



HAL
open science

Les effets de la scintillation ionosphérique sur le GPS

Patrick Lassudrie Duchesne, Yannick Béniguel, Alain Bourdillon, Rolland Fleury, Jean-Jacques Valette, Minh Le Huy, Lan Tran Thi

► **To cite this version:**

Patrick Lassudrie Duchesne, Yannick Béniguel, Alain Bourdillon, Rolland Fleury, Jean-Jacques Valette, et al.. Les effets de la scintillation ionosphérique sur le GPS. *Navigation*, 2010, 58 (231), pp.17 - 34. hal-02360027

HAL Id: hal-02360027

<https://hal.science/hal-02360027>

Submitted on 12 Nov 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Les effets de la scintillation ionosphérique sur le GPS

Patrick LASSUDRIE-DUCHESNE¹,
Yannick BENIGUEL², Alain BOURDILLON³,
Rolland FLEURY¹, Jean-Jacques VALETTE⁴,
LE HUY Minh⁵, TRAN THI Lan⁵

¹ Telecom Bretagne, Lab-STIC, Brest

² IEEA, Courbevoie

³ IETR, Université de Rennes I, Rennes

⁴ CLS, Toulouse

⁵ Institut Géophysique de Hanoi, Vietnam

Résumé

Les signaux radioélectriques se propageant sur un trajet Terre-satellite sont parfois perturbés par la scintillation ionosphérique. Ce phénomène se traduit par l'apparition de fluctuations rapides du signal reçu qui sont susceptibles d'affecter les performances du système. C'est en particulier le cas du GPS pour lequel les scintillations sont un sujet de préoccupation pour certaines applications exigeantes en termes de précision, de disponibilité et de fiabilité. Dans le présent article, on rapporte les résultats d'une campagne de mesures de la scintillation en régions équatoriales. Cette campagne, menée dans le cadre de coopérations internationales, a permis de valider des outils spécifiques de surveillance et de prévision de la scintillation.

Abstract

Radio wave signals propagating on an Earth-space path are at times disturbed by ionospheric scintillation. This phenomenon causes the received signal to encounter fast fluctuations that are liable to affect system performance. For GPS in particular, scintillation is a matter of concern for applications that are demanding in terms of accuracy, availability and reliability. In this paper, we report on the results of a scintillation measurement campaign in equatorial regions. This measurement campaign was conducted in a context of international cooperation and has permitted to validate specific tools for monitoring and predicting scintillation.

■ Introduction

La scintillation des étoiles fixes est un phénomène bien connu : en observant le ciel par temps clair lors d'une nuit d'été, on constate fréquemment que l'éclat des étoiles semble fluctuer en permanence. Ce phénomène s'explique par la présence de turbulences d'origine thermique dans la basse atmosphère qui provoquent des irrégularités de l'indice de réfraction le long du trajet suivi par la lumière. Ces irrégularités d'indice produisent une légère courbure

des rayons lumineux émis par une étoile. L'observateur reçoit ainsi un ensemble de rayons qui ont été chacun légèrement déviés de la ligne droite et qui sont donc affectés de déphasages différents. Le signal reçu, qui résulte de la recombinaison en phase de ces rayons, présente alors une amplitude différente de celle du trajet direct. Les irrégularités produites par la turbulence étant en perpétuel mouvement, l'intensité du signal reçu fluctue dans le temps, d'où l'impression de scintillement.

Avec les progrès de la radioastronomie, on s'est vite aperçu, dans les années 1950, que le phénomène de scintillation n'était pas limité aux ondes lumineuses mais pouvait également affecter le domaine des radiofréquences. Dans ce dernier cas cependant, en raison des plus grandes longueurs d'ondes observées, la turbulence atmosphérique d'origine thermique n'est plus suffisante pour produire des déphasages sensibles entre les rayons. Il faut alors chercher l'origine de la scintillation dans des irrégularités présentes dans une région de la haute atmosphère nommée « ionosphère » en raison de la présence de particules ionisées à ces altitudes.

Par la suite, ce type de scintillation, dite « scintillation ionosphérique » a été régulièrement observée et étudiée à l'aide de liaisons Terre-satellites. L'influence des scintillations ionosphériques sur l'utilisation du GPS pour des applications exigeantes en termes de précision, de disponibilité et de fiabilité fait actuellement l'objet d'études, en particulier dans le domaine aéronautique [1], [2], [3], [4]. Nous allons examiner plus en détail l'origine de ce phénomène et ses conséquences sur les systèmes de positionnement par satellites de la famille GNSS (Global Navigation Satellite System).

■ Le phénomène de scintillation ionosphérique

Observations

La scintillation ionosphérique se manifeste sous forme d'évènements plus ou moins localisés, d'une durée typique de quelques heures et affectant les liaisons Terre-satellites. Durant un évènement de scintillation, le signal reçu présente des fluctuations d'amplitude et de phase susceptibles de perturber fortement la liaison et de compromettre son exploitation. Le spectre en fréquence de ces fluctuations se trouve essentiellement dans la gamme de 1 Hz à 10 Hz. La figure 1 montre un exemple d'évènement de scintillation observé en zone aurorale sur une liaison GPS. Dans cet exemple, les scintillations, qui débutent un peu avant 21 h TU, durent environ une heure.

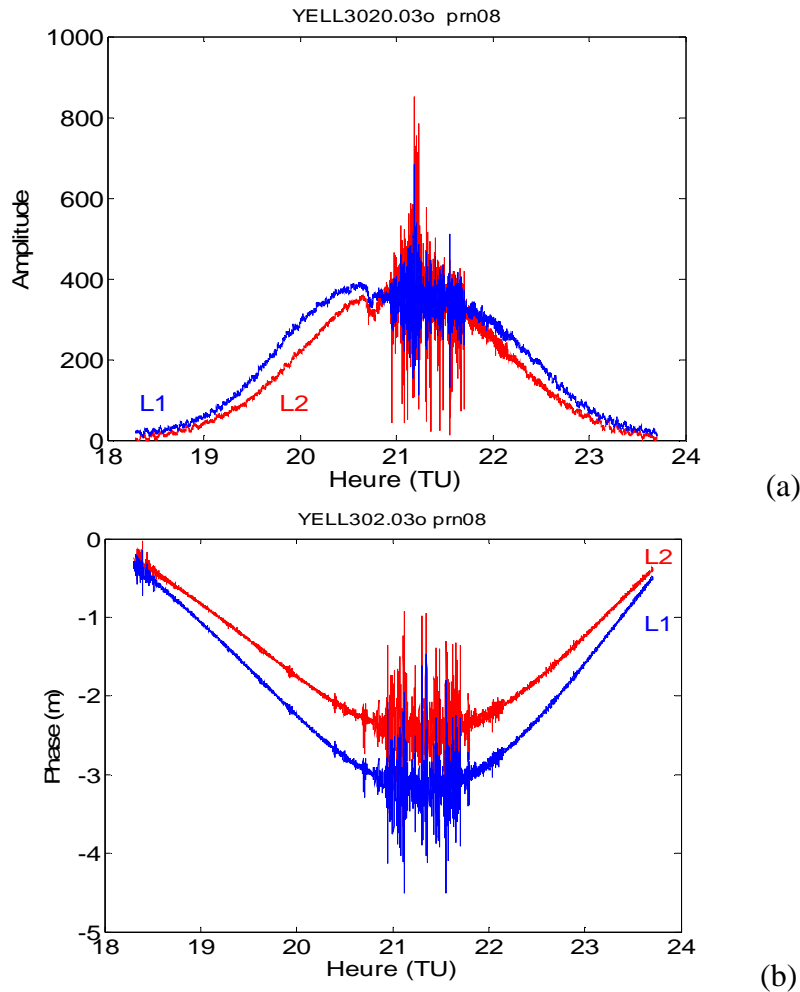


Figure 1 – Signaux reçus par un récepteur GPS à Yellowknife (Canada) en provenance du satellite GPS n°08, lors d'un évènement de scintillation le 29 octobre 2003 : (a) amplitude du signal reçu (échelle arbitraire), (b) variations de la phase (chemin de phase mesuré en mètres après élimination du Doppler géométrique) aux fréquences GPS L1 (1575,42 MHz) et L2 (1227,6 MHz).

Des analyses statistiques menées en différents lieux et pour différentes époques, ont montré que l'intensité des évènements de scintillation varie, entre autre, avec la fréquence d'émission, la localisation géographique, l'heure locale et l'activité solaire [5]. La figure 2 schématise cette dépendance pour des émissions en bande L (fréquences GNSS). D'une manière générale, l'intensité et la probabilité d'occurrence des scintillations sont plus fortes en période de maximum de l'activité solaire, laquelle suit un cycle d'environ 11 ans (figure 3).

On distingue deux régions du globe où la scintillation ionosphérique apparaît de façon privilégiée : les zones aurorales et polaires d'une part et les zones intertropicales d'autre part. Pour ces dernières, les évènements de scintillation se produisent essentiellement la nuit, entre 19 h et 23 h locales. En période de forte activité solaire, la profondeur des évanouissements en bande L peut parfois dépasser 20 dB. Associées à de fortes variations de phase, ces fluctuations d'amplitude sont de nature à perturber sérieusement le fonctionnement des récepteurs GNSS.

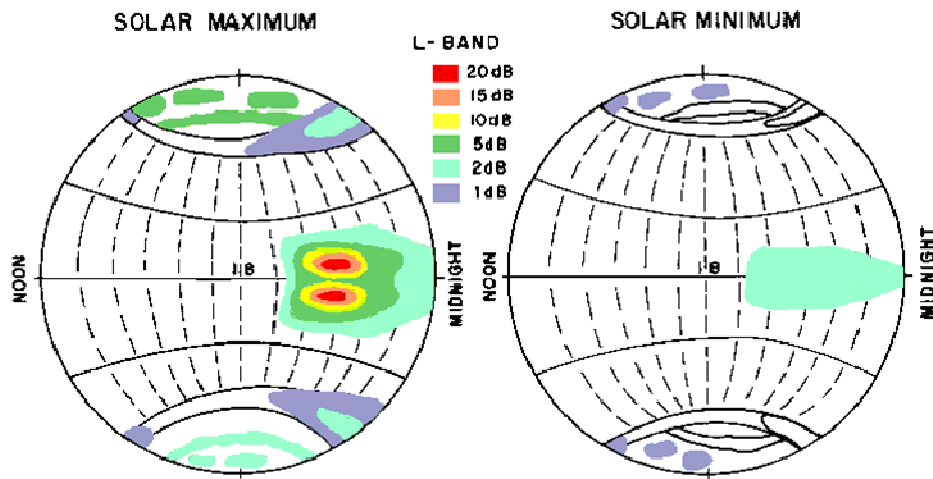


Figure 2 – Profondeur d'évanouissement en bande L dû à la scintillation ionosphérique en période de forte et de faible activité solaire [6].

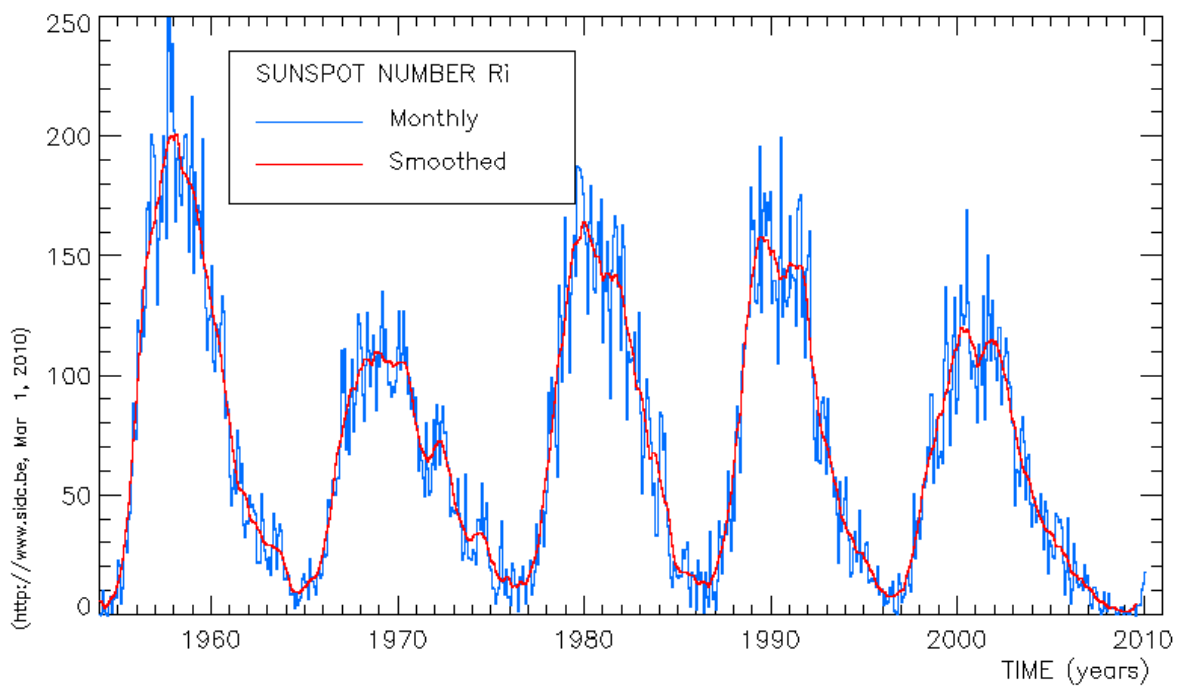


Figure 3 – Valeur de l'indice solaire depuis 1950 montrant les cinq derniers cycles d'activité solaire [7].

Paramètres caractéristiques

Comme nous venons de le voir, la scintillation ionosphérique se manifeste par la présence de fluctuations rapides de l'amplitude et de la phase des signaux reçus sur une liaison Terre-

satellite. Deux indices ont été définis pour caractériser ces fluctuations : L'indice S_4 , relatif aux fluctuations d'amplitude et l'indice σ_ϕ , relatif aux fluctuations de phase.

L'indice S_4 est défini comme l'écart type normalisé des fluctuations de l'intensité I du signal reçu :

$$S_4 = \frac{\sqrt{I^2 - \bar{I}^2}}{\bar{I}},$$

où \bar{I} représente la moyenne temporelle de I . L'indice σ_ϕ représente l'écart type de la phase ϕ du signal :

$$\sigma_\phi = \sqrt{\phi^2 - \bar{\phi}^2}$$

Ces indices sont des variables statistiques, généralement calculés sur des durées de l'ordre de quelques dizaines de secondes, après élimination des variations lentes du signal dues, en particulier, au déplacement du satellite.

Origines du phénomène

Comme évoqué précédemment, l'origine du phénomène de scintillation est à rechercher dans l'ionosphère, région de l'atmosphère terrestre située à des altitudes comprises entre environ 80 km et plus de 1 000 km. Dans cette partie de l'atmosphère, le rayonnement solaire dans les gammes UV et X provoque une ionisation partielle des atomes et molécules de gaz : On se trouve donc en présence de particules chargées - ions et électrons libres - qui sont susceptibles d'interagir avec une onde électromagnétique incidente et d'influer sur sa propagation. Du point de vue de la propagation des ondes radioélectriques, un tel milieu, encore appelé « plasma », se comporte approximativement comme un diélectrique dont l'indice de réfraction dépend de la densité d'ionisation, c'est-à-dire, du nombre de particules ionisées présentes par unité de volume.

Si, comme nous le verrons dans la suite, des inhomogénéités sont susceptibles d'apparaître dans la densité d'ionisation du milieu, il en résultera des variations spatiales de son indice de réfraction. Une onde traversant l'ionosphère sera alors diffractée par ces irrégularités d'indice. On observera au sol non plus le rayon direct venant du satellite, mais la figure de diffraction résultant de la recombinaison des différents rayons apparus dans la zone d'irrégularités. Cette figure de diffraction comporte par endroits un renforcement de l'intensité du signal et, à d'autres endroits, un affaiblissement de celui-ci (Figure 4). On peut se représenter intuitivement ce phénomène en observant une source de lumière à-travers un vitrage réalisé en verre cathédrale grossier : l'image de la source apparaît alors déformée et de nombreuses répliques sont également observables autour de l'image principale.

Pour expliquer les variations temporelles du signal reçu, il faut prendre en compte l'existence de vents atmosphériques qui provoquent une dérive des irrégularités d'ionisation à des vitesses de l'ordre de 100 à 200 m/s. Les figures de diffraction produites par ces irrégularités balayent alors la zone de réception, produisant en un lieu donné des fluctuations du signal observé au cours du temps. En outre, dans le cas de signaux GNSS, émis par des satellites défilants, les rayons électromagnétiques joignant l'émetteur au récepteur se déplacent au sein de la zone d'irrégularités du fait du mouvement du satellite, ce qui renforce en général le phénomène de scintillation.

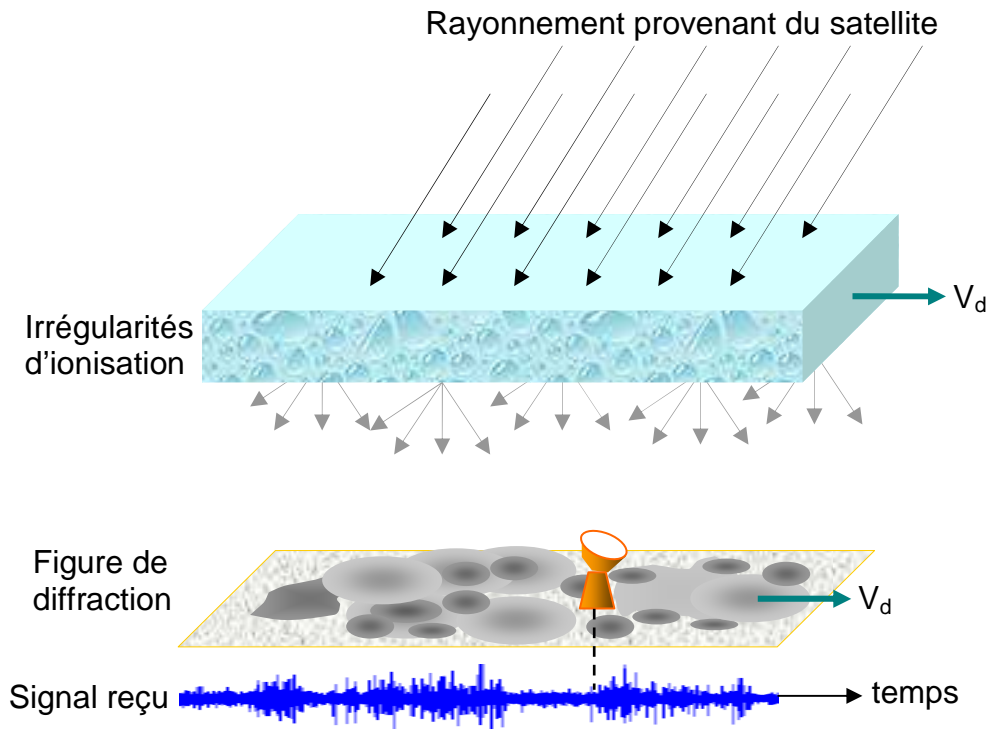
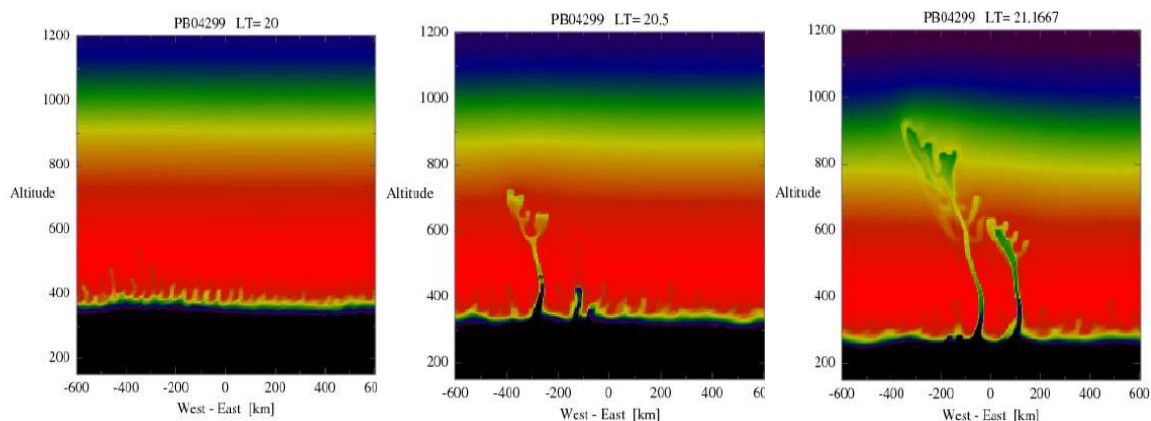
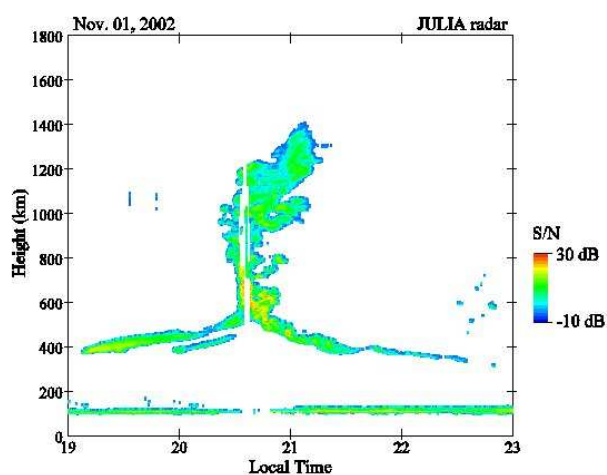


Figure 4. Mécanisme de diffraction des ondes en provenance d'un satellite par des irrégularités d'ionisation de l'ionosphère. V_d représente la vitesse de dérive des irrégularités (et de la figure de diffraction des ondes) par rapport au récepteur.

La compréhension des phénomènes physiques qui commandent l'apparition et le développement d'irrégularités dans l'ionosphère fait encore l'objet de recherche. Dans le cas de l'ionosphère équatoriale, il est cependant largement admis que le mécanisme d'instabilité de Rayleigh-Taylor constitue la cause première des irrégularités d'ionisation qui se développent après le coucher du soleil. Dans sa forme la plus courante, ce phénomène correspond à la situation rencontrée lorsque deux liquides non-miscibles se trouvent en contact, le liquide le plus dense surplombant le liquide le moins dense. L'équilibre entre les deux liquides est instable et la moindre perturbation occasionnera la remontée du liquide le moins dense à la surface. Il se développera alors, à l'interface des deux liquides, des « bulles » qui entraîneront le liquide le moins dense vers le haut. Dans le plasma ionosphérique de telles « bulles », de faible densité d'ionisation, apparaissent fréquemment, après le coucher du soleil, dans la partie inférieure de l'ionosphère (entre typiquement 200 et 400 km d'altitude) puis remontent à des altitudes supérieures en prenant la forme d'aigrettes (Figure 5).



(a)



(b)



(c)

Figure 5. Développement de bulles dans l'ionosphère équatoriale : (a) simulation numérique (code de couleur correspondant à la densité d'ionisation croissante avec l'altitude) [8], (b) Bulle observée à partir du radar à diffusion incohérente de Jicamarca au Pérou [9], (c) observation au Brésil depuis le sol à l'aide d'une caméra plein ciel fonctionnant dans la raie rouge d'émission de l'oxygène OI 630 nm (d'après [10]).

■ Une campagne d'observation de la scintillation ionosphérique en régions équatoriales

A partir de 2005, divers organismes, publics et privés, ont développé des collaborations internationales pour installer et exploiter des récepteurs GPS adaptés à la caractérisation des scintillations ionosphériques (« moniteurs de scintillations »). Ces initiatives ont été fédérées dans le cadre de groupements scientifiques, tel le GIRGEAA (Groupe International de Recherche en Géophysique Europe-Afrique-Asie), et on fait ensuite l'objet d'extensions,

entre 2006 et 2008, dans le cadre du projet européen PRIS (Prediction of Ionospheric Scintillations) piloté par l'ESA (European Space Agency).

La figure 6 représente la carte des sites équipés de moniteurs de scintillations exploités pendant la campagne PRIS. Les moniteurs étaient en majorité situés en zone intertropicale. Cette campagne d'expérimentation, dont nous allons détailler quelques résultats, a permis d'observer et d'analyser les principales caractéristiques des scintillations équatoriales et de valider des outils d'observation et de simulation adaptés à la prise en compte de ce problème dans les applications pratiques. On notera toutefois que les années d'expérimentation, de 2006 à 2008 correspondent à une période de faible activité solaire (cf. figure 3), peu propice à l'observation de scintillations intenses. Les moyens mis en place au cours de cette campagne prendront donc tout leur intérêt lors du prochain maximum d'activité solaire, prévu vers 2012-2013.

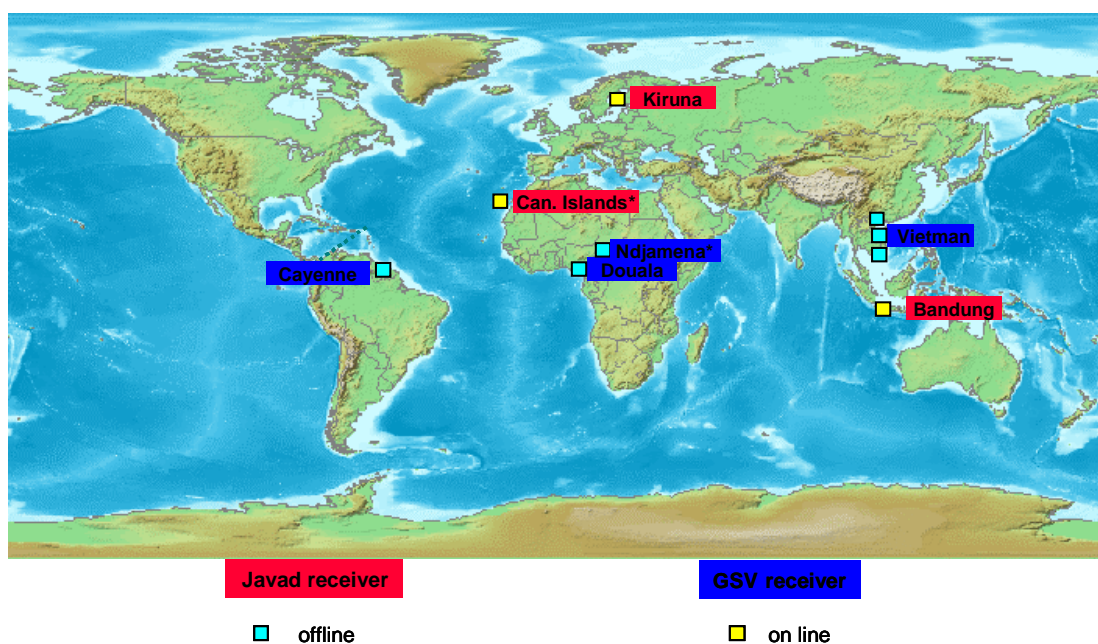


Figure 6. Implantation des moniteurs de scintillations exploités pendant la campagne européenne PRIS (en bleu, les moniteurs proposés par les équipes françaises dans le cadre d'accords bilatéraux avec des institutions des pays d'accueil) [13].

Répartition géographique des scintillations observées

Lors d'un évènement de scintillation, on conçoit que l'extension géographique de la zone de l'ionosphère affectée d'irrégularités revêt une importance décisive pour des applications telles que le positionnement GPS. C'est particulièrement le cas des applications DGPS où un récepteur sert de référence à des récepteurs environnants.

A titre d'exemple, la figure 7 montre l'origine des scintillations observées à la station de Bandung lors d'un évènement de scintillations. Les points de couleur sur la carte indiquent la position géographique de la zone où les signaux en provenance des satellites GPS traversent l'ionosphère. Le code de couleurs indique l'intensité de la scintillation affectant ces signaux. On constate que les signaux affectés de scintillations proviennent majoritairement d'une région limitée de l'ionosphère située, dans le cas présent, au Nord de la station. Cette région correspond à la zone où se sont le plus souvent développées des irrégularités d'ionisation.

D'un point de vue opérationnel, la figure 7 montre également que lors d'évènements d'intensité modérée, comme ceux présentés, seuls les signaux en provenance d'un nombre limité de satellites GPS sont affectés à un instant donné par la scintillation. Si l'on se souvient qu'il suffit en principe de quatre satellites pour assurer un positionnement, cette constatation peut sembler plutôt rassurante quant à la sensibilité du GNSS aux scintillations. Cette remarque est d'ailleurs corroborée par d'autres observations [4]. Cependant, cette conclusion repose seulement sur un nombre limité d'observations effectuées en période de faible activité solaire, pendant laquelle les scintillations sont peu intenses. Nous allons voir que même dans cette situation plutôt favorable, la précision de localisation peut être sérieusement dégradée par la présence de scintillations.

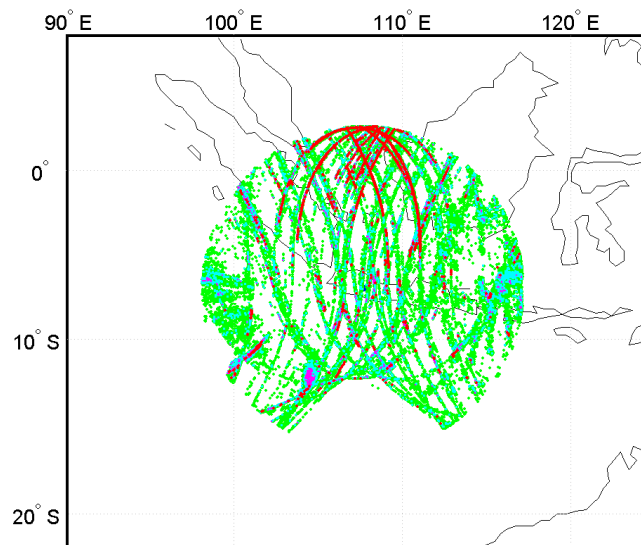


Figure 7. Origine géographique des scintillations observées à la station de Bandung lors d'évènements de scintillations équatoriales. Le code de couleur correspond aux intensités des scintillations observées, des plus faibles (en vert), au plus fortes (en rouge).

Dégradation de la position estimée

Lors d'un évènement de scintillation, plusieurs effets sont susceptibles de dégrader la position estimée par le récepteur. Outre, la diminution du nombre de satellites utilisables à un instant donné, les évanouissements des signaux produisent une dégradation du rapport signal/bruit à la réception pouvant conduire à des sauts de phase du récepteur et à la dégradation des performances de positionnement. Afin d'évaluer ces éventuelles dégradations, on a enregistré la position estimée par le récepteur GPS de Cayenne. On notera qu'il s'agit d'un récepteur bi-fréquence capable de corriger les biais ionosphériques normaux, dus aux retards de propagation [11].

La figure 8 montre un exemple d'analyse de ces enregistrements. Dans cet exemple, on a comparé les résultats obtenus un jour calme avec ceux obtenus un jour perturbé par la présence de scintillations. La position estimée du récepteur lors de la journée perturbée fait apparaître des erreurs pouvant dépasser 10 m sur l'estimation de l'altitude. Ces résultats montrent que la présence éventuelle de scintillations doit être prise en compte dans les

spécifications et les règles d'exploitation d'applications exigeantes en termes de précision en positionnement dynamique. Précisons que les applications de positionnement les plus sensibles à ces effets sont celles basées sur le temps réel, à cause des risques d'interruption partielle ou totale des signaux ou qui requièrent une grande précision avec des performances typiquement inférieures au mètre.

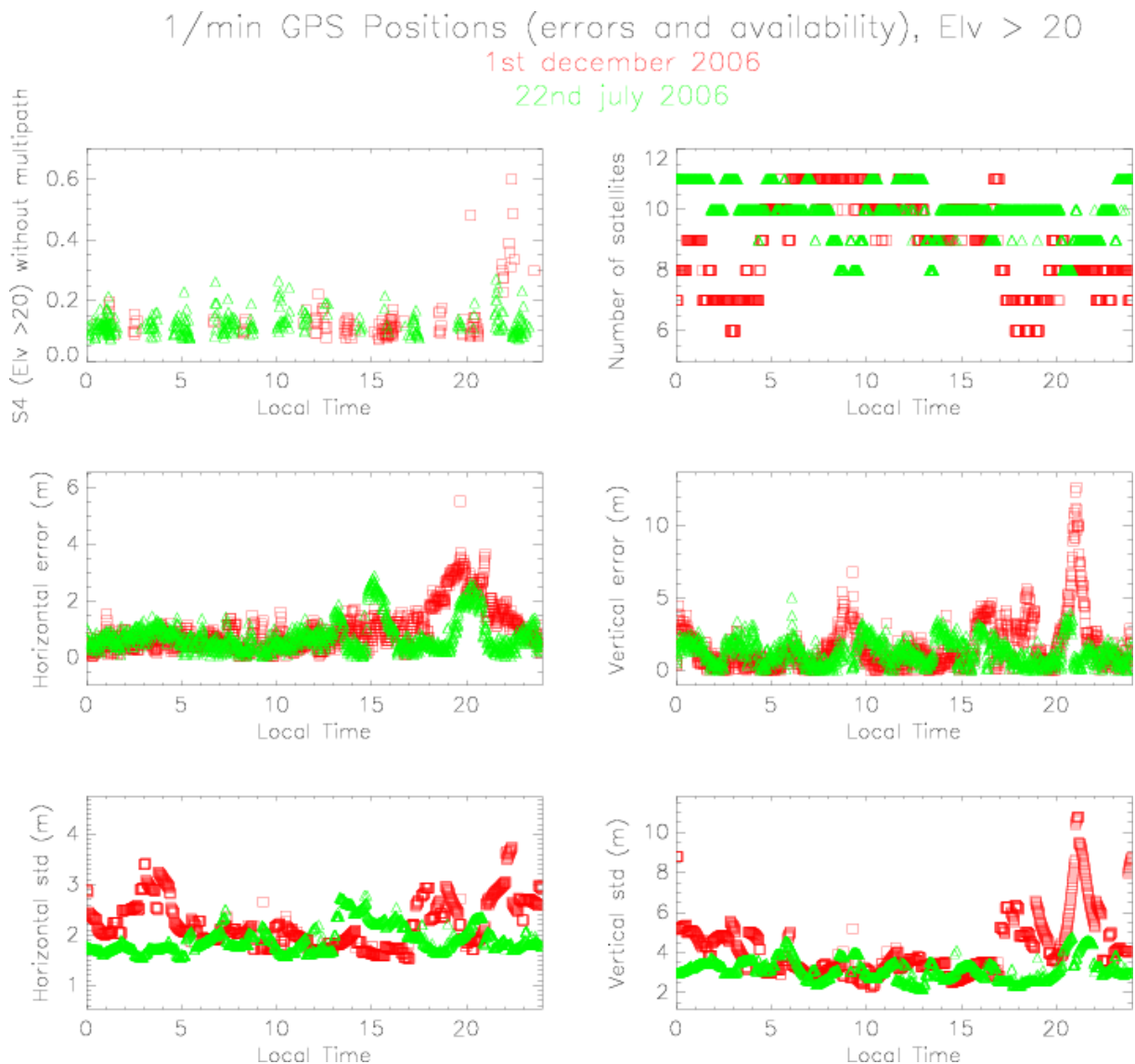


Figure 8. Erreurs de positionnement de la station de Cayenne lors d'un jour calme (en vert) et lors d'un évènement de scintillations (en rouge).

Dépendance de l'occurrence des scintillations équatoriales avec l'heure locale

Comme le montre la figure 2, les évènements de scintillations équatoriales se produisent essentiellement la nuit après 19 h TL (Temps Local). Les enregistrements effectués dans les diverses stations permettent de mieux préciser ces indications. Un exemple de statistique d'occurrence est représenté figure 9 pour la station de Cayenne sur une durée d'un an. On

constate effectivement l'apparition des scintillations après 19 h TL et la présence d'un pic d'occurrence entre 20 h et 22 h TL.

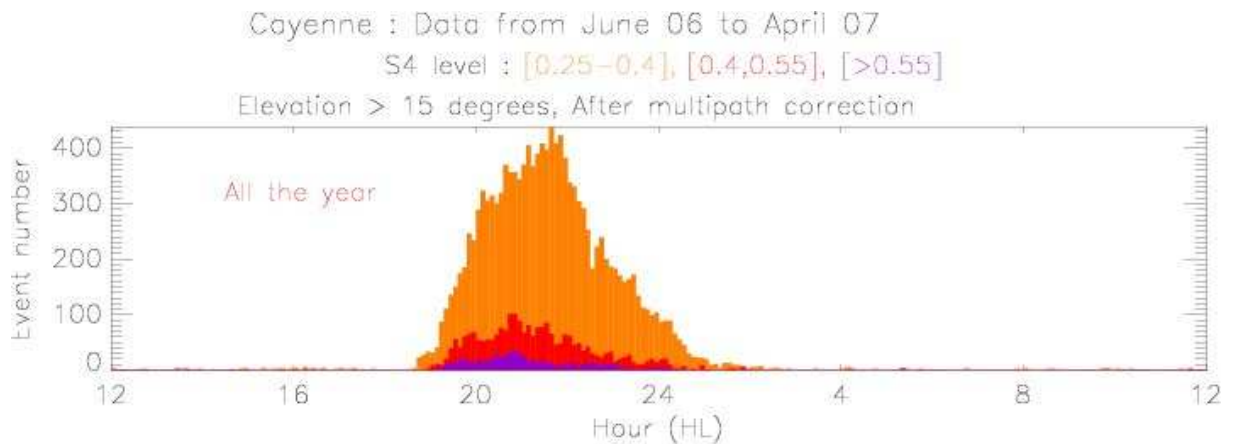


Figure 9. Histogramme des événements de scintillation à Cayenne pour la période de juin 2006 à juillet 2007. L'intensité des scintillations est évaluée à l'aide de l'indice S4 selon le code de couleurs : Scintillations fortes (mauve), moyennes (en rouge), faibles (ocre) [13].

Dépendance de l'occurrence des scintillations équatoriales avec la saison

La statistique d'occurrence des scintillations à Cayenne peut être affinée en représentant la répartition des événements de scintillation d'intensité moyenne ou forte (correspondant à $S4 > 0,3$) en fonction de la saison et de l'heure locale (Figure 10-a). On remarque alors que la plupart des événements se produisent d'octobre à janvier avec un pic d'occurrence vers le mois de novembre entre 19 h et 22 h TL.

Les mesures effectuées au Vietnam confirment en partie ces résultats. La figure 10-b, relative à la station de Hanoi, montre que les scintillations d'indice $S4 > 0,3$ sont en nombre sensiblement plus faibles qu'à Cayenne. Elles se produisent également entre 19 h et 22 h TL mais présentent, à la différence de Cayenne, deux pics d'occurrence en avril et octobre.

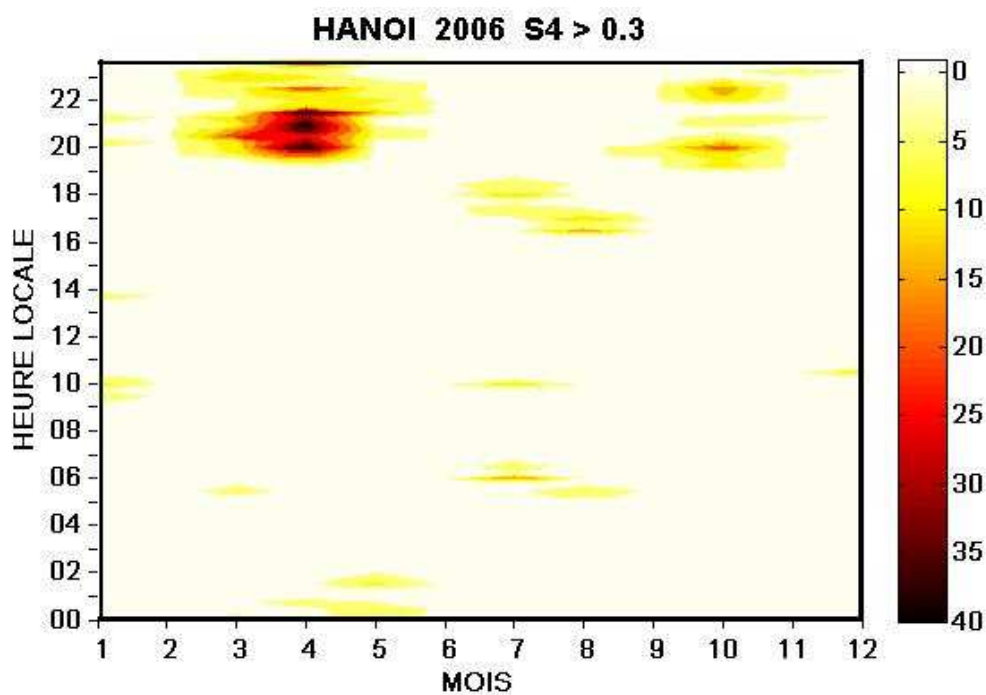
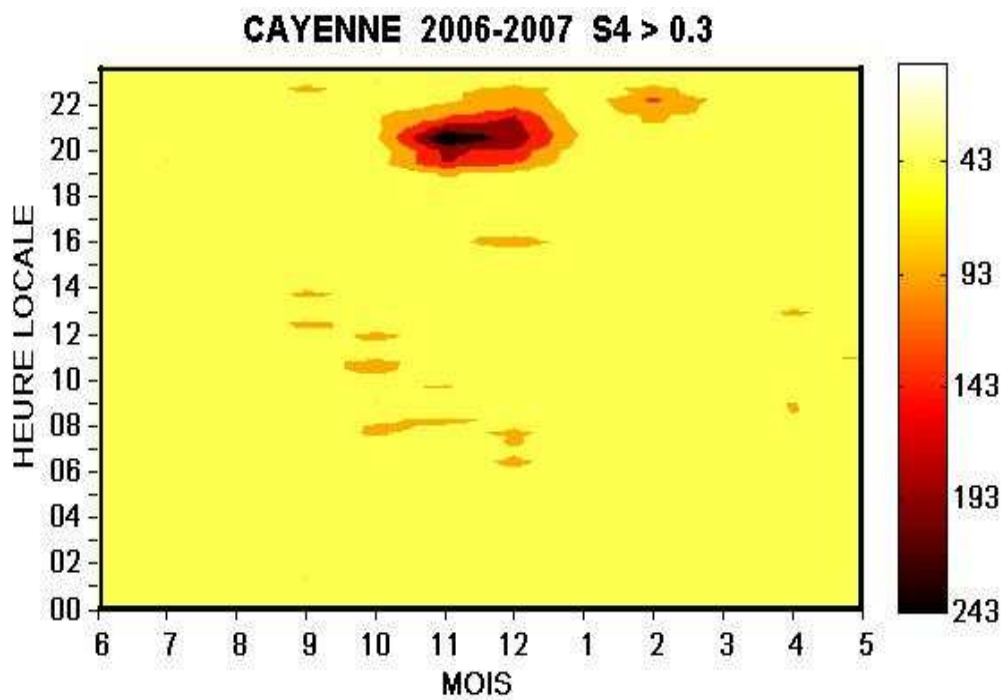


Figure 10. Histogramme des évènements de scintillation à Cayenne et à Hanoi en fonction du mois et de l'heure locale pour des scintillations correspondant à un indice $S4 > 0,3$. Le code de couleurs représente le nombre d'évènements durant une tranche de temps de 15 minutes ; **(a)** station de Cayenne (Guyane française) de juin 2006 à juillet 2007 ; **(b)** station de Hanoi (Vietnam) pour l'année 2006.

■ Les outils de prévision de la scintillation

L'interprétation physique de ces observations reste actuellement très parcellaire et fait toujours l'objet de travaux de recherches. En l'absence de modèles physiques opérationnels, des méthodes semi-empiriques ont été développées pour répondre au mieux aux besoins des utilisateurs du GNSS et des industriels actifs dans ce secteur. Nous allons examiner deux réalisations relevant de ce domaine d'application.

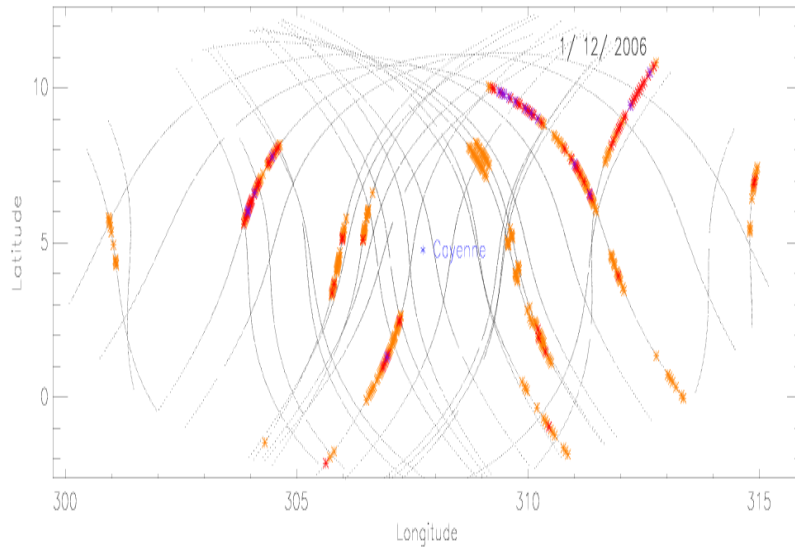
Un service en ligne d'observation des scintillations

La prévision du niveau de scintillation en un lieu et à une époque données relève actuellement de l'analyse statistique. Il n'est pas possible de prévoir l'apparition d'un évènement de scintillations dans les jours qui précèdent. A défaut de pouvoir effectuer de telles prévisions, des systèmes d'observations en temps réel des évènements de scintillations à la surface du globe ont été réalisés afin de permettre aux utilisateurs du GPS d'être avertis des possibles défaillances de leur système dans leur zone d'intérêt.

La difficulté d'une telle application réside en la nécessité de disposer d'un ensemble de moniteurs de scintillations à l'échelle mondiale. De nombreux réseaux de récepteurs GPS permanents et dont les données sont actuellement disponibles en temps quasi-réel ont été déployés. Par contre, ces instruments effectuent majoritairement des acquisitions au mieux à la cadence d'une seconde. Or, nous l'avons vu, le spectre des scintillations est compris entre 1 Hz et 10 Hz, soit des variations temporelles comprises entre 1 s et 0,1 s. Il faudrait donc, en toute rigueur, effectuer des acquisitions de mesures au rythme de 0,05 s pour respecter le théorème d'échantillonnage de Shannon.

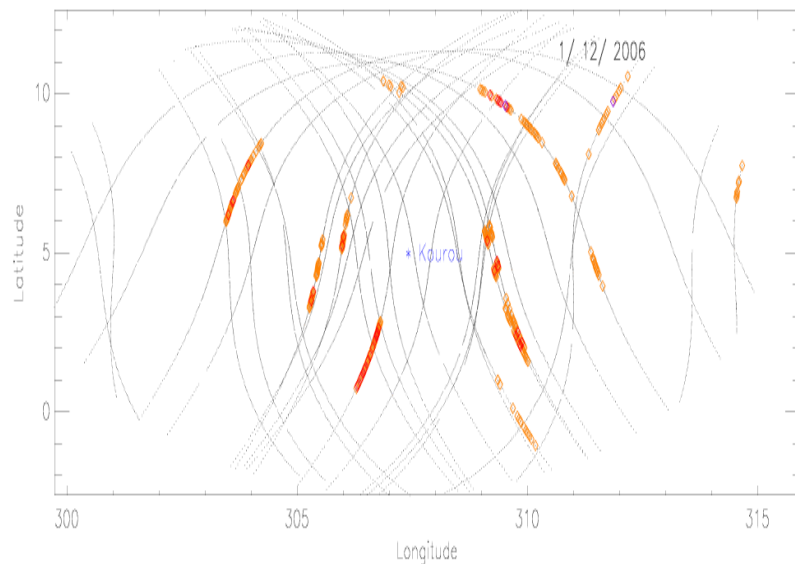
Pour contourner ce problème, un indice empirique caractérisant les perturbations du signal GPS à l'aide d'acquisitions à 1 Hz, a été utilisé. Cet indice peut être interprété comme une caractérisation de la vitesse de variation des irrégularités d'ionisation rencontrées par le signal lors de sa propagation dans l'ionosphère. L'avantage de cet indice est d'être calculable à l'aide des mesures effectuées dans le monde par le réseau de récepteurs de l'IGS (International GNSS Service) dont les données, acquises à la cadence de 1 Hz, sont accessibles par Internet en temps semi-réel [12].

Afin de valider l'utilisation de cet indice empirique comme indicateur de la présence de scintillations, un des moniteurs de scintillation à cadence rapide de l'expérience PRIS a été installé à faible distance d'un récepteur du réseau IGS à Cayenne en Guyane française. La figure 11 montre le résultat de cette comparaison entre l'indice empirique déduit du récepteur IGS de Kourou et l'indice S_4 calculé par un moniteur de scintillation localisé à Cayenne, distant de Kourou d'environ 100 km. Cette figure montre qu'il existe une correspondance acceptable entre les indices fournis par les deux instruments. Les raisons de ce bon accord expérimental ont été étudiés et expliqués par ailleurs [13].



Echelle de S4 : [0.25-0.4], [0.4,0.55], [>0.55]

(a)



(b)

Figure 11. Comparaison entre indice de scintillations empirique et indice S4 calculés à la cadence d'une minute le long de la trajectoire des satellites GPS le 1/12/2006 [13] (a) : valeurs de l'indice S4 déterminé à Cayenne par un moniteur de scintillations à partir de mesures échantillonnées à 50 Hz ; (b) : indice empirique de scintillation déduit des mesures échantillonnées à 1 Hz du récepteur IGS de Kourou.

Ces études ont permis de valider le prototype d'un service d'aide en ligne aux utilisateurs du GPS. Une version simplifiée de ce service est proposée à titre gratuit par la société CLS sur son site internet [14]. Il permet à tout utilisateur du GPS ayant accès à l'internet d'être averti, avec un faible délai, de la présence dans sa zone d'intérêt de scintillations ionosphériques susceptibles de perturber son système (figure 12).

Scintillation index estimated from high frequency GPS phase fluctuations (30 s samples)
Day: 23/03/2010

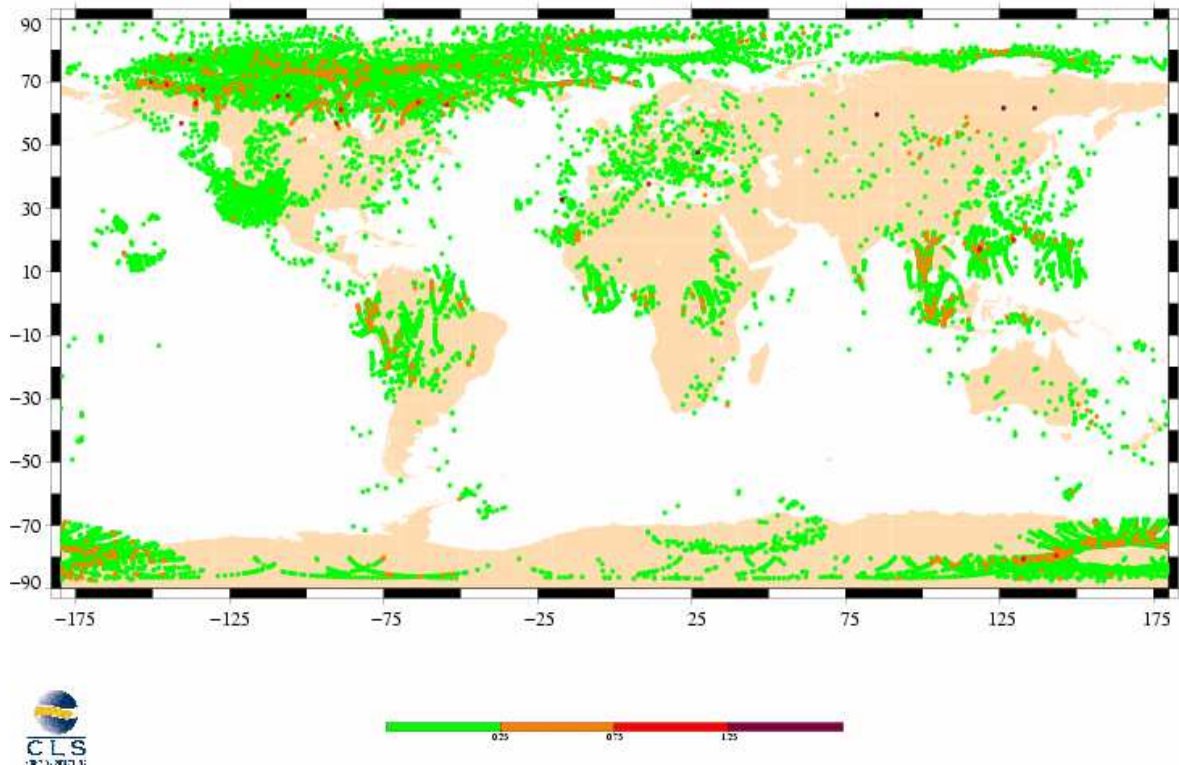
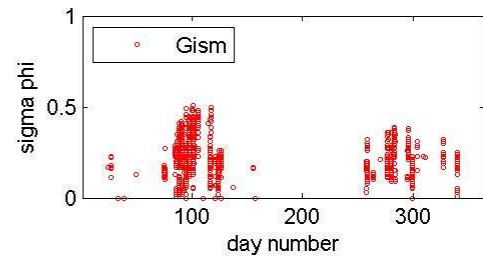
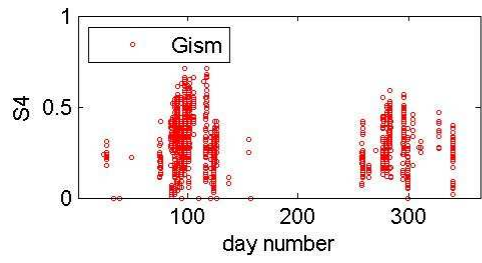
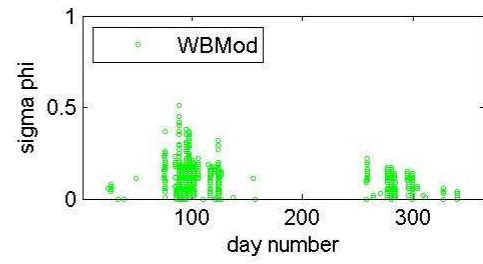
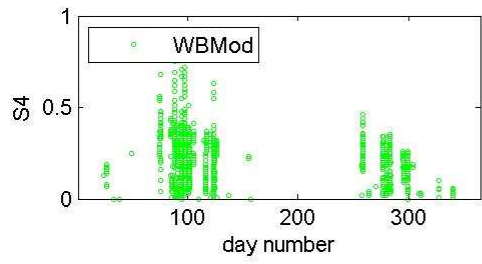
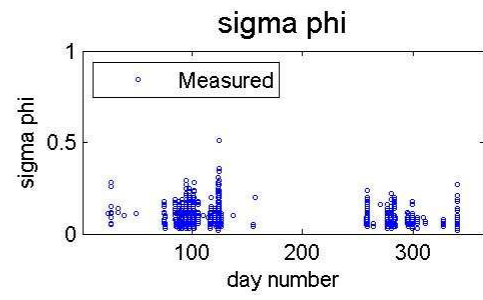
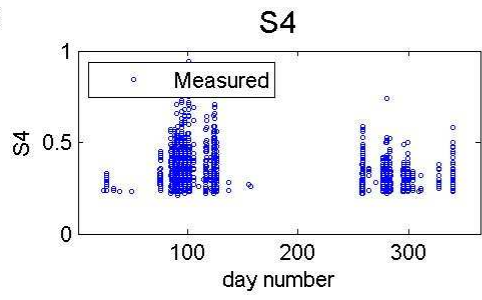


Figure 12. Exemple de carte de scintillation accessible en ligne à partir du site de CLS.

Un simulateur logiciel

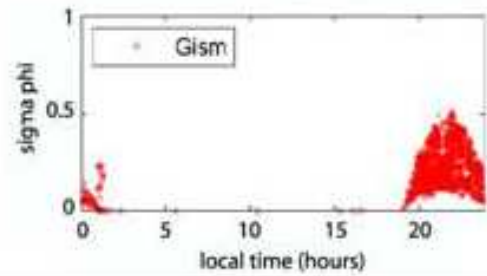
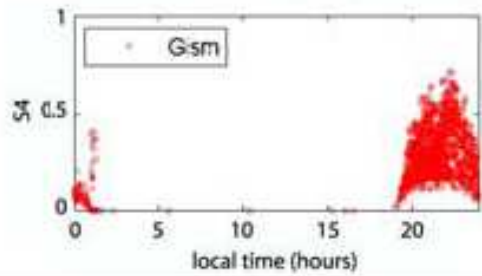
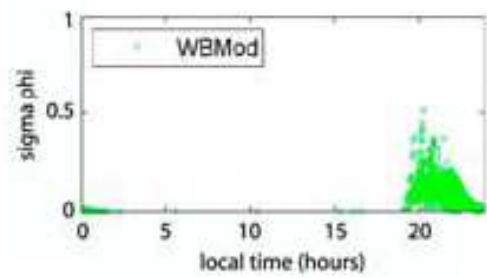
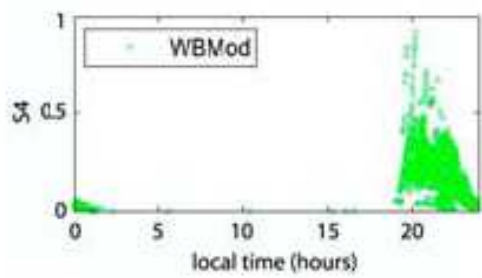
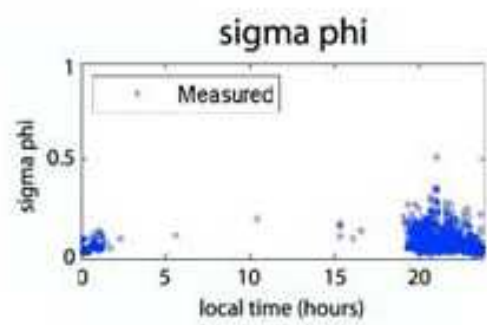
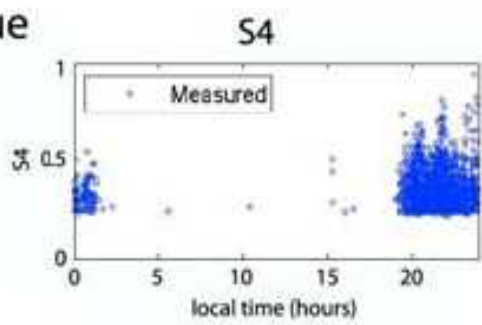
Les concepteurs de systèmes de radiocommunications spatiales ont fréquemment recours à des simulateurs de propagation pour prévoir les performances et choisir les options les mieux adaptées à leurs systèmes. Dans le cadre du projet PRIS, deux simulateurs logiciels de scintillations ont été testés : Le logiciel WBMod d'une part [15] et GISM d'autre part [16]. Ce dernier, mis au point par la société IEEA, est recommandé par l'UIT-R dans le cadre de la normalisation internationale des télécommunications [5]. La figure 13 montre un exemple de comparaison entre la statistique des valeurs de S_4 et de σ_ϕ mesurée à Hué (Vietnam) pour les années 2006-2007, en fonction de la saison d'une part et de l'heure locale d'autre part. Dans cet exemple, on constate un accord acceptable entre les mesures expérimentales et les prévisions. Cependant, en d'autres occasions, les deux modèles divergent quelque peu, avec, semble-t-il, un avantage au modèle GISM [16].

Hue



(a)

Hue



(b)

Figure 13. Exemple de comparaison entre les prévisions de scintillations fournies par les logiciels WBMod et GISM et les mesures pour la station de Hué (Vietnam) en 2006-2007 [13]. Occurrence et intensité des indices S_4 et σ_ϕ en fonction (a) de la saison ; (b) de l'heure locale.

■ Conclusion

La scintillation ionosphérique affecte les liaisons Terre-satellites jusqu'à des fréquences de plusieurs GigaHertz. Ce phénomène, particulièrement présent en régions équatoriales est un sujet de préoccupation pour les utilisateurs du GPS à des fins de positionnement dynamique précis et pour les concepteurs des futurs systèmes et applications basées sur les signaux GNSS. La campagne internationale de mesures effectuée dans le cadre du projet européen PRIS a permis de valider quelques outils d'observation et de prévision des scintillations équatoriales. Cependant, cette première campagne de mesures s'est déroulée pendant une période de très faible activité solaire. Avec la remontée actuelle du cycle d'activité solaire, elle devra être poursuivie dans les années à venir afin de compléter les observations en période d'activité solaire plus intense.

■ Bibliographie

- [1] Hegarty C., B. El-Arini, Taehwan Kim, S. Ericson. Scintillation modelling for GPS-Wide Area Augmentation System receivers. *Radio Science*, Vol. 36, No. 5, pp. 1221-1231, 2001.
- [2] Conquer R., B. El-Arini, C. Hegarty, T. Hsiao. Modelling the effect of ionospheric scintillation on GPS/Satellite-Based Augmentation System availability. *Radio Science*, Vol. 38, No. 1, doi:10.1029/2000RS002604, 2003.
- [3] Jiwon Seo, Todd Walter, Edward Marks, Tsung-Yu Chiou, Per Enge. Ionospheric Scintillation Effects on GPS Receivers during Solar Minimum and Maximum. *International Beacon Satellite Symposium*, Boston MA (USA), 11-15 June 2007.
- [4] Jiwon Seo, Todd Walter, Tsung-Yu Chiou, and Per Enge. Characteristics of deep GPS signal fading due to ionospheric scintillation for aviation receiver design. *Radio Science*, Vol. 44, RS0A16, doi:10.1029/2008RS004077, 2009.
- [5] Rec. UIT-R P.531-9. Données de propagation ionosphérique et méthodes de prévision requises pour la conception de services et de systèmes à satellites. UIT-R, Place des Nations 1211 Genève 20, <http://www.itu.int/fr/pages/default.aspx>
- [6] S. Basu, K. M. Groves, Su. Basu, P. J. Sultan. Specification and forecasting of scintillations in communication/navigation links: current status and future plans. *JASTP*, 64(16), pp.1745-1754 (2002)
- [7] <http://sidc.oma.be>
- [8] Don Huton, Odile de la Beaujardière. C/NOFS Press Conference, AGU 15 December 2008:
http://www.nasa.gov/pdf/296963main_cnofs_CINDI_Final.pdf

[9] <http://jro.igp.gob.pe/english/>

[10] Pimenta, P.R. Fagundes, Y. Sahai, J.A. Bittencourt, J.R. Abalde. Equatorial F-region plasma depletion: latitudinal and seasonal variations. *Annales Geophysicae*, 21, pp. 2315-3222 (2003).

[11] GPS, Localisation et navigation par satellites, F. Duquenne, S. Botton, F. Peyret, D. Bétaille, P. Willis ; Ed. Hermes, Lavoisier, 2005.

[12] <http://igscb.jpl.nasa.gov/>

[13] Béniguel Y., J-P. Adam, N. Jakowski, T. Noack, V. Wilken, J-J. Valette, M. Cueto, A. Bourdillon, P. Lassudrie-Duchesne, B. Arbesser-Rastburg. Analysis of scintillation recorded during the PRIS measurement campaign. *Radio Science*, Vol. 44, RS0A30, doi:10.1029/2008RS004090, 2009.

[14] <http://scintillations.cls.fr/>

[15] Secan J.A., R.M. Bussey, E.J. Fremouw. An improved model of equatorial scintillation. *Radio Science*, Vol. 30, No. 3, pp. 607-617, 1995, doi:10.1029/94RS03172.

[16] Béniguel Y., A global ionospheric propagation model for scintillations of transmitted signals. *Radio Science*, Vol. 37, No. 3, pp. 1032, 2002, doi:10.1029/2000RS002393.