

Sources d'erreurs et combinaisons linéaires des trois fréquences du système Galiléo pour le positionnement différentiel

L. TABTI, A. ZEGGAI, B.GHEZALI, S. TOUAM
Division de Géodésie Spatiale - Centre des Techniques Spatiales.
1, Avenue de la Palestine BP 13 .31200 Arzew
Email : thouaria@yahoo.fr

ملخص : يمكن أن تحدد دقة التفاضل لغاليليو بدرجة أعلى من تلك التي تحددتها حالياً أجهزة تحديد المواقع GPS (من درجة السنتيمتر أو أفضل). على أية حال، يؤدي استعمال هذه الطرق إلى بعض الصعوبات والمتطلبات في العلاقة مع خط الأساس ومختلف مصادر الأخطاء.

يتمحور تطور المناهج الملائمة، المستندة على تعدد الدمج الخطي الذي يعرضه نظام غاليليو للإزالة أو تخفيض المفاعلات التي تعود بشكل رئيسي إلى وسط الانتشار، الجداول الفلكية للأقمار الصناعية، تشويش القياسات والمسالك المتعددة.

يمثل الهدف من هذه المقالة في تطبيق منهجية تسمح بتحديد دمج خطي أفضل للترددات الثلاثة لغاليليو القابلة للتطبيق على التحديد التفاضلي. إختيار الدمج الخطي يعتمد بشكل رئيسي على طول خط الأساس وتأثير كل خطأ على نوعية النتائج المزودة من قبل غاليليو وحاجات المستخدم.

الكلمات الأساسية : غاليليو، دقة التفاضل، مدار، تشويش، مسلك متعدد، دمج خطي، غموض.

Résumé : La précision du positionnement différentiel par GALILEO peut atteindre un degré de précision supérieur à celui fourni actuellement par GPS (de l'ordre du cm ou mieux). Cependant, l'utilisation de ces méthodes entraîne quelques contraintes et exigences en relation avec la ligne de base et les différentes sources d'erreurs.

Le développement de méthodes plus appropriées, basées sur une multitude de combinaisons linéaires qu'offrent le système GALILEO, permet l'élimination ou la réduction des effets dues principalement au milieu de propagation, aux éphémérides des satellites, au bruit des mesures et aux trajets multiples.

L'objectif de cet article consiste à mettre en œuvre une méthodologie permettant de déterminer la meilleure combinaison linéaire des trois fréquences GALILEO applicable au positionnement différentiel.

Le choix de la combinaison linéaire dépend principalement de la longueur de la ligne de base, de l'influence de chaque erreur sur la qualité des résultats fournis par GALILEO et des besoins de l'utilisateur.

Mots clés : GALILEO, positionnement différentiel, troposphère, orbite, ionosphère, bruit, multi trajet, combinaison linéaire, ambiguïté.

Abstract : The accuracy of the differential positioning by GALILEO can reach a degree of superior accuracy to the one supplied currently by GPS (of the order of the cm or better). However, the use of these methods involve some constraints and requirements in relation with the baseline and the different sources of errors.

The development of more appropriate methods, based on a multitude of linear combinations that the GALILEO system offers, permits the elimination or the reduction of the effects due mainly to the middle of propagation, to the ephemeris of the satellites, to the noise of the measures and to the multipaths.

The objective of this article consists in the implement of a methodology permitting to determine the best linear combination of the three frequencies GALILEO applicable to the differential positioning.

The choice of the linear combination depends mainly on the length of the baseline, of the influence of every error on the quality of the results provided by GALILEO and the user's needs.

Key words : GALILEO, differential positioning, troposphere, orbit, ionosphere, noise, multipath, linear combination, ambiguity.

1. Introduction

Le système GPS a été conçu et mis en place pour répondre aux besoins militaires, et s'est ensuite ouvert aux applications civiles, dont l'importance et la diversité ont progressivement pris une ampleur qui n'avait pas été imaginée lors du lancement de ce programme.

A l'inverse, GALILEO est un système civil, dont l'une des motivations a été de compléter le système américain qui a quelques faiblesses; notamment, dans la précision en temps réel, la fiabilité, la continuité et la disponibilité.

GALILEO propose alors plusieurs niveaux de services à accès plus ou moins restreint : un service ouvert et gratuit (OS - Open Service) équivalent à l'actuel SPS du GPS sans SA, un service commercial (CS-Commercial Service), un service public réglementé (PRS - Public Regulated Service) ou service gouvernemental, un service de sauvegarde de la vie (SoL - Safety of Life) et un service de recherche et de sauvetage (SAR - Search And Rescue).

La constellation finale prévue est composée de 30 satellites répartis sur trois plans orbitaux inclinés de 56° sur l'équateur. Chaque satellite est placé en orbite quasi circulaire à une altitude de 23 616 Km, soit une période de révolution de 14 heures 21 minutes. Cette configuration des satellites permettra ainsi une couverture correcte des régions de haute latitude atteignant 75°.

Chaque plan orbital comprend neuf satellites régulièrement répartis dont un est gardé en réserve permettant le remplacement d'un satellite défaillant. Actuellement, 02 satellites sont en service : GIOVE-A et GIOVA-B lancés respectivement les 28/12/2005 et 27/04/2008 [9].

Le thème développé à travers cet article consiste d'une part, à une étude sur les principaux effets sur les mesures GALILEO, notamment le milieu de propagation, les éphémérides des satellites, le bruit des mesures et le multi trajet, et d'autre part, à mettre en œuvre une méthodologie permettant de déterminer la meilleure combinaison linéaire des trois fréquences GALILEO applicable au positionnement différentiel.

L'analyse a montré que le choix de la combinaison linéaire dépend principalement de la longueur de la ligne de base, de l'influence de chaque erreur sur la précision des résultats et des besoins de l'utilisateur.

L'horloge interne de chaque satellite fournit une fréquence fondamentale $f_0=10,23$ MHz. Quatre (04) bandes de fréquences (E2-L1-E1, E6, E5b, et E5a) seront utilisées par les satellites GALILEO pour transmettre dix (10) signaux (tableau 1) [2], [3].

Tableau 1. Bandes de fréquences GALILEO.

| Bandes de fréquences (MHz) | Signaux émis | Fréquence centrale (MHz) | Longueur d'onde (cm) |
|----------------------------|---|--------------------------|----------------------|
| E2-L1-E1 1559-1591 | (E2-L1-E1) _A , (E2-L1-E1) _B , (E2-L1-E1) _C | 1575.420 | 19.03 |
| E6 1260-1300 | E6 _A , E6 _{BI} , E6 _{BQ} | 1278.750 | 23.44 |
| E5b 1188-1215 | E5b _L , E5b _Q | 1207.140 | 24.8 |
| E5a 1164-1215 | E5a _L , E5a _Q | 1176.450 | 25.4 |

2. Positionnement différentiel

Le mode de positionnement différentiel consiste à déterminer la position d'un utilisateur, en temps réel, relativement à un point de référence. Le résultat du traitement est donc un vecteur dont l'origine est le point de référence et l'extrémité la position de l'utilisateur. Soient un récepteur r et un satellite s , les équations d'observations de la mesure du code P (pseudo distance) et de la phase ϕ pour une fréquence f_i du système GALILEO s'écrivent respectivement sous la forme suivante [7] :

$$P_{r,i}^s = \rho_r^s + d\rho_r^s + \delta_{r,i} - \delta^{s,i} + T_r^s + \frac{f_1^2}{f_i^2} I_r^s + \varepsilon_{r,i}^s \quad (1)$$

$$\phi_{r,i}^s = \rho_r^s + d\rho_r^s + \delta_{r,i} - \delta^{s,i} + T_r^s - \frac{f_1^2}{f_i^2} I_r^s + \lambda_i N_{r,i}^s + \varepsilon_{r,i}^s \quad (2)$$

Avec :

- p : distance géométrique entre le récepteur r et le satellite s
- dp : erreur d'orbite
- δ : erreur des horloges récepteur r et satellite s
- i : E2-L1-E1, E6, E5b et E5a
- T : retard troposphérique
- I : retard ionosphérique
- ε : bruit du récepteur et erreur du multi trajet
- λ : longueur d'onde
- N : ambiguïté entière.

2.1 Positionnement différentiel sur la phase

Comme le GPS, les observations GALILEO ne sont pas parfaites et sont affectées par différentes erreurs qui peuvent être éliminées ou réduites par les combinaisons linéaires des observations ou des fréquences.

La double différence sur la phase est la combinaison de mesures destinée aux applications de grande précision (centimétrique ou mieux); car elle exploite les avantages de la simple différence par récepteur. Soient deux récepteurs (inc et ref) et deux satellites (si et sj), l'équation de la double différence s'exprime simplement par :

$$\nabla\Delta\phi = \Delta\phi^{si} - \Delta\phi^{sj} = (\phi_{inc}^{si} - \phi_{ref}^{si}) - (\phi_{inc}^{sj} - \phi_{ref}^{sj}) \quad (3)$$

Les équations (4, 5 et 6) décrivent les équations d'observations simplifiées associées à la double différence de mesure de phases. Elles montrent que les termes dépendant uniquement du récepteur et du satellite sont mathématiquement éliminés par cette combinaison de mesures. Leurs expressions pour les trois fréquences (E2-L1-E1, E5b, E5a) utilisées pour le service ouvert (OS) de GALILEO sont données par :

$$\nabla\Delta\phi_1 = \frac{1}{\lambda_1} (\nabla\Delta\rho + \nabla\Delta d\rho + \nabla\Delta T) - \frac{\nabla\Delta I_1}{\lambda_1} + \nabla\Delta N_1 + \nabla\Delta\epsilon_1 \quad (4)$$

$$\nabla\Delta\phi_2 = \frac{1}{\lambda_2} (\nabla\Delta\rho + \nabla\Delta d\rho + \nabla\Delta T) - \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \frac{\nabla\Delta I_1}{\lambda_1} + \nabla\Delta N_2 + \nabla\Delta\epsilon_2 \quad (5)$$

$$\nabla\Delta\phi_3 = \frac{1}{\lambda_3} (\nabla\Delta\rho + \nabla\Delta d\rho + \nabla\Delta T) - \frac{\lambda_3}{\lambda_1} \frac{\nabla\Delta I_1}{\lambda_1} + \nabla\Delta N_3 + \nabla\Delta\epsilon_3 \quad (6)$$

Telles que ϕ_1 , ϕ_2 et ϕ_3 représentent les phases observées respectivement sur les porteuses E2-L1-E1, E5b et E5a, et λ_1 , λ_2 et λ_3 les longueurs d'ondes associées.

Les principales inconnues de la méthode du positionnement différentiel par mesure de phase sont la position de l'utilisateur et les inconnues d'ambiguïtés entières. Pour tenir compte des termes secondaires intervenant dans l'équation d'observation de la double différence, trois méthodes sont envisageables :

- Considérer ces termes comme des inconnues - supplémentaires du problème.
- Modéliser ces termes.
- Utiliser des combinaisons linéaires de fréquences permettant d'éliminer ou de réduire l'effet de ces erreurs sur la précision de la mesure et sur la résolution d'ambiguïté.

En pratique, la dernière méthode est la plus couramment utilisée dans le positionnement précis. Ce choix est lié aux performances du système qui se dégradent progressivement en fonction de la distance au point de référence ainsi que particulièrement des conditions atmosphériques.

2.2 Forme générale de la combinaison linéaire (LC) de trois fréquences

L'équation 7 représente la forme générale de la combinaison linéaire des trois phases :

$$\nabla\Delta\phi_{LC} = [K_1 \ K_2 \ K_3] \begin{bmatrix} \nabla\Delta\phi_1 \\ \nabla\Delta\phi_2 \\ \nabla\Delta\phi_3 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Avec :

K_1, K_2, K_3 : coefficients représentant des nombres entiers afin d'assurer la conservation du caractère entier des ambiguïtés après combinaison.

ϕ_{LC} : nouvelle mesure de phases.

La fréquence f_{LC} et la longueur d'onde λ_{LC} associées à la mesure de phase ϕ_{LC} sont données par :

$$f = [K_1 \ K_2 \ K_3] \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\lambda_{LC} = \frac{1}{\frac{K_1}{\lambda_1} + \frac{K_2}{\lambda_2} + \frac{K_3}{\lambda_3}} \quad (9)$$

Avec : $\frac{K_1}{\lambda_1} + \frac{K_2}{\lambda_2} + \frac{K_3}{\lambda_3} > 0$

D'après les équations de la double différence (4), (5), (6) et de la combinaison des trois phases (7), la double différence de la combinaison linéaire en cycle peut s'écrire comme suit :

$$\nabla\Delta\phi_{LC} = \frac{1}{\lambda_{LC}} (\nabla\Delta\rho + \nabla\Delta d\rho + \nabla\Delta T) - \nabla\Delta N_{LC} - \left(K_1 + K_2 \frac{\lambda_2}{\lambda_1} + K_3 \frac{\lambda_3}{\lambda_1} \right) \frac{\nabla\Delta I_1}{\lambda_1} + \nabla\Delta\epsilon_{LC} \quad (10)$$

Où :

-Le premier terme représente les erreurs cohérentes avec la fréquence (*troposphère et orbite*).

-Le deuxième terme représente la combinaison linéaire des ambiguïtés qui est formulée par :

$$N_{LC} = K_1 \times N_1 + K_2 \times N_2 + K_3 \times N_3,$$

-Le troisième terme représente les erreurs dépendantes de la fréquence (*ionosphère*).

-Enfin, le dernier terme représente la combinaison des erreurs indépendantes de la fréquence (*bruit du récepteur et multi trajet*).

La réduction de chaque erreur dépend de la longueur de la ligne de base observée

2.3 Principales combinaisons linéaires (LC) des trois fréquences

Les observations de phase triple fréquence peuvent être linéairement combinées afin d'obtenir des porteuses dont les propriétés sont différentes des porteuses originales (E2-L1-E1, E5b et E5a). Les propriétés des nouvelles porteuses sont mises à profits pour le développement des algorithmes de

résolution des ambiguïtés. Les trois fréquences auront l'avantage d'améliorer la fiabilité et la consistance du système, car il devient possible d'avoir plusieurs combinaisons qui peuvent à la fois avoir une grande longueur d'onde et réduire l'effet des erreurs atmosphériques, du bruit de mesure et de trajets multiples [4].

Le tableau 2 représente les meilleures combinaisons triple fréquences du service ouvert avec la longueur d'onde résultante et l'ambiguïté entière :

Tableau 2. Combinaisons triple fréquences du service ouvert du système GALILEO.

| Combinaisons linéaires (LC) | K1 | K2 | K3 | λ_{LC} (m) | N_{LC} |
|-----------------------------|----|----|----|--------------------|-----------|
| E2-L1-E1 | 1 | 0 | 0 | 0.1903 | N_1 |
| E5b | 0 | 1 | 0 | 0.2480 | N_2 |
| E5a | 0 | 0 | 1 | 0.2540 | N_3 |
| EWL | 0 | 1 | -1 | 9.768 | N_2-N_3 |
| WL | 1 | -1 | 0 | 0.814 | N_1-N_2 |
| ML | 1 | 0 | -1 | 0.751 | N_1-N_3 |

La fréquence de EWL (0,1,-1) est de $f_2-f_3=30.69$ MHz, ce qui correspond à une longueur d'onde de 9.768m. L'équation d'observation de cette combinaison est donnée par :

$$\nabla\Delta\phi = \frac{1}{\lambda}(\nabla\Delta\rho + \nabla\Delta d\rho + \nabla\Delta T) + \nabla\Delta N - \left(\frac{\lambda_1}{\lambda} - \frac{\lambda_2}{\lambda_3}\right) \frac{\nabla\Delta I_1}{\lambda_1} \nabla\Delta\varepsilon \quad (11)$$

A partir de E2-L1-E1 et E5b, on peut former la combinaison WL (1,-1,0) telle que :

$$\nabla\Delta\phi = \frac{1}{\lambda}(\nabla\Delta\rho + \nabla\Delta d\rho + \nabla\Delta T) + \nabla\Delta N - \left(1 - \frac{\lambda_2}{\lambda_3}\right) \frac{\nabla\Delta I_1}{\lambda_3} \nabla\Delta\varepsilon \quad (12)$$

La fréquence est alors $f=f_1-f_2=368.28$ MHz, et la longueur d'onde correspondante est 0.814 m.

Et, à partir de E2-L1-E1 et E5a on peut former la combinaison ML de fréquence $f_1-f_3= 398.97$ MHz et une longueur d'onde de 0.751m. L'équation d'observation de la combinaison ML (1, 0, -1) est donnée par :

$$\nabla\Delta\phi = \frac{1}{\lambda}(\nabla\Delta\rho + \nabla\Delta d\rho + \nabla\Delta T) + \nabla\Delta N - \left(1 - \frac{\lambda_2}{\lambda_3}\right) \frac{\nabla\Delta I_1}{\lambda_1} \nabla\Delta\varepsilon \quad (13)$$

3. Choix optimal de la combinaison linéaire des trois fréquences

Le choix de la meilleure combinaison linéaire dépend principalement de la longueur de la ligne de base observée et de l'influence de chaque source d'erreur sur la qualité des résultats.

Pour des raisons d'indisponibilité de données GALILEO, l'étude menée à travers cet article consiste à déterminer la combinaison linéaire optimale dépendant uniquement des principales sources d'erreurs à savoir, les effets dues au milieu de propagation, aux éphémérides des satellites, au bruit de mesure et au multi trajet.

3.1 Effet troposphérique et orbitale

La troposphère est un milieu non dispersif, son effet sur la position est donc le même pour les trois fréquences GALILEO et sur tous les types d'observation (code et phase). Il n'est donc pas possible de le corriger en utilisant deux ou trois fréquences différentes. Cet effet intervient comme une correction T à apporter à la distance par rapport à un trajet dans le vide.

D'après l'équation [10], on peut écrire cette erreur (en cycle) comme suit :

$$\nabla\Delta G_{LC} = \frac{1}{\lambda_{LC}} \cdot \nabla\Delta\rho + \nabla\Delta d\rho + \nabla\Delta T, \quad (14)$$

$$= \beta_G \frac{\nabla\Delta\rho + \nabla\Delta d\rho + \nabla\Delta T}{\lambda_1}$$

Tel que : $\beta_G = (\lambda_1 / \lambda_{LC})$, indique l'influence des erreurs géométriques par rapport à E2-L1-E1; Ce qui signifie que si la longueur d'onde λ_{LC} est supérieure à λ_1 alors l'influence des erreurs géométriques (en cycle) par rapport à E2-L1-E1 est diminuée. Par contre, cette erreur exprimée en mètre est constante et égale à 1.

Le tableau 3 fournit l'erreur troposphérique et orbitale pour chaque combinaison linéaire.

Tableau 3. Erreurs dues à la troposphère et à l'orbitale (combinaisons linéaires triple fréquence)

| Combinaisons linéaires (LC) | L'erreur troposphérique et orbitale (en cycle) |
|-----------------------------|--|
| E2-L1-E1 | 1 |
| E5b | 0.76 |
| E5a | 0.74 |
| EWL | 0.019 |
| WL | 0.234 |
| ML | 0.253 |

Le tableau 3 montre que l'influence des effets troposphérique et orbital (0.019) est relativement minime pour la combinaison EWL qui est caractérisée par une grande longueur d'onde (9.768 m).

Dans le cas où $\frac{K_1}{\lambda_1} + \frac{K_2}{\lambda_2} + \frac{K_3}{\lambda_3} = 0$, cette

combinaison aura une longueur d'onde infinie, et donc l'effet des erreurs géométriques en cycle sera nul. Cette combinaison, notée GF, est appelée "libre géométrie (geometry-free)".

Puisque nous disposons de trois fréquences, nous pouvons donc avoir trois combinaisons libre-géométrie (alors qu'avec deux fréquences on en a seulement une). Le tableau 4 fournit les trois combinaisons libres géométries :

Tableau 4. Combinaisons libres géométries.

| Combinaisons linéaires (LC) | K ₁ | K ₂ | K ₃ |
|-----------------------------|----------------|----------------|----------------|
| GF ₁₂ | 118 | -154 | 0 |
| GF ₁₃ | 115 | 0 | -154 |
| GF ₂₃ | 0 | 115 | -118 |

Ces combinaisons augmentent l'erreur de l'ionosphère, le bruit et les trajets multiples car elles sont caractérisées par une longueur d'onde infinie. Les combinaisons libres géométries sont indépendante de la géométrie (orbites et les coordonnées de station). Elles contiennent le retard ionosphérique, les effets des trajets multiples et l'ambiguïté de phase (non entière). Cette combinaison n'a pas d'usage dans la pratique, parce qu'elle est caractérisée par une longueur d'onde indéterminée.

3.2 Effet ionosphérique

L'ionosphère est un milieu dispersif; c'est-à-dire que l'indice de réfraction dépend de la longueur d'onde. Une conséquence importante de la dispersion du milieu ionosphérique est que, sur les trois fréquences, les mesures de phase ne sont pas affectées de la même manière (même pour une fréquence les mesure de phase et de pseudo distances ne sont pas affectées de la même manière). Pour des distances plus ou moins grandes, l'effet de l'ionosphère peut considérablement dégrader la qualité de la mesure ce qui présente donc un obstacle pour le processus de fixation des ambiguïtés. L'erreur ionosphérique de la combinaison linéaire de la double différence exprimée en mètre s'écrit :

$$\nabla\Delta I_{LC} = \alpha_I \nabla\Delta I_1 \quad (15)$$

Avec :

$$\alpha_I = \left(K_1 + K_2 \frac{\lambda_2}{\lambda_1^2} + K_3 \frac{\lambda_3}{\lambda_1^2} \right) \lambda_{LC} \quad (16)$$

Et, celle exprimée en cycle a la forme suivante :

$$\nabla\Delta I_{LC} = \beta_I \frac{\Delta\nabla I_1}{\lambda_1} \quad (17)$$

$$\beta_I = K_1 + K_2 \frac{\lambda_2}{\lambda_1} + K_3 \frac{\lambda_3}{\lambda_1} \quad (18)$$

Le tableau 5 fournit l'erreur ionosphérique commise par chaque combinaison linéaire triple fréquence :

Tableau 5. Erreurs ionosphériques pour les combinaisons linéaires triple fréquence.

| Combinaisons Linéaires (LC) | L'erreur ionosphérique | |
|-----------------------------|---------------------------------------|-----------------------------|
| | En cycle β_I | En mètre α_I |
| E2-L1-E1 | $\nabla\Delta I_1 / \lambda_1$ | $\nabla\Delta I_1$ |
| E5b | $1.30(\nabla\Delta I_1 / \lambda_1)$ | $(1.30)^2 \nabla\Delta I_1$ |
| E5a | $1.33(\nabla\Delta I_1 / \lambda_1)$ | $(1.33)^2 \nabla\Delta I_1$ |
| EWL | $-0.03(\nabla\Delta I_1 / \lambda_1)$ | $-1.74 \nabla\Delta I_1$ |
| WL | $-0.29(\nabla\Delta I_1 / \lambda_1)$ | $-1.30 \nabla\Delta I_1$ |
| ML | $-0.33(\nabla\Delta I_1 / \lambda_1)$ | $-1.33 \nabla\Delta I_1$ |

Il est plus intéressant d'éliminer l'erreur ionosphérique en combinant E2-L1-E1 et E5a (rapport: $\lambda_1 / \lambda_3 = 0.74$) au lieu de combiner E2-L1-E1 et E5b (rapport: $\lambda_1 / \lambda_2 = 0.76$). Néanmoins, pour les grandes lignes de base et la résolution des ambiguïtés, il est préférable d'utiliser la combinaison E5b et E5a qui a une grande longueur d'onde et un rapport ($\lambda_2 / \lambda_3 = 0.97$) plus grand.

3.3 Effet du bruit de mesure et multi trajet

L'erreur du multi trajet se produit quand le signal arrive au récepteur après plus d'un trajet à cause de réflexions près du récepteur. Le multi trajet, erreur difficile à corriger, ne dépend pas de la distance entre les sites d'observation mais bien de l'environnement des sites d'observation et du type d'antenne. Le bruit de mesure est tout bruit généré par le récepteur lui-même lors de la réception des mesures de code ou de phase.

Le bruit de mesure sur la phase est égale à % de la longueur d'onde : $\sigma_\varphi = \alpha\% \lambda_i$. Donc, pour la double différence ce bruit est amplifié et devient : $\sigma_\varphi = 2\alpha\% \lambda_i$ [8]

Si l'erreur causée par le bruit et le multi trajet sur E2-L1-E1 est le même que sur E5a et E5b, l'erreur sur la combinaison linéaire des trois fréquences de la double différence sera formulée comme suit :

$$\nabla\Delta \sigma_{LC} = \frac{1}{\lambda_1} \sqrt{K_1^2 + K_2^2 + K_3^2} \sigma \text{ (cycle)} \quad (19)$$

$$\nabla\Delta \sigma_{LC} = \frac{\lambda_{LC}}{\lambda_1} \sqrt{K_1^2 + K_2^2 + K_3^2} \sigma \text{ (mètre)} \quad (20)$$

Nous remarquons que toutes les combinaisons exprimées en cycle (équation 19) provoquent une amplification du bruit de mesure et des trajets multiples. Par contre, les combinaisons formulées en unité de mètre (équation 20), seules les longueurs d'ondes de la combinaison linéaire supérieures à celle de E2-L1-E1 qui intensifient ces erreurs.

Tableau 7. Erreurs (bruit + trajets multiples).

| Combinaisons linéaires (LC) | Erreur (bruit + multi trajet) | |
|-----------------------------|-------------------------------|-----------------|
| | En cycle | En mètre |
| E2-L1-E1 | σ | 0.1903σ |
| E5b | σ | 0.2480σ |
| E5a | σ | 0.2540σ |
| EWL | 1.41σ | 13.7728σ |
| WL | 1.41σ | 1.1477σ |
| ML | 1.41σ | 1.0589σ |

Le tableau 7 montre que l'effet du bruit de mesure et du multi trajet sur les combinaisons (EWL, WL, ML) est plus important que celui sur les combinaisons (E2-L1-E1, E5a, E5b). Par conséquent, l'erreur sur la position déterminée sera plus élevée.

Il existe d'autres combinaisons linéaires permettant la réduction de l'influence du bruit et du multi trajet mais elles sont généralement caractérisées par une courte longueur d'onde, ce qui rend difficile la résolution d'ambiguïté.

4. Conclusion

GALILEO est un système de positionnement adapté aux différents types d'utilisateurs (grand public, commercial, service public, recherche et sauvetage, etc.). L'utilisation des trois fréquences (E2-L1-E1, E5a et E5b) triple le nombre de mesures, permettant ainsi une meilleure résolution des ambiguïtés et une amélioration des corrections troposphériques. De plus, la durée de la session d'observations nécessaire pour l'obtention d'un positionnement précis, serait automatiquement écourtée. D'autre part, la constellation prévue est composée d'un grand nombre de satellites qui émettent sur plusieurs fréquences, ce qui permettra une amélioration des produits en temps réel.

Le choix de la combinaison linéaire dépend principalement de la longueur de la ligne de base, de l'influence de chaque erreur sur la précision de cette ligne de base et des besoins de l'utilisateur. Pour les grandes lignes de base, l'ionosphère et la troposphère pourront être les principales sources d'erreurs; Dans ce cas, la meilleure combinaison est celle qui permet de minimiser ces erreurs en unité de cycle pour permettre la résolution des ambiguïtés. Concernant les courtes lignes de base, l'effet dû au milieu de propagation (ionosphère et troposphère) est quasiment éliminé par la double différence. En revanche, l'effet des autres sources d'erreurs,

notamment le bruit des mesures et les trajets multiples, restera important. Par conséquent, la combinaison idéale sera celle qui permet de réduire l'influence de ces erreurs.

En conclusion, plus la longueur d'onde associée à la combinaison linéaire est élevée, plus la résolution des ambiguïtés est aisée. A l'inverse, plus la longueur d'onde est faible, plus la précision sur la mesure est meilleure.

Références Bibliographiques

- DURAND S., 2003 : "Amélioration de la précision" de la localisation différentielle temps réel par mesure de phase des systèmes GNSS: étude détaillée des équations d'observation et du problème de résolution des ambiguïtés entières". Thèse de Docteur de l'Observatoire de Paris.
- EUROPEAN COMMISSION, 2002 : "GALILEO High Level Mission Definition". Document, Ver.3.0, 23.02.2002.
- EUROPEAN COMMISSION, 2003: "The Galileo project : GALILEO Design Consolidation".
- HAN S., RIZOS C., 1999: "The Impact of Two Additional Civilian GPS Frequencies on Ambiguity Resolution Strategies". School of Geomatic Engineering - University of New South Wales Sydney, NSW 2052, Australia.
- PHALKE S., 2006 : "GPS and Galileo Performance Evaluations for Multiple Reference Station Network Positioning". Ph.D. thesis, Geomatics Engineering, University of Calgary.
- RICHERT T., 2005 : "The Impact of Future Global Navigation Satellite Systems on Precise Carrier Phase Positioning". Ph.D. Thesis, Geomatics Engineering, University of Calgary.
- TIBERIUS C., PANY T., EISSFELLER B., JONG K., JOOSTEN P., VERHAGEN S., 2002: "Integral GPS-Galileo ambiguity resolution. Institute of Geodesy and Navigation". University Federal Armed Forces Munich Germany.
- ZHANG W., 2005 : "Triple Frequency Cascading Ambiguity Resolution for Modernized GPS and GALILEO." Master thesis, UCGE Report 20228, Geomatics Engineering, University of Calgary.
- Site Web de l'AGENCE SPATIALE EUROPEENNE (ESA) : www.esa.int