sigma_{i,air}^2 + \sigma_{i,tropo}^2 \quad (13)$$

Tel que $\sigma_{i,flt}^2$ est la variance des résidus des corrections lentes et rapides (m^2), $\sigma_{i,UIRE}^2$ est la variance des résidus des corrections ionosphériques (m^2) ; $\sigma_{i,air}^2$ est la variance des erreurs du récep-



teur aéroporté (m^2), elle est donnée par l'équation (14), $\sigma_{i,tropo}^2$ est la variance des résidus des corrections troposphériques (m^2) [Guay J-C. ; 2010].

$$\sigma_{i,air}^2 = \sigma_{i,noise}^2 + \sigma_{i,multipath}^2 + \sigma_{i,divg}^2 \quad (14)$$

$$\sigma_{i,multipath} = 0.13 + 0.53e^{(-ele_i/10deg)}(m) \quad (15)$$

Tel que ele_i est l'élévation du satellite. Les deux valeurs $\sigma_{i,noise}^2$, $\sigma_{i,divg}^2$ dépendent de la catégorie du récepteur GNSS.

Résultats et Analyses

L'objectif de ce travail est d'analyser l'amélioration des performances du système EGNOS atteint lors de l'introduction d'une station RIMS pour différents sites nationaux, et comme EGNOS a été destiné aux applications de la navigation aérienne, les critères de cette application ont été considérés dans cette simulation. le choix a été porté dans un premier temps sur les stations opérationnelles en 2015 qui sont au total de 39 (ESSP), et dans un deuxième temps l'analyse a été faite par l'ajout d'un site national aux stations déjà opérationnelles ; cinq sites ont été testés pour évaluer les meilleures performances du système EGNOS en Algérie :

1. EGNOS actuel (39 stations, sans station en Algérie) ;
2. EGNOS actuel + ajout d'une station à Tamanrasset : 22°83' Nord, 5° 46' Est (choix initial de l'Agence Spatiale européenne) ;
3. EGNOS actuel + ajout d'une station à Ghardaïa : 30° 34' 08" Nord, 2° 51' 53" Est ;
4. EGNOS actuel + ajout d'une station à Laghouat : 33° 45' 52" Nord 2° 55' 42" Est ;
5. EGNOS actuel + ajout d'une station à Ouargla : 31° 55' 53" Nord 5° 24' 24" Est ;
6. EGNOS actuel + ajout d'une station à Timimoun : 29° 14' 28" Nord 0° 17' 01" Est.

Ces tests ont été analysés avec le logiciel SBAS Simulator de l'ESA, les résultats dépendent du choix de plusieurs paramètres (RIMS filtre, RIMSnetwork) et des conditions initiales (constellation, date, zone, ...):

- date : 18 février 2015 (journée 49) ; la constellation GPS contient 30 satellites ;
- dans cette étude on a choisi une zone qui contient tout le territoire Algérien,

elle est déterminée par : longitude min = -10°, longitude max = 15° et latitude min = 15°, latitude max = 40° ;

Les paramètres utilisés dans cette simulation sont les niveaux d'alarme (HAL et VAL) qui sont définis comme étant le maximum acceptable pour l'erreur de positionnement, ils sont fonction de la phase de vol considérée.

Pour cette étude l'approche avec guidage vertical APV I a été prise, elle est caractérisée par HAL = 40 m et VAL = 50 m [Shiun Jan S. ; 2003].

■ Choix optimal d'une station RIMS en Algérie

Le projet d'extension du système EGNOS vise à renforcer son segment terrestre dans le continent Africain par l'installation de stations RIMS dans les pays concernés. Il a été prévu par l'ESA l'installation d'une station (RIMS) au niveau de l'aéroport international de Tamanrasset.

Les résultats de la simulation effectuée sur ce site ont montré que les performances du système ne peuvent pas être atteintes sur tout le territoire Algérien, mais garantissent plutôt une meilleure couverture dans la direction

du réseau principal de stations RIMS (vers l'Europe, donc plus au Nord). Les conclusions tirées de cette étude ont été les suivantes [Kahlouche S., Tabti L. ; 2015] :

- les corrections fournies par chaque station RIMS dépendent des stations voisines ;
- l'amélioration de service EGNOS est interne du réseau des stations RIMS ;
- la portée entre deux RIMS est importante ; plus les stations sont voisines plus l'amélioration est importante, c'est-à-dire les stations isolées n'ont pratiquement aucune influence.

Pour toutes ces raisons, le déplacement de la station de Tamanrasset vers le centre de l'Algérie est primordial pour assurer une couverture meilleure et étendue du système EGNOS en Algérie. C'est dans ce cadre, que la suite de ce travail est portée sur l'analyse des performances du système EGNOS avec l'ajout de différents sites nationaux. Ces sites abritent des aéroports situés entre 30 et 35 degrés de latitude, en excluant ceux situés à l'extrême Ouest, proches de la station marocaine d'Agadir, ou à l'extrême Est, couverts par la station de Djerba (Tunisie).

Sites	φ : Latitude λ : Longitude	25° [0° 5°]	30° [0° 5°]	35° [0° 5°]
39 stations		[1.38 4.13]	[54.4 65.5]	[91.0 97.6]
39 stations + Ghardaïa		[22.0 66.9]	[98.6 100]	100
39 stations + Laghouat		[8.27 12.4]	[72.4 81.3]	100
39 stations + Ouargla		[14.4 22.7]	[88.9 83.4]	100
39 stations + Timimoun		[13.1 62.0]	[95.8 80.0]	100

Tableau 1. Disponibilité horizontale en % (HPL-HAL=40 m) avec 39 stations RIMS incluant le site choisi

Sites	φ : Latitude λ : Longitude	25° [0° 5°]	30° [0° 5°]	35° [0° 5°]
39 stations		[1.38 4.83]	[66.9 71.0]	[96.5 97.2]
39 stations + Ghardaïa		[34.4 76.5]	[95.8 97.6]	99.3
39 stations + Laghouat		[10.3 14.4]	[89.6 92.4]	99.3
39 stations + Ouargla		[19.3 26.2]	[91.7 92.4]	99.3
39 stations + Timimoun		[29.1 74.4]	[93.7 97.9]	99.3

Tableau 2. Disponibilité verticale en % (VPL-VAL=50 m) avec 39 stations RIMS incluant le site choisi

Les résultats de simulation montrent que la disponibilité horizontale et verticale du système a été améliorée en incluant une station au centre de l'Algérie en particulier au nord de l'Algérie, néanmoins cette disponibilité diminue en se déplaçant vers le sud. La disponibilité verticale du système EGNOS passe à plus de 95 % en incluant la station de Ghardaïa; dans la zone comprise entre [0°,5°] en longitude et de 30° en latitude comme le montre les figures 2 et 3.





■ Disponibilité du système EGNOS

L'utilisation des niveaux de protection (PL) offre une meilleure interprétation de la disponibilité du système EGNOS. La disponibilité d'EGNOS est calculée par rapport au pourcentage de temps où les niveaux de protection (HPL et VPL) se situent en dessous de leurs valeurs seuils (fixées pour un type d'opération par les limites d'alarme, i.e. HAL et VAL. On a deux cas :

- $PL < AL$ Système disponible (intégrité garantie);
- $PL \geq AL$ Système non disponible (intégrité pas garantie) [Bureau. J ; 2012].

Les résultats de disponibilité en approche APV I pour les quatre sites sont donnés par les *tableaux 1 et 2* pour des latitudes 25, 30 et 35 degrés et entre [0° 5°] en longitudes.

■ Erreur sur la précision verticale de la grille ionosphérique

L'erreur sur la précision verticale de la grille ionosphérique est évaluée à partir des indicateurs de précision sur la grille ionosphérique délivrés par le système EGNOS.

La précision de la grille de corrections ionosphériques dépend du nombre des points IPP, ce nombre est directement lié au nombre des stations au sol, plus ce nombre augmente par l'ajout des stations RIMS, plus le nombre de points IPP augmentent, plus la précision des corrections ionosphériques sera meilleure.

Le calcul de sigma GIVE permet de donner l'erreur verticale de la grille ionosphérique et chaque valeur correspond aux nombres de points IPP surveillé par les points ionosphériques de la grille IGP. Les résultats de sigma GIVE varient en mètres entre 0.54 (Latitude 35°) et 43 (Latitude 25°) et sont fournis par le tableau suivant On peut constater que l'ajout d'une

station RIMS permet de diminuer les valeurs de sigma GIVE, cela est expliqué par l'augmentation de satellites surveillés donc l'augmentation du nombre de points IPP qui permettent d'améliorer la précision verticale de la grille ionosphérique la précision verticale de la grille ionosphérique.

Par exemple, l'ajout de la station de Ghardaïa permet d'avoir une valeur maximale de sigma GIVE égale à 0.74 m alors que sa valeur était 38.3m avec le réseau actuel (39 stations).

Conclusion

A partir de cette étude on constate que le choix du site dépend principalement de l'application considérée en



φ : Latitude λ : Longitude	25° [0° 5°]	30° [0° 5°]	35° [0° 5°]
Sites			
39 stations	[38.3 43.1]	[4.98 12.6]	0.54
39 stations + Ghardaïa	[0.73 0.74]	0.54	0.54
39 stations + Laghouat	[32.2 35.2]	[0.55 0.56]	0.54
39 stations + Ouargla	[3.2 31.5]	[0.54 0.56]	0.54
39 stations + Timimoun	[0.66 8.54]	[0.54 0.56]	0.54

Tableau 3. σ_{GIVE} avec 39 stations RIMS incluant le site choisi en mètres

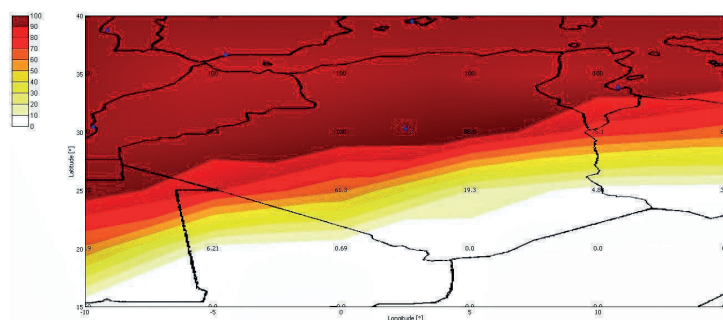
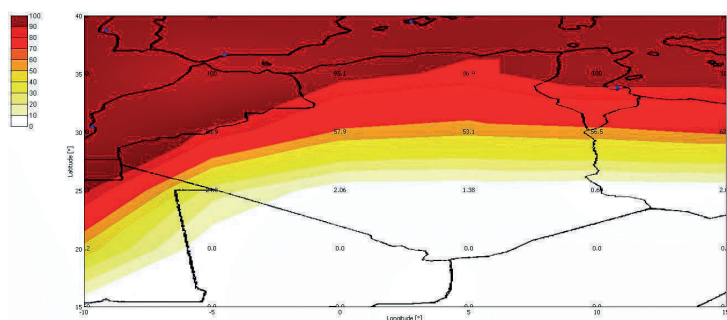


Figure 2. Disponibilité horizontale avec 39 stations RIMS incluant la station de Ghardaïa en %

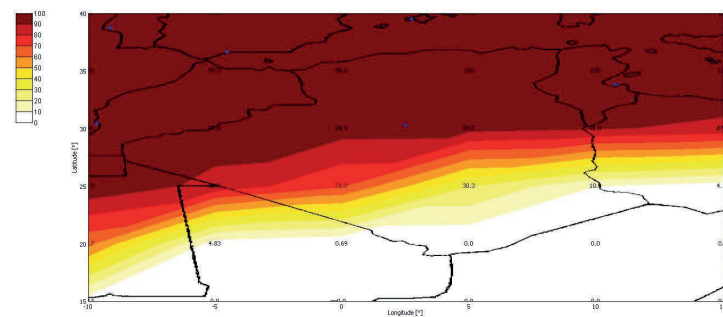
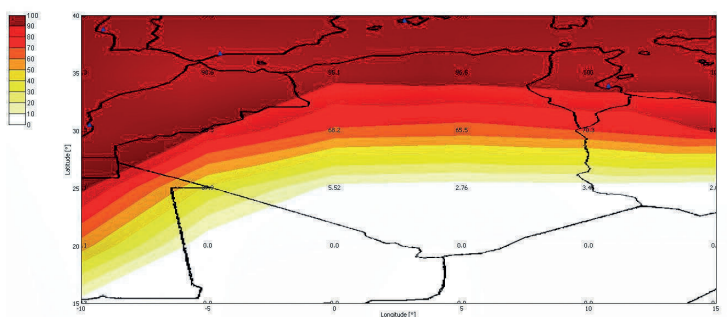


Figure 3. Disponibilité verticale avec 39 stations RIMS incluant la station de Ghardaïa en %

► priorité, en fixant préalablement les paramètres de la simulation.

À terme de ce travail nous avons atteint notre objectif qui est de tester les performances du système EGNOS dans différents sites nationaux. Quatre sites ont été testés pour évaluer les meilleures performances du système EGNOS en Algérie.

Les tests effectués sur nos sites nous ont permis de conclure que les corrections d'EGNOS peuvent être utilisées seulement pour le territoire couvert par les stations RIMS du système. Les conclusions tirées de cette étude ont été les suivantes :

- l'ajout d'une station en Algérie permet d'augmenter la disponibilité du système et de réduire l'erreur sur la précision verticale de la grille ionosphérique.
- la mise en place d'un site au centre de l'Algérie, en particulier à Ghardaïa permet d'avoir une bonne exploitation du système et en même temps étendre sa zone de couverture.
- les sites de Ghardaïa, Laghouat, Ouargla ou même Timimoun permettent d'avoir les meilleurs résultats, spécialement au-dessus de latitude 30 degrés ; de ce fait, l'ajout de l'une de ces stations permet d'améliorer la couverture d'EGNOS.

Finalement, les critères pour sélectionner le meilleur emplacement d'une station RIMS dépendent de nombreux facteurs, non seulement techniques, mais aussi institutionnels, politiques ou réglementaires et sans oublier les considérations de sécurité.

Contacts

Tabti LAHOUIA - Kahlouche SALEM
Département de Géodésie Spatiale - Centre des Techniques Spatiales
Email : ltabti@cts.asal.dz

Benadda BELKACEM
Laboratoire de Télécommunications de Tlemcen

Bibliographie

Arbesser-Rastburg B. [2002] : *Ionospheric Corrections for satellite navigation using EGNOS*, European Space Agency, ESA-ESTEC, TOS-EEP.

Bureau J. [2012] : *Définition et analyse statistique d'une mesure d'intégrité pour données GPS/EGNOS*, thèse de doctorat, Université Toulouse 3 Paul Sabatier.

Commission des Communautés Européennes [2003] : *Intégration du programme EGNOS dans le programme GALILEO*.

ESA [2011] : *GUIDE EGNOS; à l'usage des Développeurs d'Applications*. Commission Européenne, ED 2.0.

ESSP [2015] : <http://egnos-user-support.essp-sas.eu/>

EUROCONTROL [2003] : *Technical Notes on SBAS, PEG-TN-SBAS*. V, 15, 20, 21,

European Space Agency (SBASimulator) ; <http://www.egnos.pro.esa.int/sbasimulator>

Gillieron P-Y. [2004] : *Principes et Architecture des Systèmes d'Augmentation*, Laboratoire de topométrie, EPFL. Réf : EGN-SDD EDAS, V2.0.

Guay J-C. [2010] : *Récepteur SBAS-GNSS logiciel pour des applications temps-réel*, École De Technologie Supérieure, Université du Québec, maîtrise en génie électrique.

Jimenez-Baños D., Powe M., Rajmathur A., Toran F., Flament D., Chatre E. [2011] : *EGNOS Open Service Guidelines for receivers manufacturers* ; 24th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Portland OR.

Kahlouche S., Tabti L. [2015] : *Feasibility study and site choice for an EGNOS station in Algeria*, International Committee on Global Navigation Satellite Systems, Experts Meeting on Global Navigation Satellite Systems (GNSS) Services. Vienna, Austria.

Perrin O. [2004] : *Performances d'EGNOS et applications Cours IGSO -EPFL*, Agence Spatiale Européenne.

Sauer K. [2003] : *Integrated high precision kinematic positioning using GPS and EGNOS observations*; thèse de doctorat, University of London.

Shiunjan S. [2003] : *Aircraft landing using a modernized global positioning system and the wide area augmentation system*; thèse de doctorat, Stanford University.

Van Leeuwen S., Vander Marel H., Tossaint Mand Martelluci A. [2004] : *Validation of SBAS MOPS troposphere model over the EGNOS service area*, Naational Lucht,

En Ruimtevaartlaboratorium, National Aerospace Laboratory NLR.

Ventura-Traveset J., Michel P. and Gauthier. I [2004] : *Architecture, mission and signal processing aspects of the EGNOS System: the first European implementation of GNSS*; European Space Agency (ESA).

Walter T. [2012] : *Satellite Navigation for Guidance of Aircraft*, Presented to Workshop on Science Application of GNSS in Developing.



ABSTRACT

Key world: EGNOS, GPS, protection level, alarm limit, ionospheric correction, RIMS stations.

The performance of the EGNOS system were analyses in terms of availability through the following variables, protection level HPL and VPL (Horizontal and Vertical Protection Level) based on alarm limit (HAL Horizontal or VAL Vertical alarm Limit) and ionospheric error analysis. To carry out our study, we opted for five airports namely: Tamanrasset, Ghardaïa, Laghouat, Ouargla and Timimoun, these sites have been added to the existing networks of the RIMS (Ranging and Integrity Monitoring Stations) stations of the EGNOS system.

In Algeria, we found that EGNOS provides good coverage in the north, however heading to the south this coverage is decreasing. The addition of one station in the center of Algeria should allow a good service of the system and at the same time should extend its coverage area. The results simulation of the Ghardaïa station show that in Algeria, the performance of EGNOS system is better, especially in the area between [0 °, 5 °] in longitude and 30 ° in latitude.

Improving of the EGNOS system in Algeria for dual frequency

The objective of this present work is to analyze the coverage of the EGNOS system for the civil aviation applications in Algeria. The main searched results concern the comparison between the availability of the system when using the single frequency (L1) in simple mode, and the double frequency (L1/L5)



Lahouaria TABTI

Researcher at Centre of Spatial Techniques, Department of Geodesy; Algerian Space Agency and Abou Bakr Belkaid University of Tlemcen, Algeria



Salem KAHLUCHE

Research Director at the Centre for Space techniques, head of the Department of Space Geodesy-Algerian Space Agency, Algeria



Belkacem BENADDA

Assistant, and Professor at the Abou Bakr Belkaid University of Tlemcen, Algeria

The European system EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service) provide ranging signals transmitted by GEO satellites, differential corrections on the wide area and additional parameters aimed to guarantee the integrity of the GNSS user. EGNOS offers the following information:

- Satellite orbit and clock corrections to the existing satellite navigation services (GNSS and GEO), as well as the estimation of errors associated to satellites or User Differential Ranging Error (UDRE).
 - Ionospheric corrections for a given grid of points, as well as the estimation of errors associated to ionosphere or Grid Ionospheric Vertical Error (GIVE).
 - Satellite orbit/clock corrections and ionospheric corrections are dynamically modeled. EGNOS shall communicate the user the corrections that are available to be used by the receiver. The information of the models is packed on messages to be sent to the user.
 - Tropospheric corrections are statically modeled, which means that corrections are tabulated and the information does not depend on any external behavior but the user position (a mean troposphere is assumed).
- aviation community. The Federal Aviation Administration's objective in using GPS is to provide enhanced services and reduce infrastructure cost for aircraft navigation. To do so, the Required Navigation Performance (RNP) for accuracy, integrity, availability, and continuity must be met. These four parameters are defined as follows:
- Accuracy corresponds to the difference between the measured and the real position, speed or time value.
 - Integrity refers to the confidence the user is able to have in the calculation of the position. Integrity includes a system's capacity to provide confidence thresholds as well as alarms in the event that anomalies occur.
 - Continuity defines a system's ability to function without interruption throughout the operation the user wants to carry out (for example landing a plane). Continuity is the probability, from the moment that the accuracy and integrity criteria are fulfilled at the beginning of an operation that they continue to be fulfilled throughout that operation's entire duration.
 - Availability is the percentage of time in which, over a certain zone geographical area, the accuracy integrity and continuity criteria are fulfilled. [1]

Aviation navigation requirements

Several Satellite Based Augmentation Systems are currently in use by the

The requirements for the civil aviation have been standardised by the International Civil Aviation Organisation (ICAO) and they

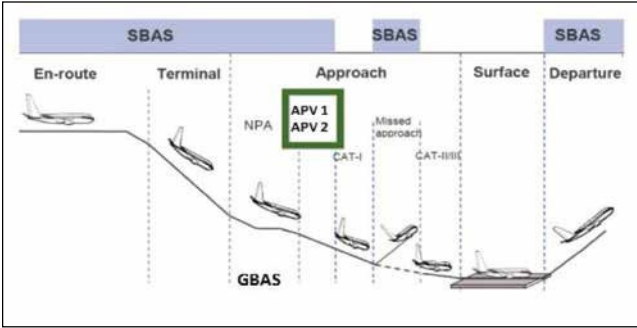


Figure 1: Evolution of aeronautical phases of flight [2]



Figure 2: EGNOS reference stations [3].

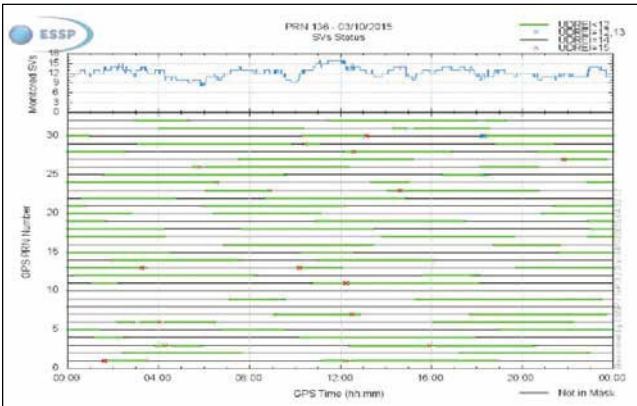


Figure 3: GPS satellites monitoring status on 03/10/2015 [3]

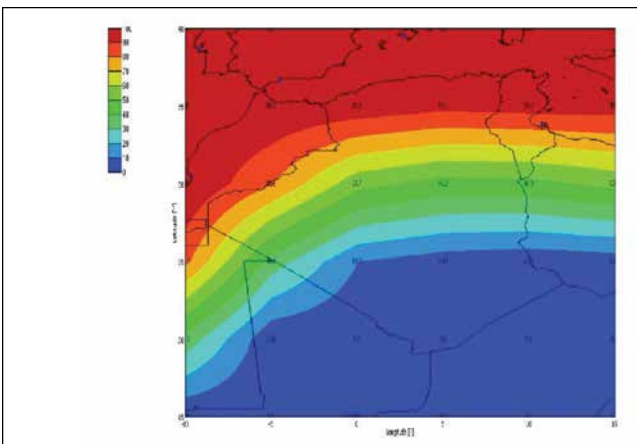


Figure 4: EGNOS horizontal availability performances with L1 frequency (HPL<HAL = 40 m) with the current RIMS network

assume different values for each specific phase of flight. ICAO for SBAS for en-route through category I precision approach operations are shown in figure 1.

EGNOS extension in the MEDA region

At present, in the mission of EGNOS, the provision of services for MEDA (MEDiterranean Area) is foreseen. This extension will improve simultaneously the performances over the core EGNOS and MEDA service areas, creating new markets in emerging countries.

The main function of the Ranging and Integrity Monitoring Station (RIMS) is to collect measurements from GPS satellites and to transmit these raw data every second to the Central Processing Facilities (CPF) of each Mission Control Centre (MCC).

The current RIMS network comprises 39 RIMS sites located over a wide geographical area. Figure 2 shows the geographical distribution of the RIMS already in operation and where no RIMS station is installed in Algeria.

Use of single-frequency

For a single frequency user, each line-of-sight has four confidence terms that are summed together to obtain the total confidence. These terms correspond to: the satellite clock and ephemeris corrections (σ_{flt}), the ionospheric correction (σ_{UIRE}), the airborne code noise / multipath (σ_{air}) and the tropospheric error (σ_{tropo}).

The total one-sigma confidence bound for a particular line-of-sight is the root sum square of these four terms [4]:

$$\sigma_i^2 = \sigma_{i,flt}^2 + \sigma_{i,UIRE}^2 + \sigma_{i,air}^2 + \sigma_{i,tropo}^2 \quad (1)$$

Where:

- $\sigma_{i,flt}^2$ is the fast and long-term degradation confidence, which is the confidence bound on satellite clock and ephemeris corrections;
- $\sigma_{i,UIRE}^2$ is the user ionospheric range error confidence, which is the confidence bound on ionospheric delay corrections;
- $\sigma_{i,air}^2$ is the airborne receiver error confidence, which is the confidence bound on aircraft user receiver error;
- $\sigma_{i,tropo}^2$ is the tropospheric error confidence, which is the confidence bound on residual tropospheric error. [5]

For the single frequency mode the overall satellite residual is computed as [6]:

$$\sigma_{i,sf}^2 = \sigma_{i,flt}^2 + \sigma_{i,UIRE}^2 + \sigma_{i,air,sf}^2 + \sigma_{i,tropo}^2 + \sigma_{i,RIMS}^2 + \sigma_{i,system}^2 \quad (2)$$

Where:

$\sigma_{i,RIMS}^2$ is the error contribution from RIMS, and $\sigma_{i,system}^2$ is the overall constellation system error.

Use of dual frequency

The usage of dual civilian frequencies (L1 and L5) is an attempt to address the largest delay estimation in the EGNOS system (ionospheric delay), the need for better improvement of its error estimation and correction was raised. This need lead to the potential use of both L1 and L5 frequencies together which would improve the performance for GPS users by allowing them to estimate and correct/mitigate the ionospheric errors.

This is done in a way through which the GPS dual frequency receiver would be directly involved in estimating the ionospheric delay and applying its error factor to the pseudo-range measurements for each line of sight GPS satellite without any help needed from the EGNOS system. There is another major advantage from using the dual frequency system which is its relative immunity against unintentional interference. So if one of the signal frequencies has been jammed, we will still have visual and measurements from the second signal from the same satellite. [7]

For an L1/L5 dual-frequency GPS/EGNOS user, the weighting matrix W is a diagonal matrix and the inverse of the i^{th} diagonal element is given by the variance for the corresponding satellite, $\sigma_{i,dual}^2$ as calculated in equation:

$$\sigma_{i,dual}^2 = \sigma_{i,flt}^2 + \sigma_{i,air,L1-L5}^2 + \sigma_{i,trop}^2 \quad (3)$$

Where $\sigma_{i,flt}^2$ and $\sigma_{i,trop}^2$ are defined in the same manner as in Equation (1), and $\sigma_{i,air,L1-L5}^2$ is the L1/L5 dual-frequency airborne receiver error confidence, which is the confidence bound on ionospheric-free receiver measurements for an L1/L5 dual-frequency GPS/EGNOS user. Note: Because the calculation of $\sigma_{i,air,L1-L5}^2$ already considers both the L1/L5 dual-frequency user ionosphere range error confidence, and the airborne multipath and noise error confidence, there is no need for additional terms accounting for these errors in equation (3) [5].

For the dual frequency mode the overall satellite residual is computed as [6]

$$\sigma_{i,df}^2 = \sigma_{i,DFC}^2 + \sigma_{i,iono}^2 + \sigma_{i,air,df}^2 + \sigma_{i,tropo}^2 + \sigma_{i,RIMS}^2 + \sigma_{i,system}^2 \quad (4)$$

Where:

$\sigma_{i,DFC}$ is the model variance for dual frequency residual error

Availability analysis

The criterion of this research is to compare the coverage of availabilities in Algeria versus the horizontal and vertical alert limit (HAL and VAL) under the different cases. The simulation tool used is the SBAS Simulator 2 including dual- frequency developed by European Space Agency (ESA). The following parameters were used to evaluate EGNOS system performance in flight operations:

- Date 03/10/2015; EGNOS satellite monitoring status for each satellites GPS as function of the precision indicators (UDREI) is given in figure 3.

The monitoring status of each satellite in function of UDREI, it's given by:

- UDREI<12: SV satellite is used by EGNOS.
- UDREI=12, 13: Although not considered as unhealthy, satellites with UDREI \geq 12 cannot be used for all services.
- UDREI=14: SV unmonitored.
- UDREI=15: SV unhealthy.
- The satellites that are not in EGNOS GPS mask are also represented in the figure 3.
- The area covered is [-10, 15] degree in longitude and [15, 40] degree in latitude (to allow coverage for all the Algerian country);
- RIMS Network: RIMS stations used in the simulation is based on operational stations in 2015 which are in total of 39, presented in figure 2;
- σ_{UDRE} and σ_{DFRE} is determined by the interpolation; is set the value which is based on number of RIMS that monitor a specific satellite. The model used to calculate the ionospheric error (GIVE) is based on an interpolation which depends on current RIMS stations;
- Availability simulation computes the availability for a defined service level, it calculated in relation to the percentage of time when the protection levels (HPL and VPL) are below their threshold values (set for a type of operation by the alarm limits, i.e. HAL and VAL).. In this simulation we consider three services: APV1 (HAL = 40 m, VAL = 50 m), LPV 200 (HAL = 40 m, VAL=35 m), and APV2 (HAL= 40 m and VAL=20 m).

EGNOS horizontal availability

The simulation result of horizontal availability for an L1 single-frequency is shown in Figure 4.

As can be seen, in north of Algeria ($\phi > 35^\circ$); EGNOS is available of more than 90 %; this coverage is ensured by the European stations and neighbouring countries.

However, in dual frequency mode, the simulation results show that the availability is higher than the 99% of 40 m HAL (necessary for all horizontal service) in Algeria.

Table 1 summarized EGNOS horizontal availability with single and dual frequency for all services.

EGNOS vertical availability

Now that we have appropriate estimates for the individual error components, we can construct the dual frequency case. Here we use for the availability the calculation of VPL give by equation 4; the results are shown in table 2.

For single-frequency simulation results, the coverage of APV1, LPV 200 and APV2 in centre of Algeria ($\phi < 30^\circ$) is less than 60 %, this coverage can be improved if a RIMS station will added in the centre of Algeria for APV1 and LPV 200 [8]; the results show that availability is more than 96 % in north of Algeria ($\phi > 35^\circ$).

In Algeria, the coverage is slightly better with 39 stations using L1/L5 because the ionospheric delay can be directly estimated; this direct use of dual frequency will be more accurate and offer higher availability. The availability of LPV 200 service is given by figure 5.

The results show that both APV1 and LPV 200 availability is nearly 100% for dual frequency; and even APV 2 availability goes beyond 97% consequently, with dual frequency. It is not obvious that the EGNOS System with GPS alone would meet more than 97 % APV 2 availability in Algeria (VAL

=20 meters), as a result to complete 99 % APV 2 availability additional RIMS is required [8]. Figure 6 shows the availability obtained with the current RIMS network for this service.

Table 1: EGNOS horizontal availability with single and dual frequency for all services with the current RIMS network

		ϕ :Latitude		
		25°	30°	35°
		λ :Longitude		
		[0° 5°]	[0° 5°]	[0° 5°]
Services & Frequency				
All services (%)	L1	[4.83 10.3]	[46.2 53.7]	[93.1 97.2]
	L1/L5	100	100	100

Table 2: EGNOS vertical availability with L1 and L1/L5 frequencies for all services with the current RIMS network

		ϕ :Latitude		
		25°	30°	35°
		λ :Longitude		
		[0° 5°]	[0° 5°]	[0° 5°]
Services & Frequency				
APV1 (%) VAL = 50 m	L1	[5.52 8.97]	[55.1 59.3]	[97.9 98.6]
	L1/L5	100	100	100
LPV 200 (%) VAL = 35 m	L1	[4.83 7.59]	[50.3 56.5]	[96.5 98.6]
	L1/L5	[99.3 100]	100	100
APV2 (%) VAL = 20 m	L1	[2.76 3.45]	[35.8 42.0]	[84.1 92.4]
	L1/L5	[97.2 97.9]	[97.2 97.9]	98.6

Inertial Navigation System

NEW

0.1° Roll & Pitch
0.2° Heading
2 cm RTK



Ellipse-D Dual GNSS/INS

- » Immune to magnetic disturbances
- » L1/L2 GNSS receiver
- » Accurate heading even under low dynamics
- » Post-processing

Comparing figure 5 and figure 6, it is evident that in the case of a single frequency, EGNOS covered the north of Algeria, this coverage is ensured by the European stations and neighbouring countries. However this availability decreases moving in the south.

Conclusion

This study evaluates the performance of dual-frequency GPS in term of EGNOS availability, which is used to determine the service coverage and includes the following cases:

- Case 1: APV1 (HAL=40 m, VAL=50 m);
- Case 2: LPV 200 (HAL=40 m, VAL=35 m);
- Case 3: APV 2 (HAL=40 m and VAL=20 m).

The new signals on L5 enhance the availability of the augmented GPS system for aviation. The nominal

performance with two signals increases availability to 100% for the APV1 and LPV200 approach in Algeria.

The difference between the availability obtained with EGNOS dual frequency and single frequency is decreased for services associated with a smaller VAL.

The implementation of RIMS station in Algeria allow to receive the corrections transmitted by the EGNOS system and will benefit from the advantages offered by this system in particular in the centre and south of the country, in terms of accuracy, availability, integrity and reliability.

References

- [1] User Guide for EGNOS Application Developers (2011), ED 2.0, 15/12/2011, CNES, ESA.
- [2] M.Ciollaro (2008): GNSS multi system integrity for precision

approaches in civil aviation, doctoral thesis, University of Naples “Federico II”- Italy.

- [3] ESSP (2017) : https://egnos-user-support.essp-sas.eu/new_egnos_ops/gps_egnos
- [4] T.Walter, J.Blanch, and Puente(2010): Coverage Improvement for Dual Frequency SBAS. Proceedings of the International Technical Meeting of The Institute of Navigation, San Diego, CA, pp. 344-353.
- [5] S. Shiun jan (2003): Aircraft landing using a modernized Global positioning system and the Wide area augmentation system, Doctoral thesis, Stanford university.
- [6] User Manual (2015) , Upgrade of SBAS Simulator (2015): Iguassu Software Systems. Ref: SBAS-SIM-MANUAL. Issue: 1 Rev.: 2 Date: 19/08/2015.
- [7] D. Zayan. And M. Rehan . (2011): Parametric Study on Wide Area Augmentation System for GPS Accuracy Enhancement. International Journal of Computer Applications (0975 – 8887). Volume 28– No.9.
- [8] S. Kahlouche., L.Tabti (2017): EGNOS performance using L1/L5 dual frequency on the Algerian area, European Geosciences Union - EGU Vienna | Austria | 23–28 April 2017
- [9] S.Shiun Jan. (2010): Vertical Guidance Performance Analysis of the L1-L5 Dual-Frequency GPS/ WAAS User Avionics Sensor. Sensors ISSN 1424-8220, www.mdpi.com/journal/sensors
- [10] C.D.Salós Andrés. (2012): Integrity monitoring applied to the reception of GNSS signals in urban environments, Theses of Doctor, Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse). ▴

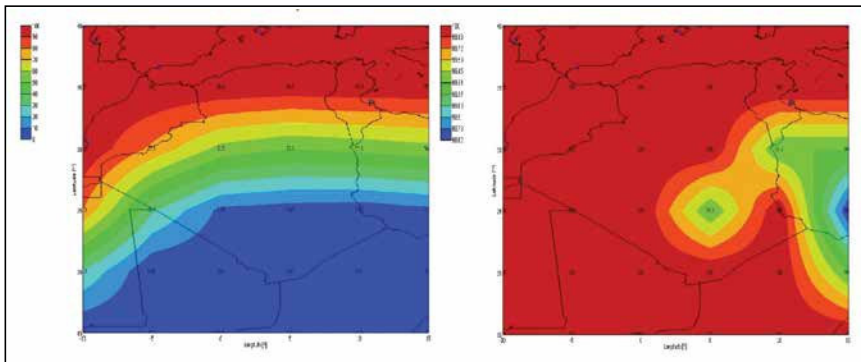


Figure 5: EGNOS vertical availability performances with L1 frequency in the left and with L1/L5 frequency in the right for LPV 200 service (HPL<HAL = 35 m) with the current RIMS network

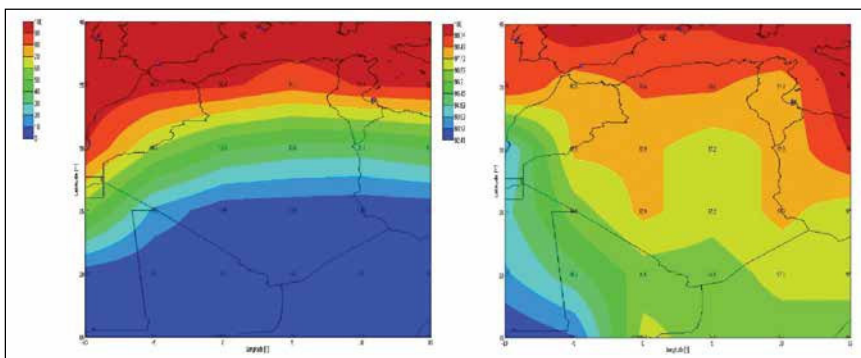


Figure 6: EGNOS vertical availability performances with L1 frequency in the left and with L1/L5 frequency in the right for APV2 service (HPL<HAL = 20 m) with the current RIMS network