



UNIVERSITE
JEAN LOROUGNON GUEDE

UFR ENVIRONNEMENT

REPUBLIQUE DE CÔTE D'IVOIRE

Union - Discipline - Travail

Ministère de l'Enseignement Supérieur et
de la Recherche Scientifique

ANNEE UNIVERSITAIRE :
2020 - 2021

N° D'ORDRE : 0487/2021

N° CARTE D'ETUDIANT :

CI0416008390

MASTER

Physique-Chimie Appliquée

Option : Physique-Chimie appliquée à l'environnement

THEME :

**Caractérisation de la scintillation ionosphérique
en fonction de l'angle d'élévation du satellite :**

Station GNSS de Korhogo

(Nord de la Côte d'Ivoire)

LABORATOIRE : DES
SCIENCES ET
TECHNOLOGIE DE
L'ENVIRONNEMENT

Présenté par :

GNOMBLEI Jean-Luc

JURY

Président : M. DONGUI Bini Kouamé, Professeur Titulaire,
Université Jean Lorougnon Guédé

Directeur : M. KOUASSI Kouakou Lazare, Professeur Titulaire,
Université Jean Lorougnon Guédé

Encadrant : M. MENE Niangoran Médard, Maître-Assistant
Université Péléforo Gon Coulibaly

Examineur : M. KOUASSI ADJON Anderson, Maître-Assistant
Université Jean Lorougnon Guédé

Soutenu Publiquement le :
16/10/2021



UNIVERSITE
JEAN LOROUGNON GUEDE

UFR ENVIRONNEMENT

REPUBLIQUE DE CÔTE D'IVOIRE

Union - Discipline - Travail

Ministère de l'Enseignement Supérieur et
de la Recherche Scientifique

ANNEE UNIVERSITAIRE :
2020 - 2021

N° D'ORDRE : .../2021

N° CARTE D'ETUDIANT :

CI0416008390

MASTER

Physique-Chimie Appliquée

Option : Physique-Chimie appliquée à l'environnement

THEME :

**Caractéristiques de la scintillation ionosphérique
en fonction de l'angle d'élévation du satellite :**

Station GNSS de Korhogo

(Nord de la cote d'ivoire)

LABORATOIRE :

SCIENCES ET

TECHNOLOGIE DE

L'ENVIRONNEMENT

Présenté par:

GNOMBLEI Jean-Luc

JURY

- Président :** M. DONGUI Kouamé Bini, Professeur Titulaire,
Université Jean Lorougnon Guédé
- Directeur :** M. KOUASSI Kouakou Lazare, Professeur Titulaire,
Université Jean Lorougnon Guédé
- Encadrant :** M. MENE Niangoran Médard, Maître-assistant
Université Péléforo Gon Coulibaly
- Examineur :** M. ADJON Kouassi Anderson, Maître-assistant
Université Jean Lorougnon Guédé

Soutenu Publiquement le :
16/10/2021

DEDICACES

*Voici mes jours et nuits d'apprentissages, de travaux acharnés, de souffrances
et de stress concrétisés par ce mémoire que je dédie à*

Mané Maimouna ma mère,

Mon père Gnombléi Olivier,

Ma mémé Digbeub Valentine et Baulys Gislaine ma tante,

Zamblé Bi Franck Ziblao Delaure,

Mes amis, qui ont été pour moi une grande source de joie et de motivation.

REMERCIEMENTS

La rédaction d'un mémoire de master, bien qu'étant une aventure personnelle enrichissante, ne peut être menée sans le soutien et la confiance d'un grand nombre de personnes que je tiens à remercier chaleureusement.

Je remercie Madame **TIDOU Abiba Sanogo Epse KONE**, Professeur titulaire et Présidente de l'Université Jean Lorougnon Guédé pour les moyens nécessaires mis à la disposition des étudiants afin de leur inculquer une bonne formation.

Je remercie Monsieur **DONGUI Bini Kouamé**, Professeur titulaire à l'Université Jean Lorougnon Guédé. Professeur, vous nous avez accueillis dès nos premiers pas dans cette Université en nous donnant les bases en thermodynamique, atomistique et liaisons chimiques. La beauté et la qualité de vos diapositives me fascinaient. C'est donc une joie pour moi de vous retrouver en tant que président du jury.

Je tiens à remercier Monsieur **KOUASSI Kouakou Lazare**, Professeur Titulaire à l'Université Jean Lorougnon Guédé, Directeur de l'UFR Environnement et directeur scientifique de ce mémoire. Professeur, la bonne gestion de cette UFR est la preuve de votre rigueur et abnégation dans le travail.

Je remercie Monsieur **ADON Attoh Marcellin**, Maître de Conférences à l'Université Jean Lorougnon Guédé. Docteur **ADON**, votre efficacité et authenticité dans le travail sont bien reconnues par tous vos étudiants. Je vous remercie pour votre contribution scientifique apportée dans ce travail.

J'adresse mes remerciements à Monsieur **KOUASSI Adjon Anderson**, Maître-Assistant à l'Université Jean Lorougnon Guédé, pour m'avoir offert l'opportunité d'aller travailler à la station GNSS de Korhogo et pour votre contribution à l'amélioration de ce travail.

Toute ma gratitude à mon encadrant, Monsieur **MENE Niangoran Médard**, Maître-Assistant à l'Université Péléforo Gon Coulibaly. Docteur Méné, pour m'avoir fait bénéficier de vos expériences en matière de recherche, pour m'avoir accueilli et hébergé durant tout mon séjour à Korhogo, je vous dis Grand merci.

Mes remerciements vont également à l'endroit de tous nos **Enseignants Chercheurs** de l'Université Jean Lorougnon Guédé qui ont assuré notre formation en physique-chimie.

Je remercie **BEH Mondjou Georges Constant** pour son soutien et son amitié.

Ma reconnaissance va aussi à l'endroit de toutes les personnes qui m'ont assisté moralement, affectueusement, physiquement et financièrement durant ces cinq années passées à Daloa.

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES	i
LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS	iii
LISTE DES TABLEAUX	iv
LISTE DES FIGURES	v
INTRODUCTION.....	1
PREMIERE PARTIE: GENERALITES	3
1.1 PRESENTATION DE LA ZONE D’ETUDE.....	3
1.2 GENERALITES SUR LE GNSS	3
1.2.1 Origine du GNSS	3
1.2.2 composantes du GNSS.....	4
1.2.2.1 segment spatial: différentes constellations de satellites	4
1.2.2.2 segment sol: les réseaux de stations au sol	5
1.2.2.3 récepteurs GNSS.....	5
1.2.3 Principe de triangulation ou trilatération.....	6
1.2.4 Mesure de Pseudo-distance	7
1.2.4.1 Mesure de code	7
1.2.4.2 Mesure de phase.....	8
1.2.4.3 Message de navigation	8
1.2.5 Avantage du GNSS.....	9
1.2.6 Limites de précision du positionnement GNSS.....	9
1.3 GENERALITES SUR LE PHENOMENE DE SCINTILLATION IONOSPHERIQUE	10
1.3.1 relations soleil- terre	10
1.3.1.1 Soleil	11
1.3.1.1.1 activité solaire.....	11
1.3.1.1.2 éruption solaire	11
1.3.1.1.3 vent solaire.....	12
1.3.1.2 environnement terrestre.....	12
1.3.1.2.1 champ magnétique terrestre.....	12
1.3.1.2.2 Atmosphère terrestre	12
1.3.2 ionosphère	13
1.3.2.1 Définition.....	13

1.3.2.2	Morphologie de l'ionosphère.....	13
1.3.2.2.1	couche D.....	14
1.3.2.2.2	couche E.....	15
1.3.2.2.3	couche F.....	15
1.3.2.3	Instabilité de Rayleigh-Taylor (IRT) et bulle de plasma.....	16
1.3.3	scintillation ionosphérique.....	17
1.3.3.1	Définition et origine.....	17
1.3.3.2	Indices de scintillation.....	18
2	DEUXIEME PARTIE:.....	21
2.1	MATERIEL.....	21
2.1.1	Matériel de collecte des données.....	21
2.1.2	Matériel de traitement et d'analyse des donnés.....	21
2.2	METHODES.....	21
2.2.1	Méthodologie de collecte des données.....	21
2.2.2	Méthodologie de traitement des données.....	22
2.2.2.1	Extraction des données.....	22
2.2.2.2	Prétraitement des données.....	24
2.2.3	Méthode d'analyse de la scintillation ionosphérique.....	25
2.2.3.1	Méthode d'analyse de l'occurrence de la scintillation.....	25
2.2.3.2	Méthode d'analyse de l'intensité et de la scintillation.....	26
3	TROISIEME PARTIE:.....	28
3.1	RESULTATS.....	28
3.1.1	Variation du taux d'occurrence de la scintillation en fonction de l'angle d'élévation...28	
3.1.2	Variation de l'intensité de la scintillation avec l'angle d'élévation.....30	
3.1.3	Variation saisonnière.....35	
3.1.3.1	Variation saisonnière du taux d'occurrence de la scintillation en fonction de l'angle d'élévation.....35	
3.1.3.2	Variation saisonnière de l'intensité de la scintillation en fonction de l'angle d'élévation.....35	
3.2	DISCUSSIONS.....	37
	CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....	40
	REFERENCES.....	41
	ANNEXE	

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

dB	: décibel
Elv	: Angle d'élévation du satellite
GNSS	: Global Navigation Satellite System
GPS	: Global Positioning System
GLONASS	: Globalnaïa Navigatsionnaïa Spoutnikovaïa Sistéma
H_z	: Hertz
IDL	: Interactive Data Language
IRT	: Instabilité de Rayleigh-Taylor
ISMR	: Ionospheric Scintillation Monitoring Records
L	: porteuse GNSS
λ	: longueur d'onde du signal
PRN	: Pseudo Random Noise
RTK	: Real Time Kinematic
S₄	: écart-type de l'amplitude calculée sur 60s normalisée par la moyenne
σ_{ϕ}	: Ecart type de la phase calculé sur 60s
TBF	: Très Basse Fréquence
TEC	: Total Electron Content
TL	: Temps Local
Tow	: Time Of Week
UV	: Ultra-Violet
V_d	: vitesse de dérive des irrégularités

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I : Ordre de grandeur des sources d'erreurs GNSS.	10
Tableau II : Présentation des paramètres fournis par les fichiers ISMR.	22
Tableau III : Les classes d'intensité de scintillation	27

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Carte de la zone d'étude	3
Figure 2 : Présentation des différentes constellations GNSS.	4
Figure 3 : Utilisateur des récepteurs GNSS.....	6
Figure 4 : Principe de trilatération.	7
Figure 5 : Mesure de code.	7
Figure 6 : Mesure de Phase.	8
Figure 7 : une éruption typique. La Terre (petite boule bleue) a été ajoutée pour illustrer l'échelle gigantesque du phénomène	12
Figure 8 : Structure de l'atmosphère terrestre.	13
Figure 9 : Morphologie et couches de l'ionosphère.	14
Figure 10 : Bulle de plasma ionosphérique.....	17
Figure 11 : Mécanisme de diffraction des ondes en provenance d'un satellite par des irrégularités d'ionisation de l'ionosphère.....	18
Figure 12 : Profondeur d'évanouissement en bande L dû à la scintillation ionosphérique en période de maximum et de minimum d'activité solaire.	19
Figure 13 : Matériel de collecte de données GNSS	21
Figure 14 :Processus d'extraction des fichiers ismr	23
Figure 15 :Multi-trajets.....	24
Figure 16 :Capture d'écran des programmes IDL (à gauche) et d'un prototype de fichier à la sortie (à droite).....	26
Figure 17 : Taux d'occurrence de la scintillation ionosphérique en fonction de l'angle d'élévation du satellite. Korhogo, mars 2017.	28
Figure 18 : Taux d'occurrence de la scintillation ionosphérique en fonction de l'angle d'élévation du satellite. Korhogo, juin 2017.....	28
Figure 19 : Taux d'occurrence de la scintillation ionosphérique en fonction de l'angle d'élévation du satellite. Korhogo, septembre 2017	29
Figure 20 : Taux d'occurrence de la scintillation ionosphérique en fonction de l'angle d'élévation du satellite. Korhogo, décembre 2017.	29
Figure 21 : Variation de l'intensité de la scintillation ionosphérique en fonction de l'angle d'élévation du satellite. Korhogo, mars 2017.....	31
Figure 22 : Variation de l'intensité de la scintillation ionosphérique en fonction de l'angle d'élévation du satellite. Korhogo, Juin 2017.....	32
Figure 23 : Variation de l'intensité de la scintillation ionosphérique en fonction de l'angle d'élévation du satellite. Korhogo, Septembre 2017	33

Figure 24 : Variation de l'intensité de la scintillation ionosphérique en fonction de l'angle d'élévation du satellite. Korhogo, décembre 2017.....	34
Figure 25 : Histogramme comparatif des taux d'occurrence saisonnière de la scintillation	35
Figure 26 : Variation saisonnière de l'intensité de la scintillation en fonction de l'angle d'élévation Équinoxe de mars (bleu), solstice de juin (orange), équinoxe de septembre (vert), solstice de décembre (rouge)	36
Figure 27 : Illustration de la dépendance de la scintillation avec l'angle d'élévation du satellite.....	37

INTRODUCTION

Actuellement, les systèmes globaux de positionnement par satellites ou GNSS (Global Navigation Satellite Systems) sont de plus en plus utilisés pour des applications critiques telles que la navigation aérienne. L'idée de perdre brutalement l'accès à l'information fournie par les satellites est donc difficilement envisageable. Pourtant, l'accessibilité au signal n'est pas garantie (Galmiche, 2019). Les technologies spatiales dont les GNSS dépendent de manière continue des conditions de la météorologie spatiale; discipline qui englobe l'ensemble des méthodes et concepts relatifs aux interactions entre l'atmosphère terrestre et le soleil. Le soleil émet continuellement des flux de particules et du rayonnement électromagnétique qui interagissent avec la haute atmosphère pour former une couche ionisée connue sous le nom d'**ionosphère**. Les ions et électrons de cette région entraînent un brouillage des signaux qui la traversent (Knight, 2000). L'ionosphère et la distribution spatio-temporelle de ses structures sont connues pour contrôler, limiter et dans certains cas menacer la performance de certains systèmes de communication basés dans l'espace ou sur la Terre (Gurney *et al.*, 1993 ; Hruska & Shea, 1993). Ses propriétés optoélectroniques lui confèrent la capacité de compromettre la précision des réseaux de positionnement global et même d'endommager des réseaux électriques au sol. L'ionosphère apparaît comme la source principale d'erreurs pour des applications **GNSS** (Carrano *et al.*, 2013). L'ionosphère affecte les signaux **GPS** en créant un retard dans les mesures de codes et de phase. En effet, il se produit des fluctuations de phase et d'amplitude des ondes qui traversent l'ionosphère (Groves *et al.*, 1997). Ce phénomène est appelé **scintillation ionosphérique**. Les scintillations ionosphériques constituent une menace majeure pour le positionnement par satellites en raison des effets susmentionnés. De nombreuses études ont été menées dans le but de surveiller, modéliser et cartographier les scintillations ionosphériques polaires et équatoriales ainsi que de mettre au point des techniques d'atténuation de leurs effets dévastateurs (Lonchay & Warnant, 2019).

En l'état actuel, les grandes tendances de la scintillation ionosphérique connues sont ses variations avec l'activité solaire et magnétique puis avec la position géographique de la station, la saison et l'heure locale. Les scintillations les plus sévères se produisent généralement dans la région équatoriale. Au Brésil la scintillation ionosphérique occasionne une diminution du nombre de satellites reçus par les stations (Paget, 2013). D'autres études réalisées en diverses régions ont montré que la scintillation ionosphérique est appréciable entre le coucher et le lever du soleil (Knight. & Finn, 1996 ; Boutiouta *et al.*, 2006). Aussi pendant le minimum solaire, en zone équatoriale africaine, (Ackah *et al.*, 2011) ont montré que la scintillation ionosphérique est plus importante aux équinoxes qu'aux solstices.

Cependant, pour une saison donnée et à une heure donnée, quelles sont les angles d'élévations des satellites émetteurs des signaux les plus affectés par la scintillation?

L'étude des « **caractéristiques de la scintillation ionosphérique en fonction de l'angle d'élévation du satellite** » a donc été initiée afin de contribuer à la compréhension du phénomène de scintillation en zone équatoriale africaine et permettre aux domaines utilisateurs du GNSS d'éviter les données les plus impactées par la scintillations sur le critère de l'angle d'élévation. De façon spécifique, il est question de montrer :

- la variation du taux d'occurrence de la scintillation en fonction de l'angle d'élévation;
- la variation de l'intensité de la scintillation en fonction de l'angle d'élévation;
- les variations saisonnières du taux d'occurrence et de l'intensité de la scintillation en fonction de l'angle d'élévation.

Pour ce faire, ce travail est organisé en trois parties. La première partie est consacrée à la présentation de la zone d'étude puis aux généralités sur le GNSS et le phénomène de scintillation ionosphérique. La seconde partie rend compte du matériel et des méthodes utilisés pour la collecte et le traitement des données. La dernière partie fait l'état des résultats obtenus lors de l'étude ainsi que leurs discussions. Une conclusion et des perspectives mettent fin à cette étude.

PREMIERE PARTIE : GENERALITES

1.1 PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

Les activités ionosphériques étant perturbatrices des communications entre les satellites et les récepteurs au sol, une station GNSS a été installée à Korhogo en raison de la proximité de ce site d'avec l'équateur magnétique. Korhogo est la quatrième ville de la Côte d'Ivoire au regard de la population et de l'économie. C'est le chef-lieu du district des Savanes et de la région du Poro. La ville est située au Nord du pays entre 9° 24' et 9° 48' Nord et entre 5° 25' et 5° 58' Ouest. La station GNSS de Korhogo se trouve sur le site de l'université Péléforo Gon Coulibaly (voir figure 1).

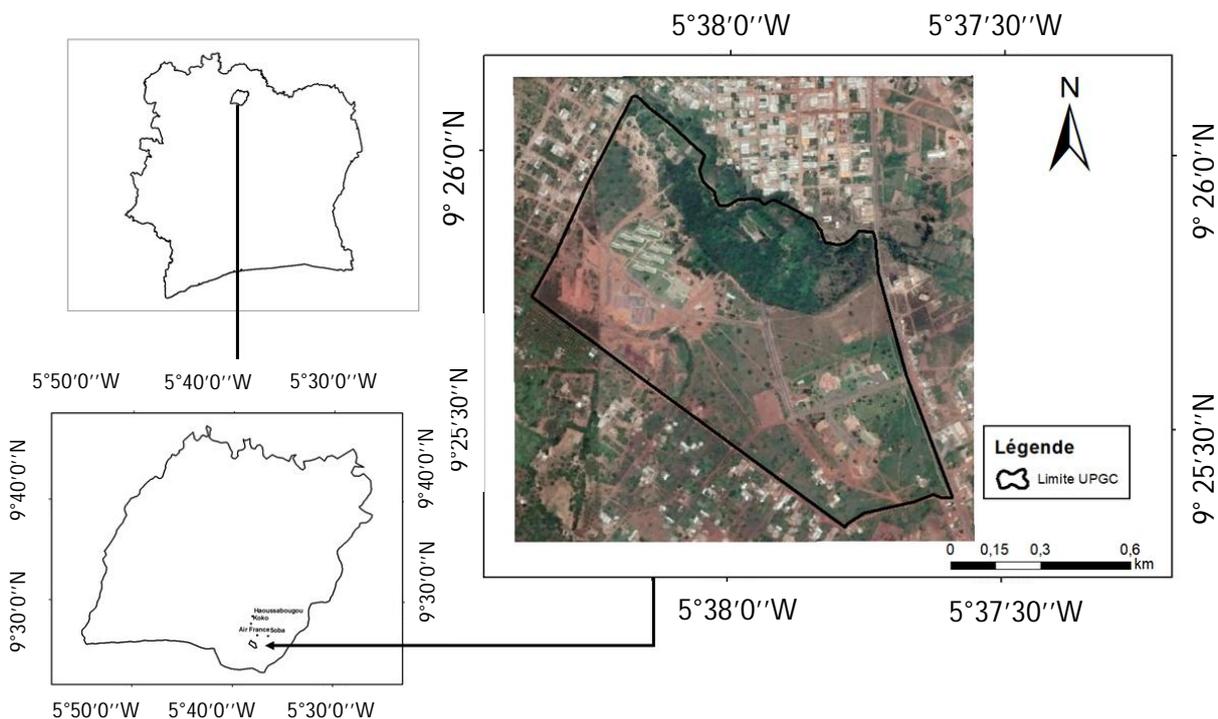


Figure 1 : Carte de la zone d'étude

1.2 GENERALITES SUR LE GNSS

1.2.1 Origine du GNSS

Généralement par abus de langage, nous utilisons le terme générique **GPS** (Global Positioning System) pour décrire les différents équipements de géo positionnement. Cette constellation de satellites américains étant la première dans l'histoire a laissé son nom à la technologie de géo positionnement. Toutefois, d'autres constellations de satellites ont été mises en service par d'autres pays : en plus du **GPS** américain nous avons le **Glonass** pour la Russie, **Galileo** a également été mis en service par l'Europe et plus récemment **Beidou** pour la Chine. L'ensemble de ces constellations est rassemblé sous la seule appellation de **GNSS**

(Global Navigation Satellite System) et regroupe l'ensemble des matériels et installations permettant le positionnement par satellites.

1.2.2 Composantes du GNSS

Les systèmes de positionnement GNSS ont pour but d'estimer la position d'un point à la surface de la Terre, à partir d'une constellation de satellites, dont les positions sont connues à chaque instant. Ces systèmes s'appuient sur le principe de triangulation. Chaque satellite diffuse en permanence un signal vers l'ensemble des zones visibles à la surface de la Terre et inclut dans son signal les informations relatives à sa position précise dans l'espace, ainsi que le temps d'émission. Le signal doit être reçu par tout utilisateur à la surface du globe (Foucault, 2020).

1.2.2.1 Segment spatial : différentes constellations de satellites

Le segment spatial du GNSS est constitué de différentes constellations de satellites. Les caractéristiques (période orbitale, inclinaison des orbites par rapport au plan de l'équateur, nombre de satellites opérationnels...) des différentes constellations de satellites du GNSS sont présentées par la figure 2.

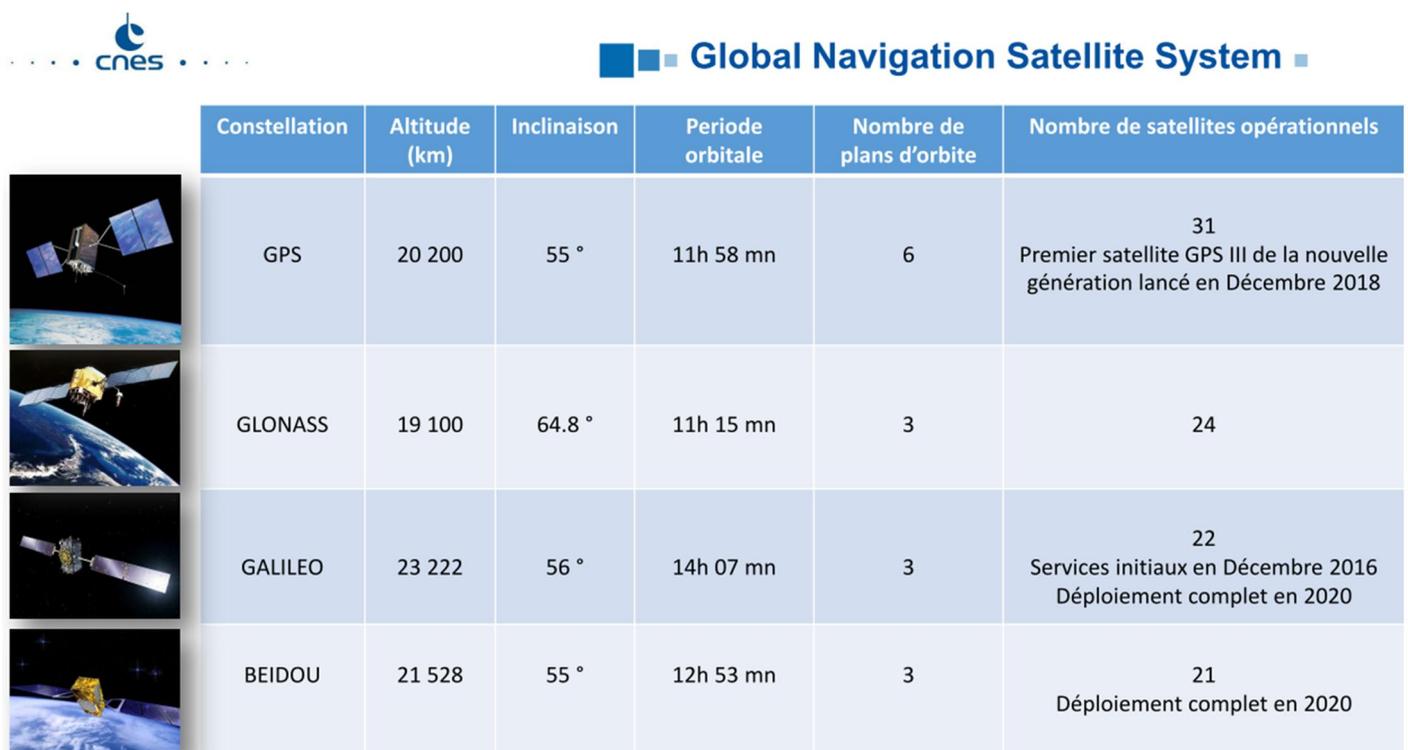


Figure 2 : Présentation des différentes constellations GNSS. (<mailto:thierry.chapuis@cnes.fr>)

Chaque satellite reçoit et stocke des données en provenance d'un segment de contrôle. Chacun maintient une échelle de temps avec une grande précision grâce à ses horloges atomiques très précises embarquées et transmet des signaux en provenance des récepteurs aux sols.

1.2.2.2 Segment sol : les réseaux de stations au sol

Le segment de contrôle GNSS consiste en un réseau mondial d'installations au sol qui suivent les satellites GNSS, surveillent leurs transmissions, effectuent des analyses et envoient des commandes et des données à la constellation. Si un satellite ne fonctionne pas correctement, le segment de contrôle au sol peut le déclarer «hors d'état de marche» et adopter les mesures nécessaires pour corriger le problème. (Sammuneh, 2003).

1.2.2.3 Récepteurs GNSS

Il s'agit d'un ensemble de composants reposant sur une ou plusieurs constellations de satellites artificiels permettant de fournir à un utilisateur par l'intermédiaire d'un récepteur portable de petite taille sa position, sa vitesse et l'heure. La réception des signaux envoyés par les différents satellites vont lui permettre de calculer sa position sans correction. Ce calcul permet d'obtenir une précision de l'ordre de plus ou moins 3 m. Cette position naturelle fournie par un récepteur standard tout seul, donne une bonne idée de l'endroit où celui-ci se trouve mais n'est pas assez pour permettre un travail de précision. Pour gagner en précision dans les travaux agricoles, la topographie, le guidage d'engins ou dans bien d'autres domaines d'application il nécessite des corrections. Cependant tous les récepteurs GNSS n'ont pas la possibilité d'intégrer des corrections pour améliorer leur positionnement. Nous distinguons deux types de récepteurs GNSS (ORPHEON, 2021)

- les **récepteurs grand public** intégrés dans la majorité des téléphones portables, les tablettes, les montres ou les véhicules travaillent uniquement en mode naturel sans possibilité d'améliorer leur précision grâce à des corrections;
- les **récepteurs de précision (RTK)** sont capables d'intégrer des données externes de corrections permettant d'augmenter leur précision.

La figure 3 montre quelques utilisateurs de récepteurs GNSS.



Figure 3 : Utilisateurs des récepteurs GNSS

1.2.3 Principe de triangulation ou trilatération

L'idée sur laquelle est basé le positionnement par satellite est une trilatération en trois dimensions. L'intersection de deux sphères correspond à un cercle, et l'intersection de trois sphères correspond à deux points. En théorie, il serait ainsi nécessaire d'utiliser un quatrième satellite pour savoir où l'on se trouve. En pratique, on élimine l'un de deux points car il ne se trouve pas sur Terre mais à une position en altitude. Trois satellites suffiraient donc pour connaître notre position sur le globe d'où la triangulation (voir figure 4). Cependant pour la synchronisation de l'horloge du récepteur, il faut la précision d'une horloge atomique. Un récepteur n'en a évidemment pas. Il faut alors un quatrième satellite pour compenser cette imprécision et réduire l'incertitude. Pour pouvoir utiliser un système de positionnement par satellite, il faut donc un minimum de quatre satellites : trois pour la position et un pour la synchronisation (Tribu, 2021).

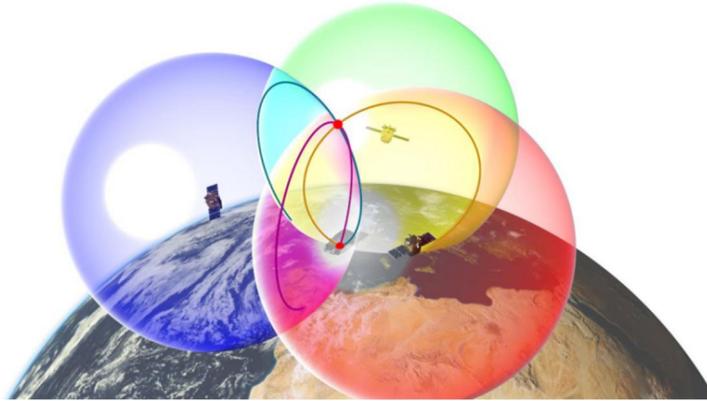


Figure 4 : Principe de trilatération. (mailto:thierry.chapuis@cnes.fr)

1.2.4 Mesure de Pseudo-distance

Les mesures du système GNSS sont des mesures de pseudo-distances. On utilise le terme pseudo car il ne s'agit pas d'une mesure directe de la distance mais plutôt du temps de parcours du signal qui est ensuite convertit en distance en le multipliant par la vitesse du signal. Elles se font de deux manières. Par des mesures de codes ou par des mesures de phase.

1.2.4.1 Mesure de code

Ce sont les pseudo distances (communément appelées observations du code) qui permettent d'établir instantanément la position. Elles sont dérivées de la comparaison des codes transmis par le satellite et leurs répliques générées par le récepteur. Les codes se composent d'une série d'éléments binaires de valeur 1 ou 0 appelés chips (Sammuneh, 2003). Voir figure 5.

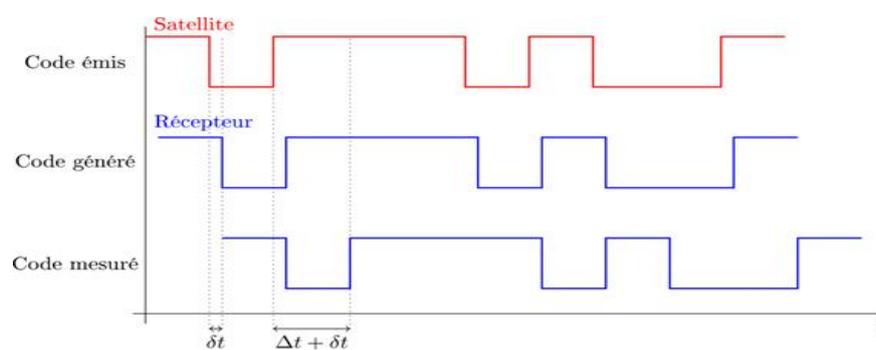


Figure 5 : Mesure de code. (Réseau -Orphéon.fr)

La pseudo distance est égale à la différence de temps entre le moment où le code est émis par un satellite et celui où il atteint un récepteur multipliée par la vitesse de la lumière comme le montre l'équation 1.

$$P = c (t_r - t_t) \tag{1}$$

où P représente la pseudo distance, c , la vitesse de la lumière, t_r , le temps de réception du signal et t_t , le temps d'émission du signal.

1.2.4.2 Mesure de phase

Les signaux sont émis en permanence sur les fréquences porteuses f_1 et f_2 . Les ondes radio se propagent dans l'espace à la vitesse de la lumière, la longueur d'onde des signaux porteurs se calcule selon l'équation 2:

$$\lambda = \frac{c}{f} \tag{2}$$

Où λ représente la longueur d'onde en mètres (m), c , la vitesse de la lumière en mètres par seconde (m/s) et f , la fréquence porteuse en Hertz (Hz).

Les récepteurs qui enregistrent les observations de phase, mesurent la fraction d'une longueur d'onde dès qu'ils acquièrent le signal d'un satellite, puis additionnent de manière continue par la suite un nombre entier de cycles. A l'instant initial de l'acquisition du signal, le nombre entier de cycles entre le satellite et le récepteur du signal est inconnu et de ce fait est appelé ambiguïté. Donc, l'observation de phase et l'ambiguïté de phase représentent ensemble la distance satellite-récepteur, d'où l'équation 3 (Sammuneh, 2003)

$$\varphi = \rho + N \lambda + \text{erreurs} \tag{3}$$

Où ρ représente la distance entre le satellite (temps de transmission) et le récepteur (temps de réception) et N le nombre entier inconnu de cycles que le récepteur ne peut pas mesurer (ambiguïté entière).

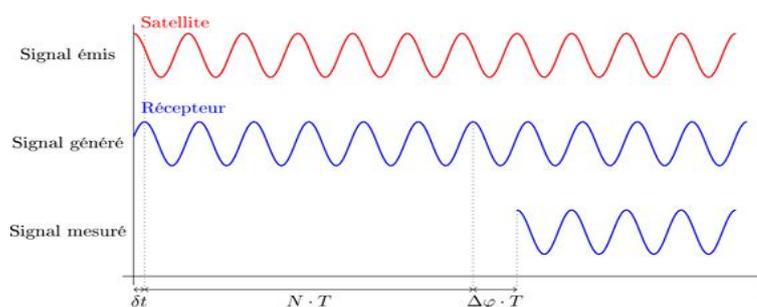


Figure 6 : Mesure de Phase. (Réseau -Orphéon.fr)

1.2.4.3 Message de navigation

En plus d'être modulé par la phase à l'aide du code, les signaux GNSS sont également modulés à l'aide du message de navigation. Le message de navigation contient des informations qui sont exploitées par le récepteur, citons entre autres :

- la position des satellites (éphémérides) et des informations le concernant (état du satellite) ;
- les éléments permettant l'obtention de la date de l'émission du signal, dans l'échelle du temps du satellite ;
- des informations plus générales: modèle paramétrique global de l'ionosphère (pour la correction de son effet), almanach de tous les satellites.

1.2.5 Avantage du GNSS

En offrant la possibilité de mixer les signaux des différentes constellations de satellites, les récepteurs GNSS permettent de calculer une position plus stable mais aussi de travailler dans des endroits plus restreints. En effet, les bâtiments, les arbres etc. créent des masques qui empêchent les récepteurs de recevoir correctement les signaux des satellites. Plus un récepteur est en capacité de recevoir plusieurs signaux, moins ces masques empêcheront de travailler. Ajouter les constellations de satellites Glonass, Galileo et Beidou à ceux de la constellation GPS permet ainsi d'augmenter la possibilité de recevoir un nombre de signaux suffisant et de meilleure qualité. D'où une meilleure disponibilité du positionnement précis dans les zones masquées (ORPHEON, 2021).

1.2.6 Limites de précision du positionnement GNSS

La grande distance parcourue par le signal entre les satellites et les récepteurs entraîne un certain nombre de phénomènes qui influencent la précision du positionnement par GNSS. Les conditions de réceptions au niveau du récepteur engendrent également d'autres phénomènes. C'est donc la conjonction des tous ces facteurs qui contribue à dégrader la précision. Parmi toutes ces sources d'erreurs, la réfraction atmosphérique, responsable de l'allongement ionosphérique et troposphérique, ainsi que les erreurs d'orbites et d'éventuels multi-trajets (que nous aborderons dans la deuxième partie).

- **La précision des orbites des satellites GNSS**

L'ensemble des satellites utilisés pour le positionnement se déplacent en permanence autour de la terre. Les paramètres de position sont actualisés chaque semaine dans les almanachs qui sont diffusés par les satellites et permettent à chaque récepteur GNSS de déterminer les trajectoires et les marches d'horloge des satellites qu'il utilise. Bien que leur position soit

prévue à l'avance leur position réelle est légèrement différente et cette erreur va aussi naturellement se répercuter sur la position affichée par le récepteur. (ORPHEON, 2021).

- **La réfraction atmosphérique**

Le signal des satellites rencontre l'ionosphère, une première zone qui entoure la terre. Le signal GNSS doit pénétrer cette couche sur son trajet qui entraîne une perturbation de la vitesse de l'onde électromagnétique qui se propage. Le temps de trajet mis par l'onde GNSS est ainsi modifié d'une durée inconnue, nommée délai ionosphérique. Ensuite le signal rencontre la troposphère qui est la couche basse de l'atmosphère. Le temps de propagation de l'onde GNSS est alors affecté par la teneur en vapeur d'eau de cette couche. En pratique les conditions météorologiques et les épaisseurs troposphériques diffèrent suivant l'endroit où l'on se trouve (ORPHEON, 2021). Le tableau I donne l'ordre de grandeur des principales sources d'erreurs.

Tableau I: Ordre de grandeur des sources d'erreurs GNSS.

Source d'erreur	Influence absolue
Orbites	Entre 2 et 50 mètres
Horloge du satellite	entre 2 et 100 m
Ionosphère	Entre 50 cm et plus de 100 mètres
Troposphère	Entre 1 et 50 cm
Multi-trajet du code	de l'ordre du mètre
Multi-trajet de la phase	quelques centimètres
Antenne	quelques centimètres

Un autre effet de l'ionosphère sur la propagation du signal de navigation est la scintillation ionosphérique (Foucault, 2020).

1.3 GENERALITES SUR LE PHENOMENE DE SCINTILLATION IONOSPHERIQUE

1.3.1 Les relations soleil- terre

La proximité du Soleil avec notre planète Terre lui confère un caractère unique en ce qu'il affecte directement l'environnement de notre planète. En effet, le rayonnement solaire est la cause principale de l'ionisation des particules neutres de la haute atmosphère. La compréhension des phénomènes que l'on observe dans l'environnement de la terre

particulièrement dans l'ionosphère nécessite donc une bonne connaissance de la physique du soleil et de son influence sur l'environnement terrestre.

1.3.1.1 Le Soleil

Le Soleil est l'une des milliards d'étoiles qui peuplent notre galaxie. Cette grosse boule incandescente $3,3 \cdot 10^5$ fois plus massive que la Terre est principalement constituée d'hydrogène (90%), d'hélium (8%) et d'autres éléments sous forme ionisée (2%) (Chen, 2001) L'observation des taches sur la surface du soleil a mis en évidence une activité appelée activité solaire. L'étude de l'évolution des taches solaires montre qu'elle a un caractère cyclique, passant par un minimum et un maximum appelé cycle d'activité solaire dont la durée moyenne est de 11 ans.

1.3.1.1.1 L'activité solaire

Le Soleil présente une activité magnétique variable et dynamique (Lilensten & Bornarel, 2001). On distingue trois périodes d'activité solaire. Le maximum solaire, le minimum solaire et l'activité solaire modérée.

1.3.1.1.2 L'éruption solaire

Une éruption solaire ou "solarflare" est une brusque dissipation d'énergie (entre 10^{19} et 10^{25} Joules) qui se manifeste généralement au voisinage d'une tâche solaire. Elle se produit lorsque l'énergie piégée dans les champs magnétiques associés aux taches solaires est brutalement libérée. Cette énergie est libérée sous la forme d'un rayonnement électromagnétique et s'accompagne d'un flux de particules à haute énergie dans l'espace, lesquelles mettent deux à quatre jours pour atteindre l'orbite de la Terre. L'éruption provoque une augmentation brutale de la concentration électronique de l'ionosphère. Les catégories d'éruption solaire sont désignées par les lettres A, B, C, M et X. Les éruptions de catégories A, B et C sont généralement d'intensités trop faibles pour affecter l'environnement terrestre. Par contre les éruptions de la catégorie M peuvent provoquer des perturbations du champ magnétique terrestre. Les plus puissantes sont celles de classe X et peuvent avoir des impacts très importants sur le champ magnétique terrestre, interrompre les communications radio, perturber le bon fonctionnement des satellites. Par exemple, en décembre 2006, la précision du réseau GPS a été altérée durant plusieurs heures par une éruption solaire provoquant des défaillances des réseaux de transport d'électricité et émettant des particules hautement énergétiques pouvant nuire à la santé des astronautes (Cannat, 2014)

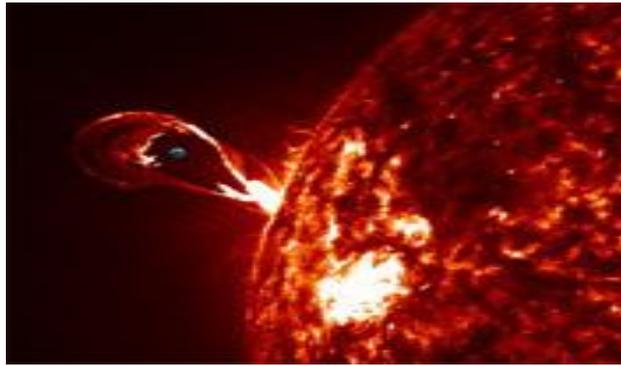


Figure 7 : une éruption typique. La Terre (petite boule bleue) a été ajoutée pour illustrer l'échelle gigantesque du phénomène (Amari *et al.*, 2014)

1.3.1.1.3 Le vent solaire

Le vent solaire est un vent qui souffle du Soleil en permanence jusqu'aux confins du système solaire et délimitant ainsi une zone d'influence appelée héliosphère. Ce vent s'écoule avec une partie du champ magnétique solaire qui modifie la configuration du champ magnétique terrestre le confinant dans une cavité appelée **magnétosphère**. Il existe deux types de vent solaire : le vent lent et le vent rapide (Bame *et al.*, 1993).

1.3.1.2 L'environnement terrestre

1.3.1.2.1 Le champ magnétique terrestre

Le champ magnétique terrestre, aussi appelé bouclier terrestre, est un immense champ magnétique qui entoure la Terre, de manière non uniforme du fait de son interaction avec le vent solaire. Il peut être vu comme celui d'un aimant droit inclinée d'environ 12° par rapport à son axe de rotation et dont le centre se trouve à quelques centaines de kilomètres du centre de la terre. Les variations du champ magnétique mesuré à la surface de la Terre sont dues à des courants de sources externes et à des courants induits par la Terre elle-même. Les jours où la variation en fonction du temps est régulière sont qualifiés de jours calmes que l'on désigne par la lettre *q* (quiet). En revanche, les jours où la variation est irrégulière sont qualifiés de jours perturbés (orage magnétique) et désignés par la lettre *d* (disturbed) (Matsushita, 1968)

1.3.1.2.2 Atmosphère terrestre

L'atmosphère terrestre peut être divisée en plusieurs couches (voir figure 8) possédant des propriétés physiques particulières. Selon le profil de température on a: la troposphère région la plus basse de l'atmosphère terrestre rencontrée à partir du sol de 0 à 50 Km d'altitude, la stratosphère, la mésosphère, la thermosphère et l'exosphère. Cependant en géodésie spatiale on distingue deux couches selon leur activité électrique. La neutrosphère électriquement

neutre et l'ionosphère (nom proposé par Watson-Watt en 1929) partie ionisée de la thermosphère.

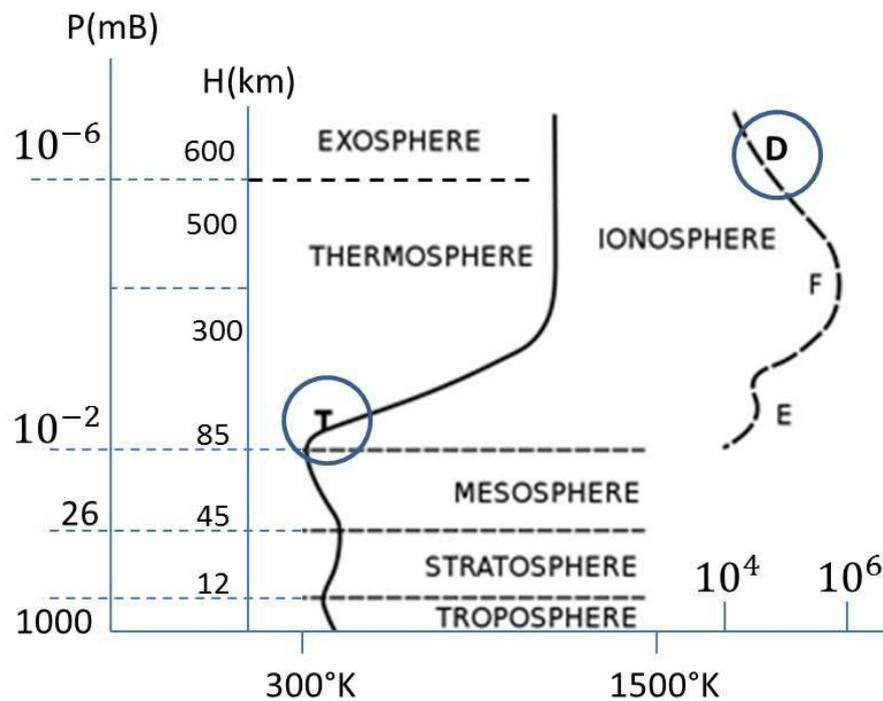


Figure 8 : Structure de l'atmosphère terrestre. (<https://claude-gimenes.fr/>)

1.3.2 L'ionosphère

1.3.2.1 Définition

L'ionosphère peut se définir comme étant la région de l'atmosphère terrestre où l'effet de la quantité d'électron est significatif sur la propagation des ondes radios (Paget, 2013). En effet, l'ionosphère est un plasma, c'est-à-dire un gaz constitué d'ions positifs et d'électrons résultant de la dissociation des particules neutres de la haute atmosphère par les rayons UV et X du soleil. Ces particules chargées (ions et électrons libres) sont capables d'interférer avec une onde électromagnétique incidente et d'influencer sa propagation. L'indice de réfraction du plasma dépend du nombre de particules ionisées présentes par unité de volume (densité d'ionisation). La densité d'ionisation du plasma est généralement inhomogène, il y a alors des variations spatiales de son indice de réfraction: On parle d'irrégularité d'indice.

1.3.2.2 Morphologie de l'ionosphère

Des sondages radioélectriques effectués à partir du sol révèlent que l'ionosphère est subdivisée en des régions possédant des concentrations électroniques différentes. Suivant les altitudes croissantes on distingue la couche D, E et F. Ces couches ont été découvertes et

nommées par Appleton (1947). Les limites supérieures et inférieures de l'ionosphère ainsi que celles des couches qui composent l'ionosphère ne sont pas clairement définies. On rencontre selon les ouvrages par exemple une ionosphère située entre 80 et 1000 km d'altitude (Lassudrie-Duchesne *et al.*, 2010), entre 50 et 1000 km (Paget, 2013), entre 70 et 1000 km d'altitude (Galmiche, 2019). Néanmoins, nous considérons que la basse ionosphère débute vers 60 km d'altitude (Ayachi, 1993). La figure 9 présente la structure de l'ionosphère.

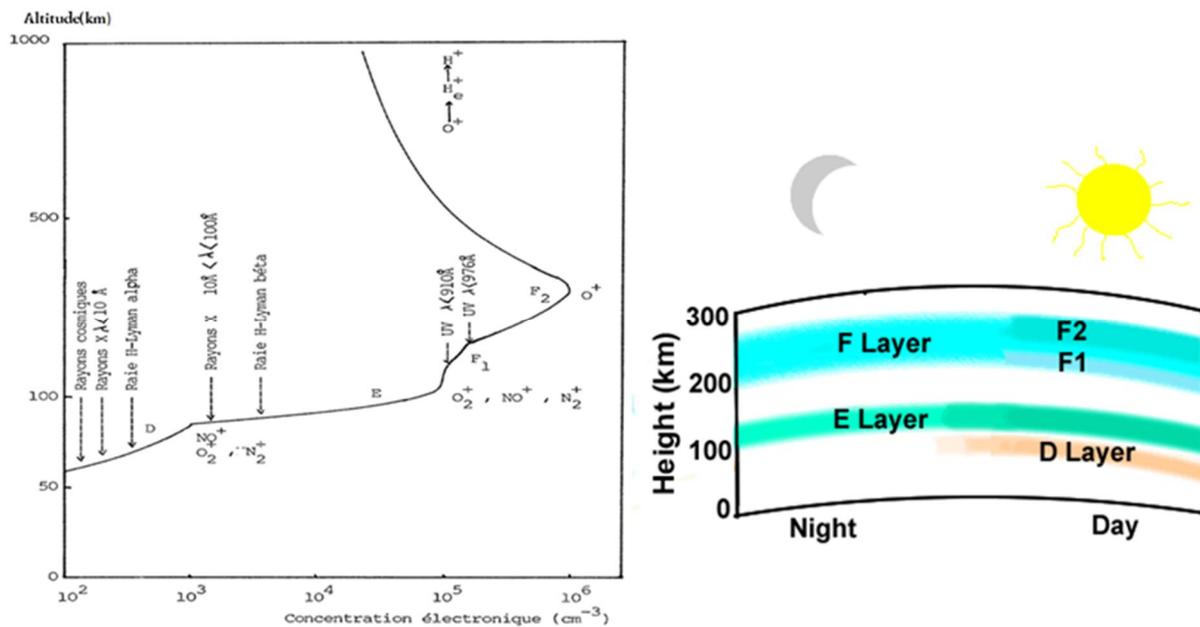


Figure 9: Morphologie et couches de l'ionosphère.

La figure 9 (à gauche) montre la structure de l'ionosphère en fonction de la densité électronique.

1.3.2.2.1 La couche D

Cette couche peu dense, est la région la plus basse, elle se situe entre environ 60 et 90 km d'altitude. La concentration d'électrons dans cette région est comprise entre 100 et 1000 e/cm³. La formation de la région D est principalement octroyée à :

- l'ionisation du monoxyde d'azote par la raie solaire de l'hydrogène Lyman α située à 1215,7Å
- les rayons X durs de longueur d'onde inférieure à 10 Å ionisant les molécules O₂ et N₂ peuvent également constituer une source d'ionisation non négligeable,
- d'autres sources d'ionisation telles que les rayons cosmiques galactiques ionisant les espèces O₂ et N₂ ou encore les rayons UV solaires de longueur d'onde inférieure à 1118Å photo-ionisant la molécule d'oxygène dans son état métastable O₂ sont aussi à prendre en considération.

La couche D absorbe les ondes radio (inférieur à 1 Hz). Cette région joue un rôle très important dans la propagation des ondes électromagnétiques à très basses fréquences (TBF). En effet, c'est dans cette région que les ondes du système de radionavigation Oméga (10 ; 11,33 et 13,6 kHz) se réfléchissent (Ayachi, 1993)

1.3.2.2.2 La couche E

La couche E renvoyant au champ électrique est moyennement dense et s'étend de 90 à 150 km d'altitude, avec un pic d'ionisation entre 100 et 120 km. Les éléments chargés majoritairement présents dans cette couche sont les ions O_2^+ , N_2^+ et NO^+ (Davies, 1990 ; Hunsucker & Hargreaves, 2003). La concentration en électron de cette région est de 1000 à 100 000 e/cm^3 et sa formation est due à l'ionisation des constituants atmosphériques O_2 , N_2 et O par le rayonnement mou de longueur d'onde comprise entre 10 et 100 Å et l'ionisation de la molécule O_2 par la radiation H-Lyman β située à 1025,7 Å. Ces radiations peu énergiques se trouvent donc presque totalement absorbées au-dessus de 90 km d'altitude (Ayachi, 1993) Dans cette région, il existe une couche particulière qui est beaucoup plus ionisée et qui s'appelle 'E-sporadique'. Elle se présente sous forme de nuages de densité très localisés. Ces nuages sont susceptibles de réfléchir les signaux aux fréquences élevées (jusqu'à 50, 60, 80 MHz) (Ackah *et al.*, 2011).

1.3.2.2.3 La couche F

La couche F est située entre 150 km d'altitude et le bas de la plasmasphère (zone au-delà de 1000 km d'altitude, où l'ionosphère rencontre les couches basses de la magnétosphère) (Galmiche, 2019). C'est la région de l'ionosphère où l'ionisation est relativement plus forte, la concentration électronique y est de l'ordre de $10^6 e.cm^{-3}$. La densité électronique augmente au lever du soleil, atteint très rapidement son maximum, diminue progressivement jusqu'au coucher de soleil et atteint son minimum juste avant le lever du soleil. les mouvements des ions et électrons sont contrôlés par les champs électriques issus du couplage vent solaire/magnétosphère et qui se projettent le long des lignes de champ magnétique (Ackah *et al.*, 2011). Dans des circonstances particulières (l'heure locale, le jour de l'année ou la latitude moyenne), la couche F se scinde en deux sous régions F1 et F2.

- F1 entre 150 et 180 km (juste au-dessus de la couche E) est une région de transition entre les ions moléculaires O_2^+ , N_2^+ et NO^+ et les ions atomiques O^+ et H^+ . Sa formation est due à l'action photo-ionisante des radiations solaires de longueurs d'onde comprises entre 100 et 910 Å produisant en faibles quantités les ions N_2^+ et O^+ .

- La région F₂ au-dessus de 180 km correspond au maximum de concentration de O⁺, ces ions dominent toutes les autres espèces ioniques à cette altitude. Cette région joue un rôle très important dans la propagation des ondes radioélectriques de fréquences comprises entre 5 et 10 MHz (Ayachi, 1993) C'est la couche qui supporte les communications à haute fréquence sur de longues distances. Ces variations sont larges, irrégulières particulièrement pendant les orages magnétiques. La condition de propagation des ondes radio y est donnée par une fréquence critique appelée fréquence plasma (voir équation 4.1) :
$$f_p = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{n_e q_e^2}{m_e \epsilon_0} \right)^{1/2} \quad (4.1)$$

En remplaçant par leurs valeurs q_e (la charge électrique élémentaire $1,6022 \cdot 10^{-19}$ Coulombs), m_e (la masse de l'électron égale à $9,1095 \cdot 10^{-31}$ kg) et ϵ_0 (la constante diélectrique du vide égale à $8,8542 \cdot 10^{-12}$ Farad/mètre) on obtient l'expression simplifiée de la fréquence plasma en MégaHertz (MHz). Equation 4.2 :

$$f_p = 9\sqrt{n_e} \quad (4.2)$$

Avec n_e nombre d'électrons par unité de volume en (électron/m³). Cette équation montre bien que la fréquence du plasma est liée à la densité électronique de la couche. Les signaux peuvent traverser la couche F2 seulement si leur fréquence est supérieur à la fréquence plasma, autrement ils sont réfléchis (Ackah *et al.*, 2011)

La figure 9 (à droite) montre la manière dont les sous couches de l'ionosphère se recombinent selon le cycle jour-nuit. La densité d'électron est plus faible la nuit, la recombinaison des électrons peut entraîner la disparition de la couche D et de la subdivision F1/ F2.(Paget, 2013).

1.3.2.3 L'Instabilité de Rayleigh-Taylor (IRT) et bulle de plasma

La couche F contient la majorité du plasma ionosphérique qui donne naissance au phénomène de scintillation. Dans le plasma ionosphérique des "**bulles**" de faible densité d'ionisation apparaissent fréquemment après le coucher du soleil dans la partie de l'ionosphère comprise entre 200 km et 400 km d'altitude puis remontent à des altitudes supérieures en prenant la forme d'aigrettes (Figure 10).

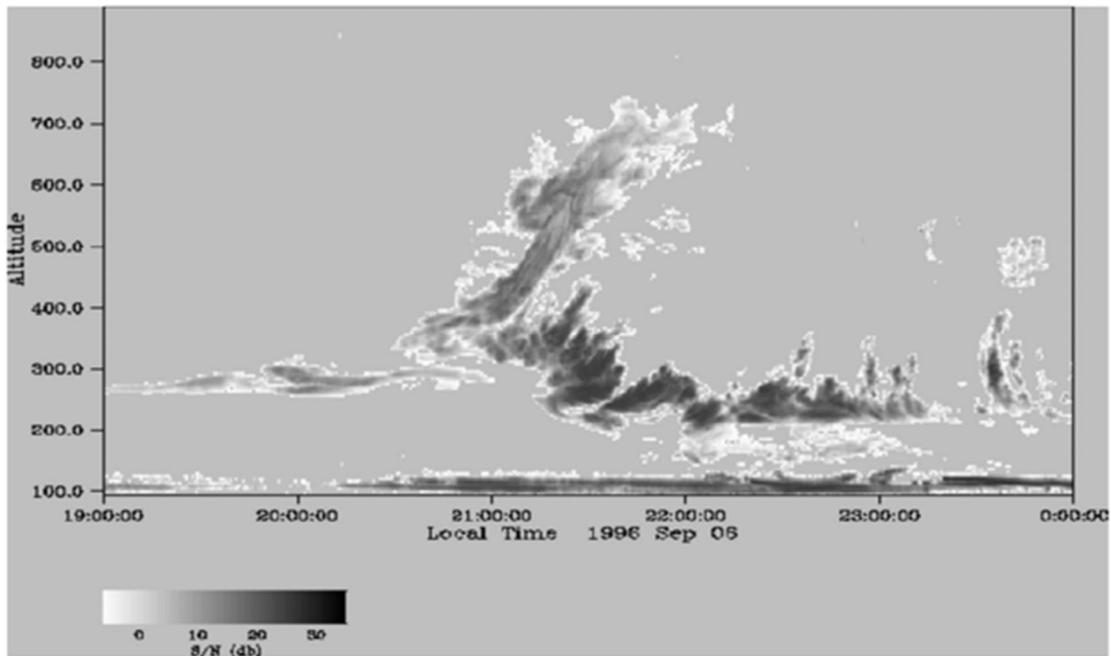


Figure 10 : Bulle de plasma ionosphérique (Formation Rabat Janvier 2017, campus de Brest, <https://docplayer.fr/>).

Dans le cas de l'ionosphère équatoriale, il est largement admis que le mécanisme physique d'instabilité de Rayleigh-Taylor (IRT) constitue la cause première des irrégularités d'ionisation qui se développent après le coucher du soleil. L'instabilité de Rayleigh-Taylor (IRT) est engendrée par la superposition de deux fluides de densités différentes dans un champ de forces constant et se traduit par la situation instable dans laquelle le fluide plus dense repose sur le moins dense (Kelley & Heelis, 1989). Alors, la moindre perturbation occasionnera la remontée du fluide le moins dense à la surface et il se développera à l'interface des deux fluides, des "bulles" qui entraîneront le moins dense vers le haut (Lassudrie-Duchesne *et al.*, 2010).

Le plasma ionosphérique transmet les ondes hautes fréquences et réfléchit les ondes basses fréquences. Ses irrégularités perturbent la transmission des ondes radio. C'est le phénomène de la scintillation ionosphérique.

1.3.3 La scintillation ionosphérique

1.3.3.1 Définition et origine

La scintillation ionosphérique est la variation rapide d'amplitude et de phase des signaux radio qui traversent l'ionosphère lors de leur propagation d'un émetteur dans l'espace à un récepteur au sol. L'origine de ce phénomène se trouve dans l'ionosphère où l'on assiste à la

formation d'irrégularités d'indice, de « bulles » de plasma de concentration en électron très différente du milieu qui l'entoure. La scintillation ionosphérique survient sur les données, lorsque le signal GNSS rencontre ces bulles. Il subit une forte réfraction voir une diffraction de sorte qu'un observateur au sol ne capte plus le rayon direct venant du satellite, mais une figure de diffraction résultant de la recombinaison des différents rayons issus de la zone d'irrégularités. Les vents atmosphériques peuvent entrainer les irrégularités d'ionisation à des vitesses de l'ordre de 100 à 200 m/s. par conséquent les figures de diffraction balayent 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 reliant l'émetteur au récepteur se déplacent au sein de la zone d'irrégularités à cause du mouvement du satellite, ce qui renforce en général le phénomène de scintillation (Lassudrie-Duchesne *et al.*, 2010).

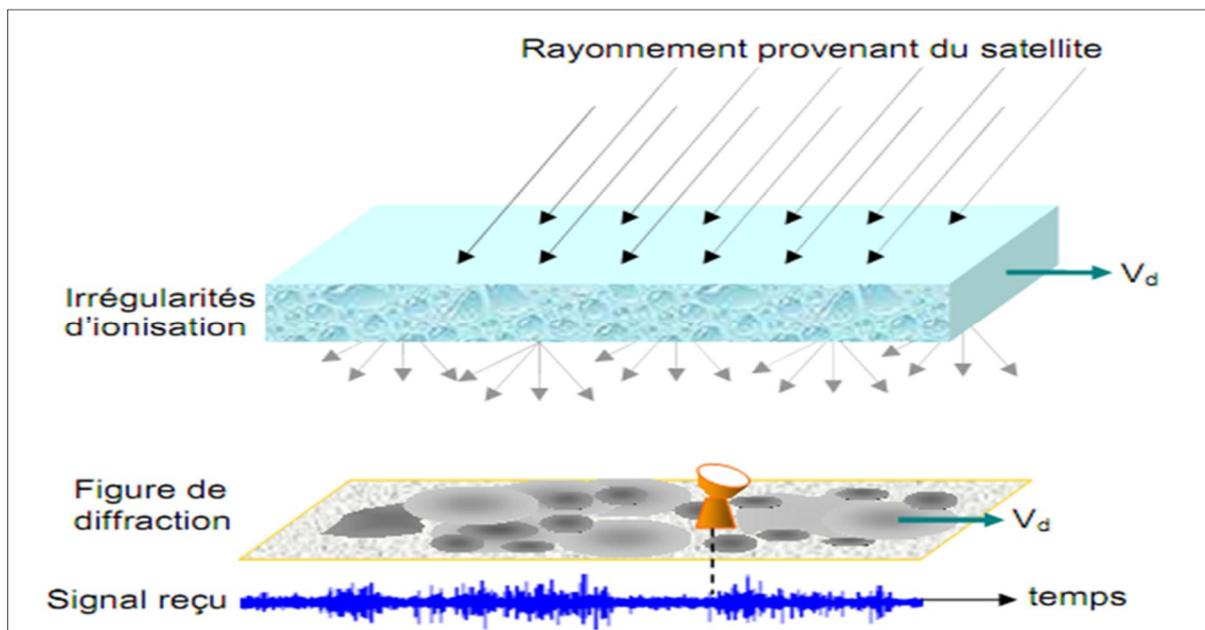


Figure 11 : Mécanisme de diffraction des ondes en provenance d'un satellite par des irrégularités d'ionisation de l'ionosphère. V_d représente la vitesse de dérive des irrégularités et de la figure de diffraction des ondes par rapport au récepteur.

1.3.3.2 Indices de scintillation

Un indice est une suite de valeurs discrètes destinées à fournir une information résumée, pertinente et fiable sur l'évolution dans le temps d'un phénomène. Pour quantifier et mesurer l'effet de la scintillation ionosphérique sur les signaux GNSS, divers indices de scintillation ont été définis. Les plus utilisés sont : S_4 pour caractériser la fluctuation d'amplitude et σ_ϕ pour la fluctuation de phase.

➤ S_4 est l'écart type normalisé par la moyenne des fluctuations de l'intensité I du signal reçu

$$S_4 = \sqrt{\frac{\overline{I^2} - \bar{I}^2}{\bar{I}^2}} \quad (5.1)$$

➤ σ_φ représente l'écart type de la phase φ

$$\sigma_\varphi = \sqrt{\overline{\varphi^2} - \bar{\varphi}^2} \quad (5.2)$$

Avec φ la phase de la porteuse, I l'amplitude du signal et \bar{I} la moyenne temporelle de I .

Des travaux scientifiques réalisés en différents lieux et à des époques différentes, révèlent que l'intensité des événements de scintillation varie, entre autre, avec la fréquence d'émission du signal, la position géographique, la saison, l'heure locale et l'activité solaire. Cette dépendance est illustrée par la Figure 12.

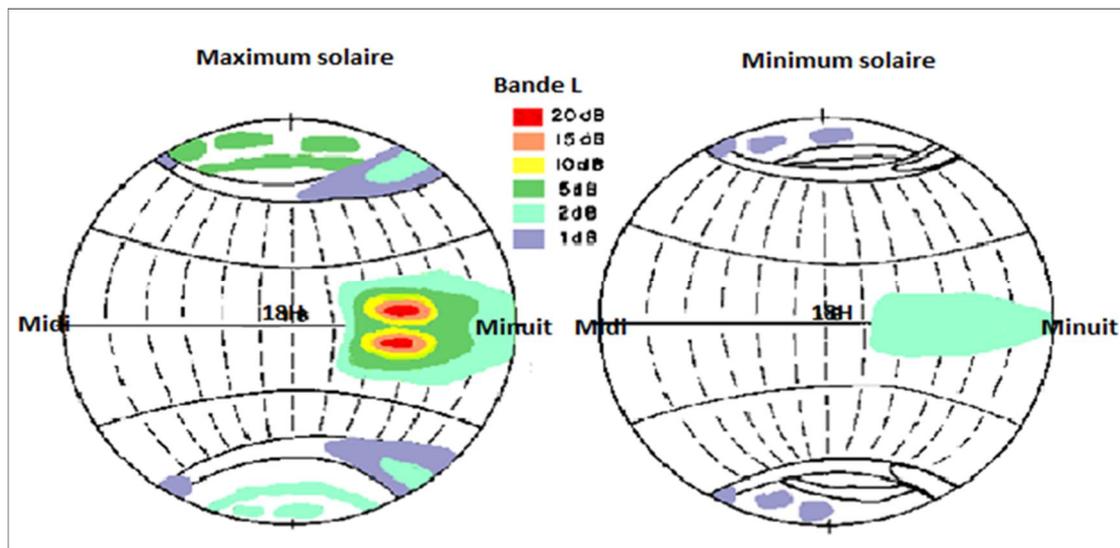


Figure 12: Profondeur d'évanouissement en bande L dû à la scintillation ionosphérique en période de maximum et de minimum d'activité solaire (Basu *et al.*, 2002).

- **Variation avec la localisation géographique**

La scintillation ionosphérique est plus marquée dans deux régions du globe. Aux basses latitudes dans la région équatoriale centrée à $\pm 20^\circ$ de l'équateur magnétique et dans la région polaire aux latitudes élevées (au-dessus de 70°) (Aarons, 1982). Cependant l'ionosphère est moins épaisse au niveau des pôles qu'à l'équateur ce qui réduit la magnitude de la scintillation (Walter *et al.*, 2010). Dans ces deux secteurs la scintillation ionosphérique affecte les signaux jusqu'aux fréquences gigahertziennes tandis qu'aux moyennes latitudes elle est rare, liée à des extensions de zones équatoriales et polaires ou à des tempêtes ionosphériques sévères et affecte particulièrement les signaux métriques (Ackah *et al.*, 2011 ; Paget, 2013).

- **Variation avec le cycle solaire**

D'une manière générale, l'intensité et la probabilité d'occurrence des scintillations sont plus fortes en période de maximum de l'activité solaire. 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 (Lassudrie-Duchesne *et al.*, 2010)

- **Variation saisonnière et diurne**

Otsuka *et al.*(2006) ont montré que l'occurrence de la scintillation ionosphérique est importante en équinoxes (Mars-Avril et Septembre-Octobre) avec un taux plus élevé en Mars-Avril qu'en Septembre-Octobre. D'autre part Kumar & Gwal (2000) montrent que le pourcentage d'occurrence est maximal autour de 2200TL pendant les équinoxes et le solstice d'hiver alors qu'au solstice d'été l'occurrence amorce sa croissance autour de cette même heure et atteint son maximum autour de 0200TL.

DEUXIEME PARTIE :

MATERIEL ET METHODES

2.1 MATERIEL

2.1.1 Matériel de collecte des données

L'étude a été effectuée à partir des données collectées en 2017 à la station GNSS de Korhogo. Nous avons travaillé uniquement avec les jours magnétiquement calmes afin d'éviter les effets d'orages magnétiques sur la scintillation ionosphérique. Le dispositif expérimental est présenté par la figure 13. IL est composé d'un récepteur et d'un système d'acquisition numérique assurant le traitement numérique des données provenant du récepteur.

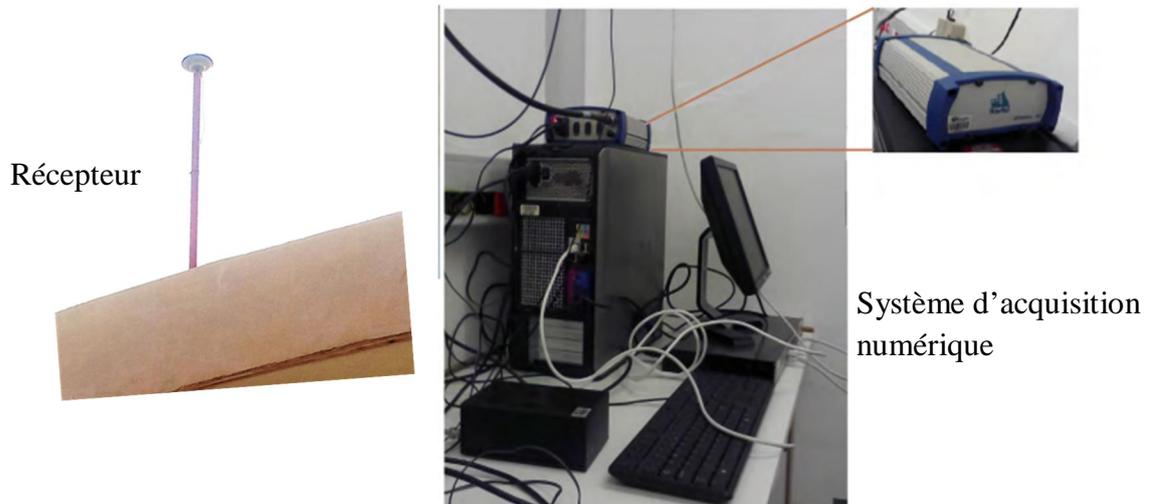


Figure 13: Matériel de collecte de données GNSS

2.1.2 Matériel de traitement et d'analyse des données

Après avoir extraire les données, le tableur Excel a été utilisé pour un traitement. Le logiciel de programmation IDL a permis de faire les moyennes des S_4 par minute. Ensuite les courbes ont été tracées avec le logiciel Python.

2.2 METHODES

2.2.1 Méthodologie de collecte des données

Les données de scintillation ont été enregistrées toutes les 60s (1 min) dans un fichier «ismr» par le système d'acquisition. Après une heure de temps, le système change de fichier ismr puis tous les ismr sont sauvegardés dans des dossiers quotidiens. Chaque dossier journalier contient donc 24 ismr indiqués par les lettres **A, B, C, ..., X** en absence d'interruption du système d'acquisition. Dans le cas contraire certains ismr sont vides ou totalement absents du

dossier de données. Les ismr contiennent 28 paramètres de base. Quelques-uns de ces paramètres sont indiqués dans le tableau II.

Tableau II : Présentation des paramètres fournis par les fichiers ISMR.

paramètres contenu dans les fichiers	Instruction
week	La semaine
GPS Tow	Le temps local en seconde.
PRN	Numéro pseudo-aléatoire du satellite GNSS
Az	Angle d'azimut du satellite GNSS
Elv	Angle d'élévation du satellite GNSS
S ₄	L'indice brut de scintillation d'amplitude
S ₄ cor	L'erreur estimée sur le S ₄ brut en raison du bruit interne du récepteur
60 sec sigma	La scintillation de phase brute observée, calculée par l'écart type de la phase porteuse sur 1 min (σ_ϕ)
TEC	Quantité d'électron présente dans l'ionosphère sur une colonne de section unité (1m ²)

Seuls les paramètres S₄, Elv et GPS Tow ont été utilisés dans ce travail

2.2.2 Méthodologie de traitement des données

2.2.2.1 Extraction des données

- **Ouverture du dossier correspondant au jour calme recherché.**

Les données recueillies sont enregistrées sous forme de fichiers compressés dans des dossiers journaliers distincts. La nomenclature de chacun de ces dossiers est donnée par cinq chiffres dont les deux premiers désignent l'année et les trois autres le jour de l'enregistrement. Par exemple, toutes les données recueillies pendant les 365 jours de l'année 2017 sont enregistrées dans des dossiers nommés respectivement «17001» pour le premier jour, «17002» pour le second jour jusqu'à «17365» pour le dernier jour. On ouvre donc les dossiers correspondant aux jours calmes.

- Extraction du fichier ismr

Une fois le dossier journalier ouvert, on y trouve plusieurs types de fichiers compressés. On s'intéresse aux fichiers de type «ismr». La figure 14 montre le processus d'extraction des fichiers ismr à travers l'exemple du 04 juin (155^e jour de l'année 2017)

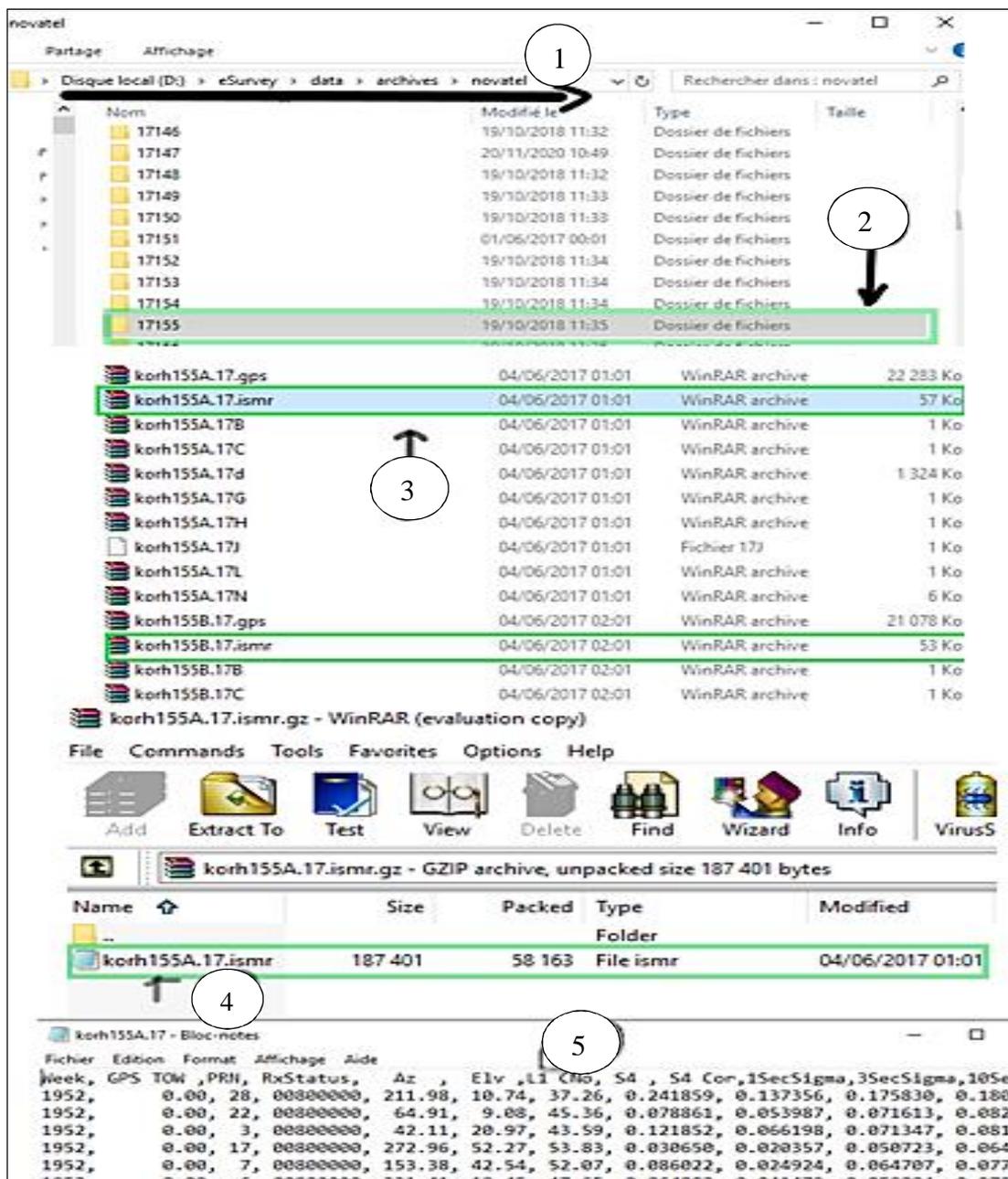


Figure 14 :Processus d'extraction des fichiers ismr

1 Chemin d'accès au dossier «novatel» contenant les dossiers quotidiens,

- 2 Une fois dans novatel repérer le dossier journalier «17XXX» recherché puis l'ouvrir,
- 3 Extraire l'ismr «...A...» à l'aide d'un logiciel de décompression tel que WinRAR
- 4 C'est à ce niveau qu'il faut copier l'ismr et le coller dans le dossier «FICHERS ISMR 17». Ainsi de suite jusqu'à l'extraction de tous les ismr (de A à X).
- 5 Une fois décompressé le fichier ismr peut s'ouvrir avec un éditeur (les paramètres contenus dans le fichier sont ceux présentés par le tableau II)

2.2.2.2 Prétraitement des données

- **Elimination des multi-trajets**

Au niveau des conditions de réceptions des signaux, il existe des phénomènes qui vont encore allonger légèrement le trajet du signal GNSS transmis par un satellite. Le signal peut être réfléchi par une surface ou des objets au sol avant d'être reçu par le récepteur. La position ainsi obtenue peut être décalée mais elle est surtout très instable car les satellites se déplaçant, l'angle d'incidence sur le réflecteur change, et la position se déplace autant. Seule la partie du signal qui se déplace le long du chemin direct du satellite est utile. Il faut par conséquent éliminer ces réflexions parasites pour mieux apprécier les effets de la scintillation ionosphérique. La figure 15 donne une explication schématique de la façon dont les multi trajets se produisent.

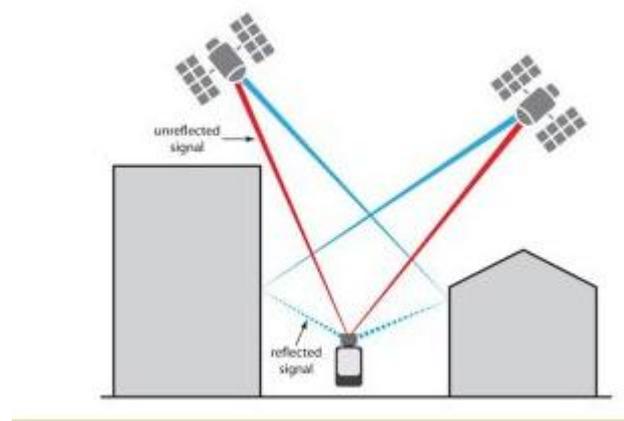


Figure 15:Multi-trajets

Pour éliminer les multi-trajets, le récepteur est placé au-dessus du toit de la bibliothèque et les signaux avec des angles d'élévation inférieur à 30° ont été éliminés sous Excel comme le recommandent Otsuka *et al.*(2006).

- **Fusion des fichiers Excel**

Pour un même jour, fusionner les 24 fichiers (A,..., X) pour en faire un seul représentatif du jour calme. Ensuite nous avons 3 fichiers représentant les trois jours calmes pour un mois. Il faut aussi fusionner ces trois fichiers pour en faire un seul représentatif du mois (enregistrer le fichier résultant en le désignant par le mois correspondant). Puis faire de même pour les trois autres mois. A la fin de cette étape nous avons 4 fichiers, un pour chaque saison. En effet les mois de mars, juin, septembre et décembre ont été utilisés pour représenter les quatre saisons. Notons que pour des défauts de données au mois de septembre, les données du mois d'octobre ont été utilisées en remplacement. Cependant cela n'a pas grande incidence sur les résultats car l'équinoxe de septembre est une saison qui contient à la fois le mois de septembre et celui d'octobre.

- **Construction des classes d'angles d'élévation**

L'angle d'élévation est divisé en 12 intervalles par pas de 5°

[30°-35°[; [35°-40°[; [40°-45°[; [45°-50°[; [50°-55°[; [55°-60°[; [60°-65°[; [65°-70°[; [70°-75°[; [75°-80°[; [80°-85°[; [85°-90°[.

- **Formation des fichiers textes**

Pour chaque classe, trier selon le temps (GPS Tow) dans l'ordre croissant. Ensuite, il faut convertir les temps donnés par GPS Tow en minute (de 0 à 1439) puis copier la colonne de temps (en min) et celle des S4 dans bloc-notes. Les fichiers textes ainsi constitués sont enregistrés dans un dossier spécifique.

2.2.3 Méthode d'analyse de la scintillation ionosphérique

2.2.3.1 Méthode d'analyse de l'occurrence de la scintillation

Le taux d'occurrence reflète correctement la fréquence de l'activité de scintillation et il a été largement adopté dans les recherches sur la scintillation. Le taux d'occurrence de la scintillation est défini comme le rapport du nombre de scintillations survenues ($S_4 > 0,2$) à la scintillation totale pendant une certaine période de temps, qui peut être un mois, un jour, une heure, etc. (Guo *et al.*, 2017). Dans cette section les taux d'occurrence de scintillements ont été calculés sur trois jours calmes pour étudier la relation entre la fréquence d'apparition de la scintillation ionosphérique et l'angle d'élévation du satellite. La formule utilisée est donnée par l'équation 6

$$\text{Taux d'occurrence} = \frac{\text{nombre de } S_4 > 0,2 \text{ (dans la classe } i)}{\text{nombre total de } S_4 \text{ de } i} * 100 \quad (6)$$

$i = [30^\circ-35^\circ[, \dots, [85^\circ-90^\circ[$.

Les taux d'occurrences obtenues sont représentés en fonction des classes d'angle d'élévation sous formes d'histogrammes avec le logiciel Python.

2.2.3.2 Méthode d'analyse de l'intensité et de la scintillation

Le récepteur peut capter plusieurs satellites, nous avons par conséquent plusieurs valeurs de S_4 pour une minute donnée. On fait donc la moyenne des S_4 pour chaque minute à l'aide du logiciel IDL. Avec le même logiciel nous évitons les désagréments dans les courbes en éliminant les minutes sans donnée de scintillation.

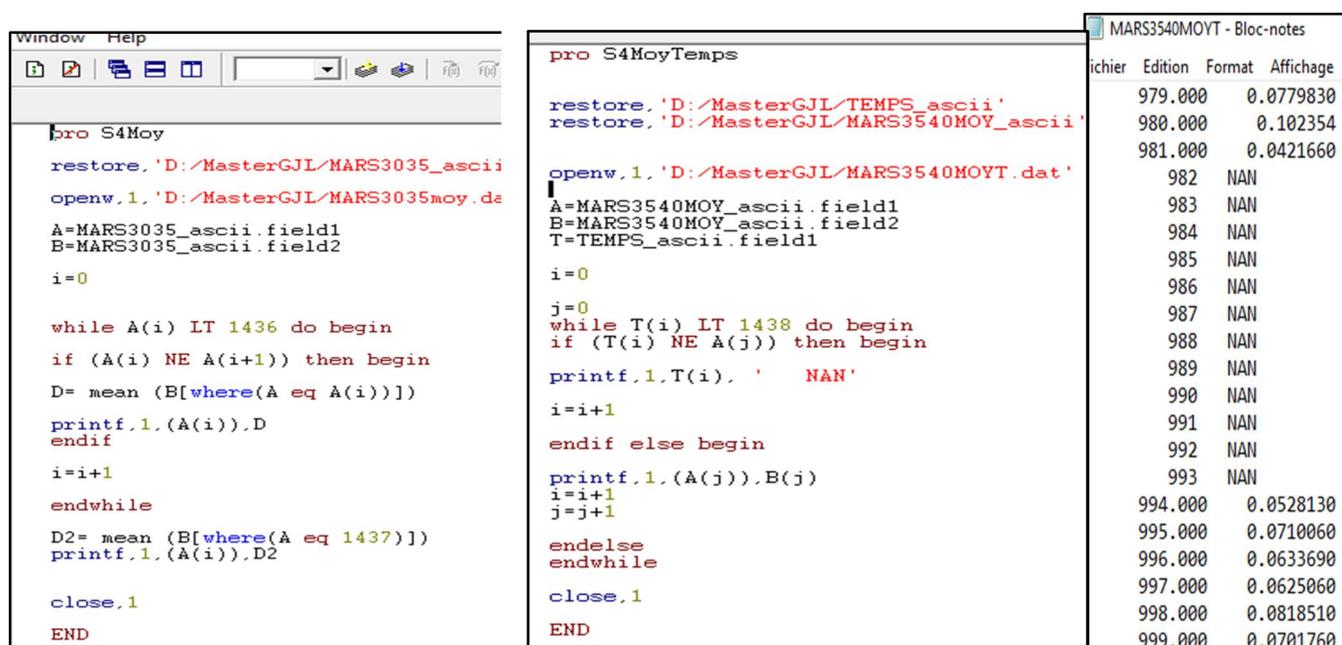


Figure 16 : Capture d'écran des programmes IDL (à gauche) et d'un prototype de fichier à la sortie (à droite).

NAN (Not A Number) correspond aux données absentes. Les fichiers de type texte sont utilisés avec python pour représenter l'indice de scintillation d'amplitude (S_4) en fonction du paramètre d'angle d'élévation (Elv) et du temps (GPS Tow). Ensuite en s'appuyant sur les critères de (Walter *et al.*, 2010 ; Romano *et al.*, 2011 ; Guo *et al.*, 2017) l'intensité de scintillation est classée en trois catégories comme l'indique le tableau III.

Tableau III : Les classes d'intensité de scintillation

Scintillation d'amplitude S_4	intensité de la scintillation
$S_4 < 0,2$	Sans scintillation
$0,2 < S_4 < 0,5$	Niveau moyen
$0,5 < S_4$	Niveau fort

En ce qui concerne l'étude saisonnière, nous avons rapproché puis comparé les différents histogrammes et courbes obtenus.

TROISIEME PARTIE :

RESULTATS ET DISCUSSION

3.1 RESULTATS

3.1.1 Variation du taux d'occurrence de la scintillation en fonction de l'angle d'élévation

Les résultats de l'analyse du taux d'occurrence de la scintillation ionosphérique en fonction de l'angle d'élévation du satellite sont donnés par les figures 17, 18, 19 et 20.

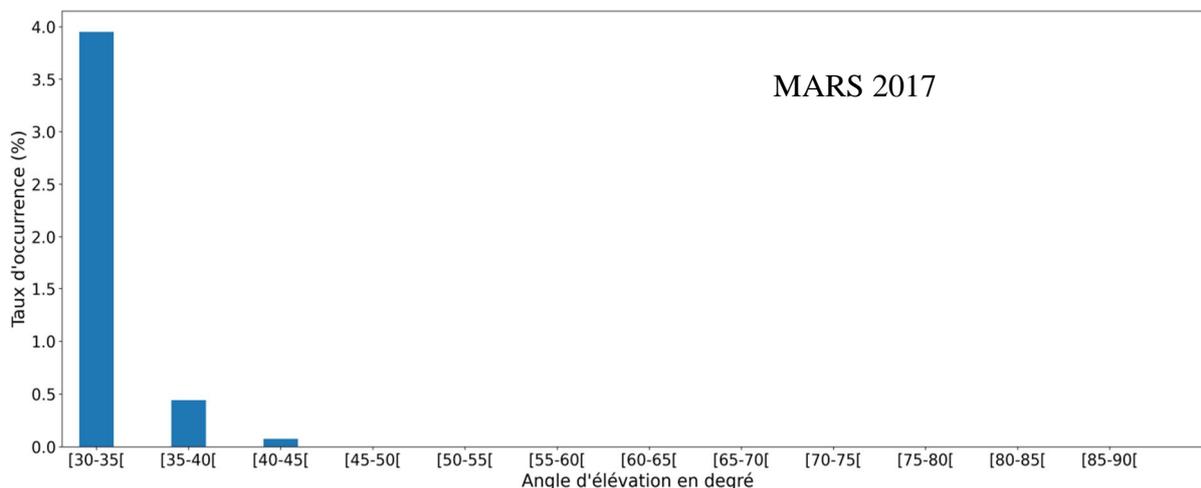


Figure 17 : Taux d'occurrence de la scintillation ionosphérique en fonction de l'angle d'élévation du satellite. Korhogo, mars 2017.

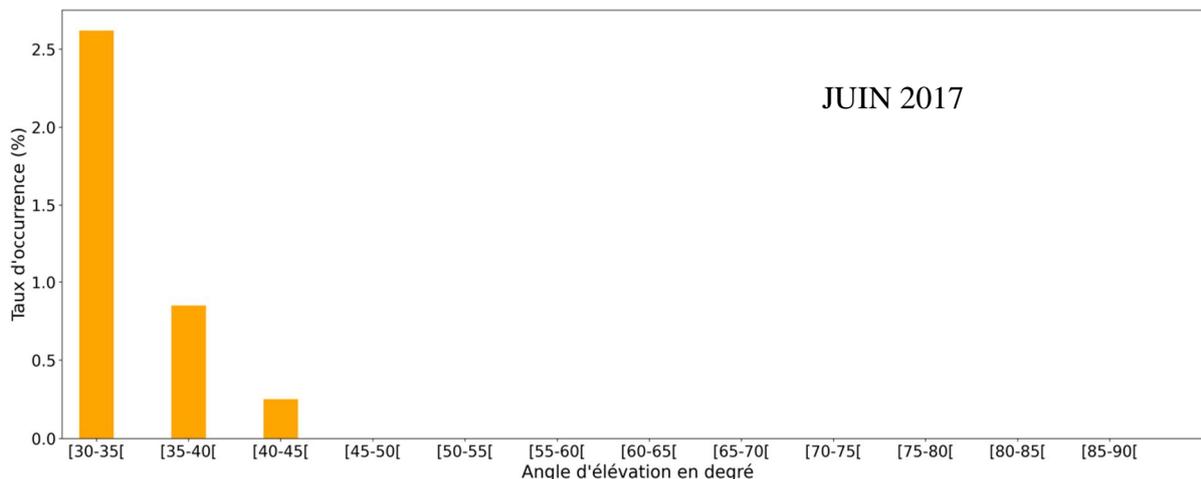


Figure 18 : Taux d'occurrence de la scintillation ionosphérique en fonction de l'angle d'élévation du satellite. Korhogo, juin 2017.

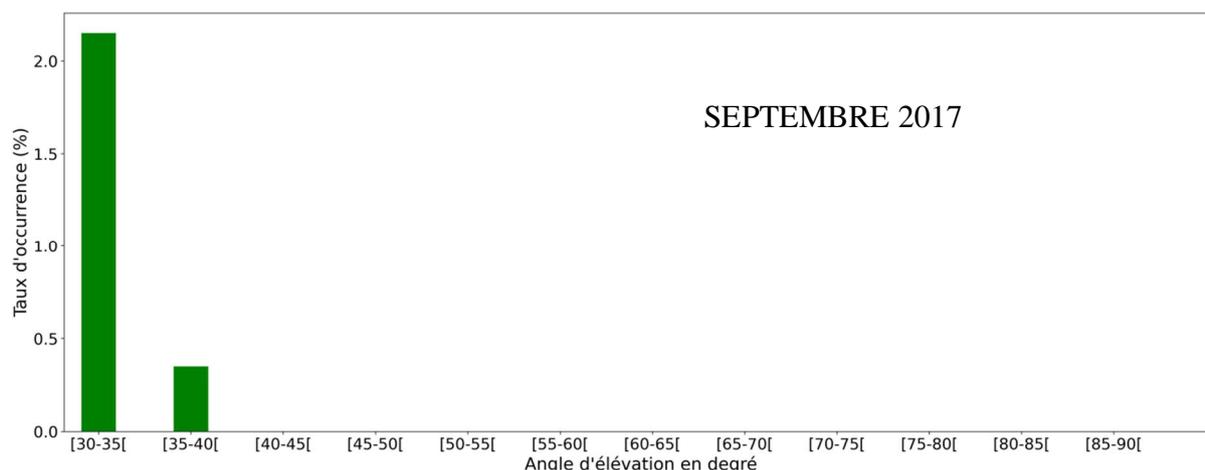


Figure 19 : Taux d'occurrence de la scintillation ionosphérique en fonction de l'angle d'élévation du satellite. Korhogo, septembre 2017

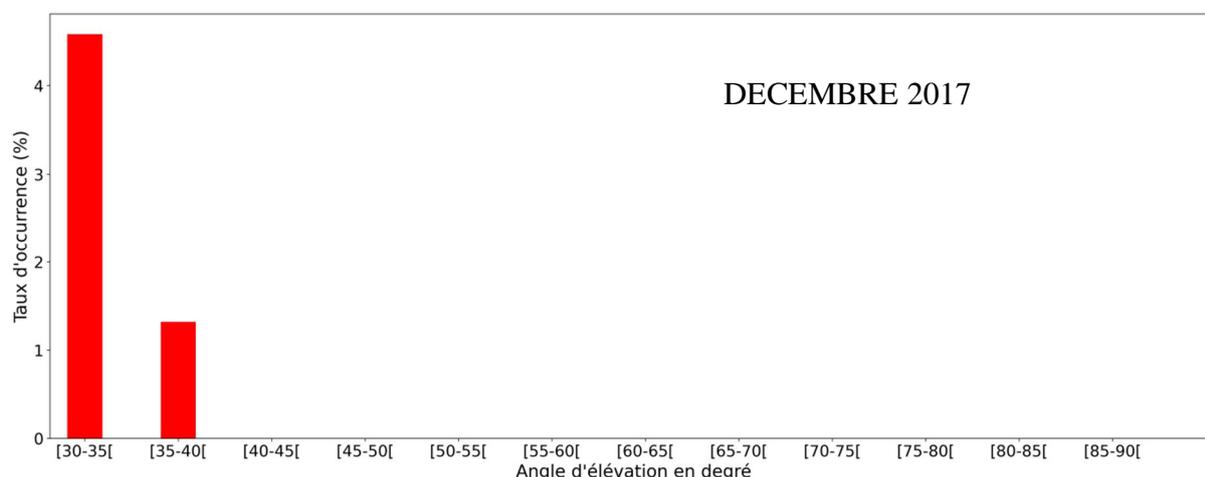


Figure 20 : Taux d'occurrence de la scintillation ionosphérique en fonction de l'angle d'élévation du satellite. Korhogo, décembre 2017.

Le taux d'occurrence de la scintillation ($S_4 > 0,2$) est de 3,95% pour les angles de $[30^\circ-35^\circ[$, 0,44% pour ceux de $[35^\circ-40^\circ[$ puis 0,08% pour les angles de $[40^\circ-45^\circ[$ et nul à partir de 45° pour le mois de mars 2017 (figure 17). Concernant le mois de juin, nous remarquons également que le plus fort taux d'occurrence est obtenu pour les angles de $[30^\circ-35^\circ[$ dont la valeur est de 2,62% . Ensuite, pour les intervalles d'angles d'élévation de $[35^\circ-40^\circ[$ et $[40^\circ-45^\circ[$, les taux d'occurrences obtenus sont respectivement de 0,85% et de 0,25%.(figure 18).

Pour les mois de septembre et décembre (figures 19 et 20), on enregistre également un fort taux d'occurrence pour les angles d'élévation compris entre 30° et 35° avec des valeurs

atteignant 2,15% et 4,58 % respectivement. Pour l'intervalle d'angle d'élévation de 35° à 40°, nous avons des taux d'occurrence de 0,35% et 1,32% respectivement pour les mois de septembre et décembre. Pour ces deux mois la scintillation disparaît pour les angles d'élévations supérieurs à 40°.

Nous pouvons retenir que le taux d'occurrence de la scintillation d'amplitude varie avec l'angle d'élévation. Au fur et à mesure que l'angle d'élévation augmente de 30° à 90°, l'occurrence de la scintillation ionosphérique diminue. À partir de 45° le taux d'occurrence est nul ($S_4 < 0,2$) pour le mois de mars et le mois de juin. Néanmoins celui-ci s'annule plutôt à partir de 40° pour les mois de septembre et décembre.

3.1.2 Variation de l'intensité de la scintillation avec l'angle d'élévation.

Les figures 21, 22, 23 et 24 montrent la variation temporelle de l'indice de scintillation d'amplitude S_4 pour différents intervalles d'angles d'élévation des mois de mars, juin, septembre et décembre de l'année 2017.

D'une part, en observant ces figures nous remarquons que l'intensité de la scintillation présente une dépendance avec l'angle d'élévation du satellite. En effet, les angles d'élévation de 30° à 45° présentent des valeurs de S_4 comprises entre 0,2 et 0,5. Par contre, pour les angles d'élévation compris entre [45° et 90°[, le S_4 est inférieur à 0,2. D'autre part nous remarquons des manques de données qui s'accroissent au fur et à mesure que l'angle d'élévation augmente.

Sur la figure 21 le pic à 12h30 entre [55°-60°[et celui à 1h30 entre [60°-65°[sont des cas isolés.

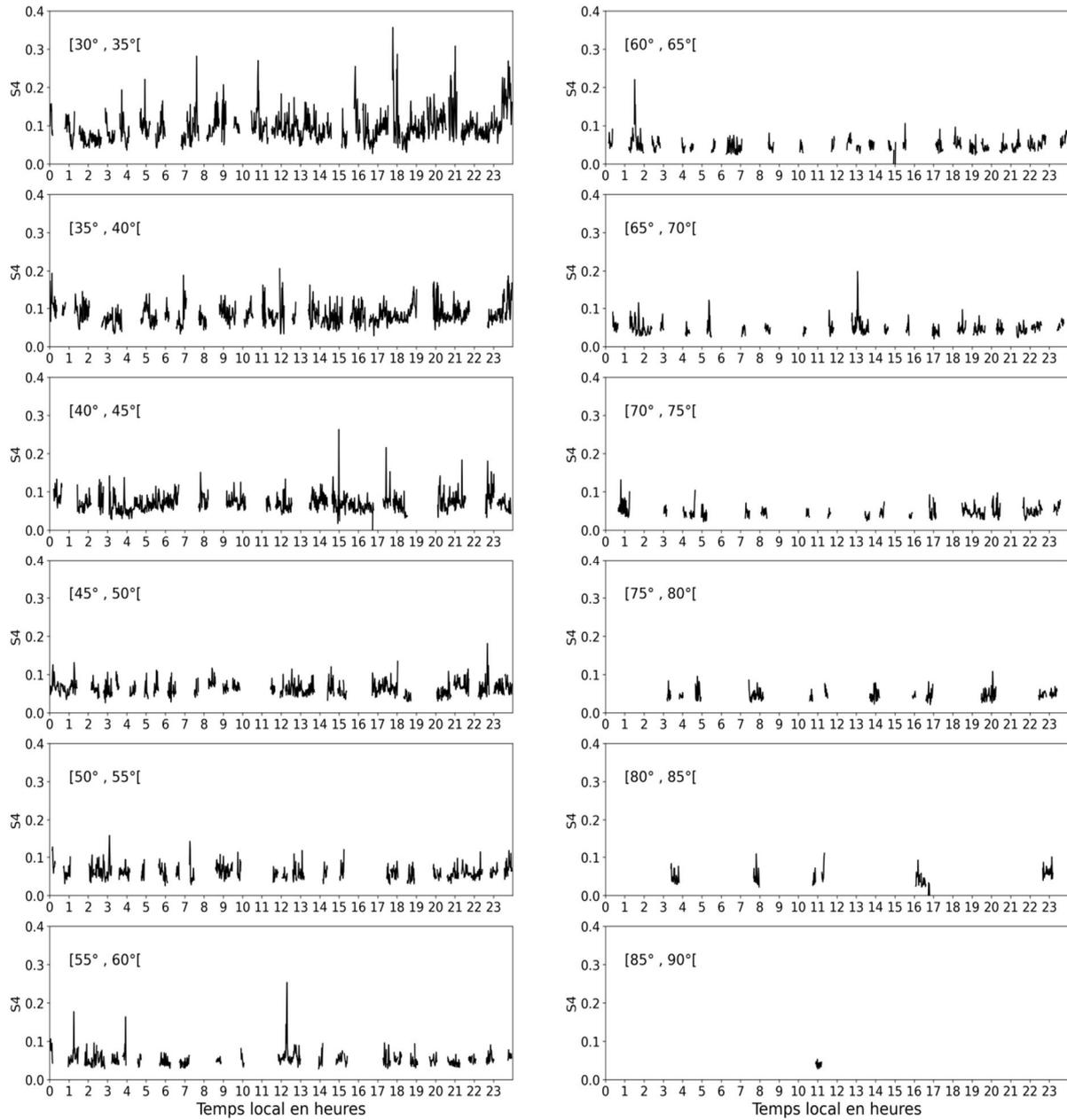


Figure 21 : Variation de l'intensité de la scintillation ionosphérique en fonction de l'angle d'élévation du satellite. Korhogo, mars 2017

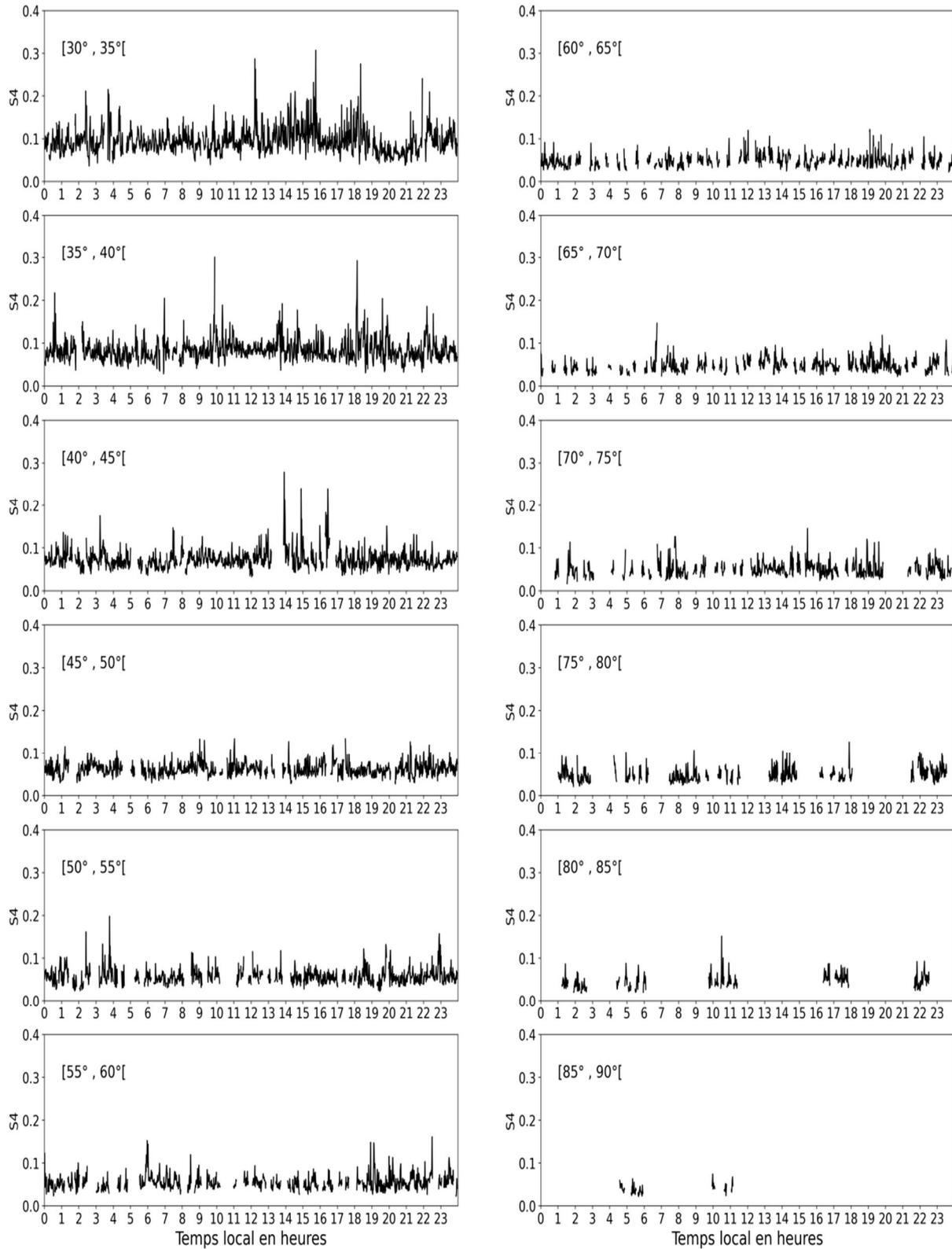


Figure 22 : Variation de l'intensité de la scintillation ionosphérique en fonction de l'angle d'élévation du satellite. Korhogo, Juin 2017

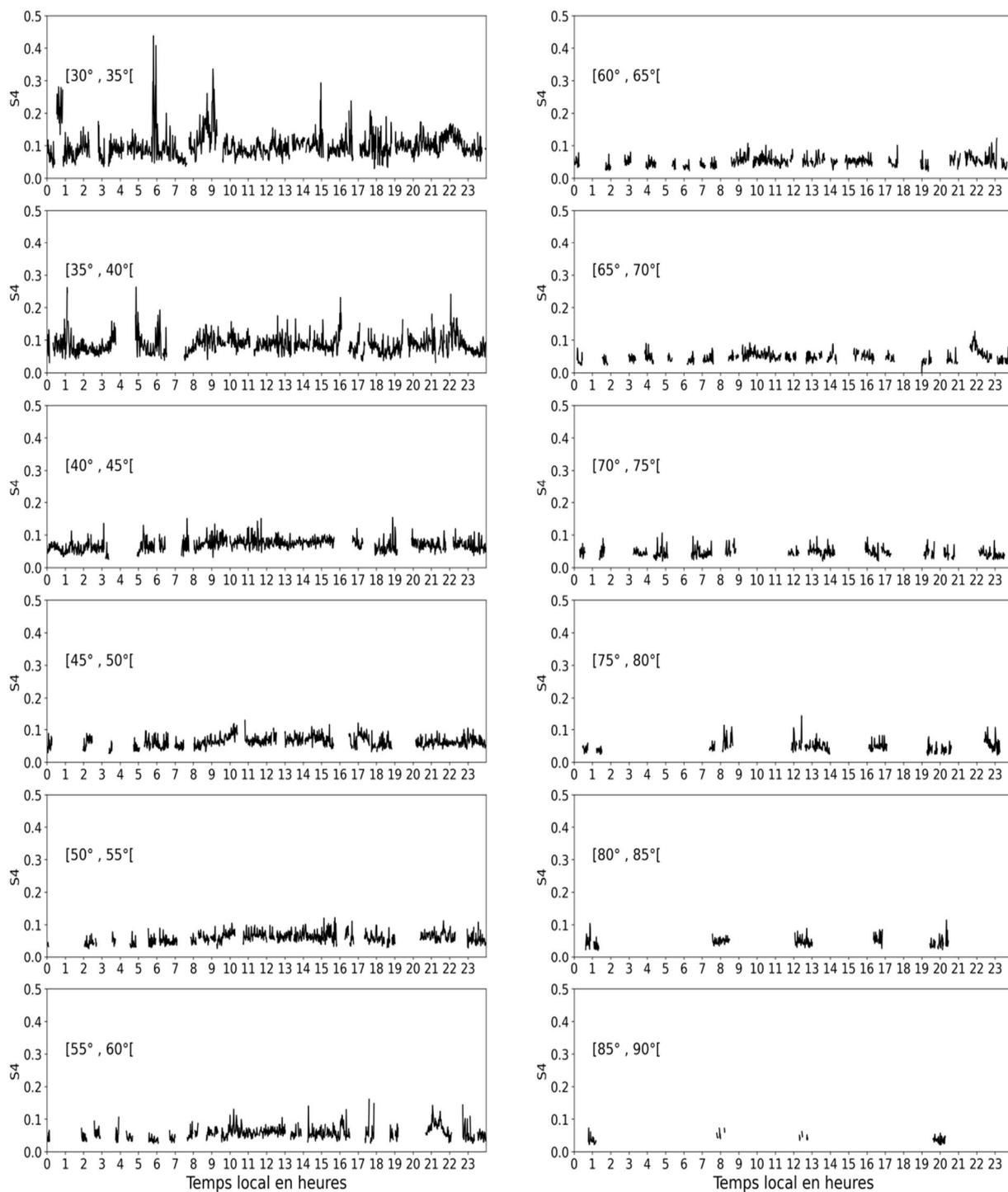


Figure 23 : Variation de l'intensité de la scintillation ionosphérique en fonction de l'angle d'élévation du satellite. Korhogo, Septembre 2017

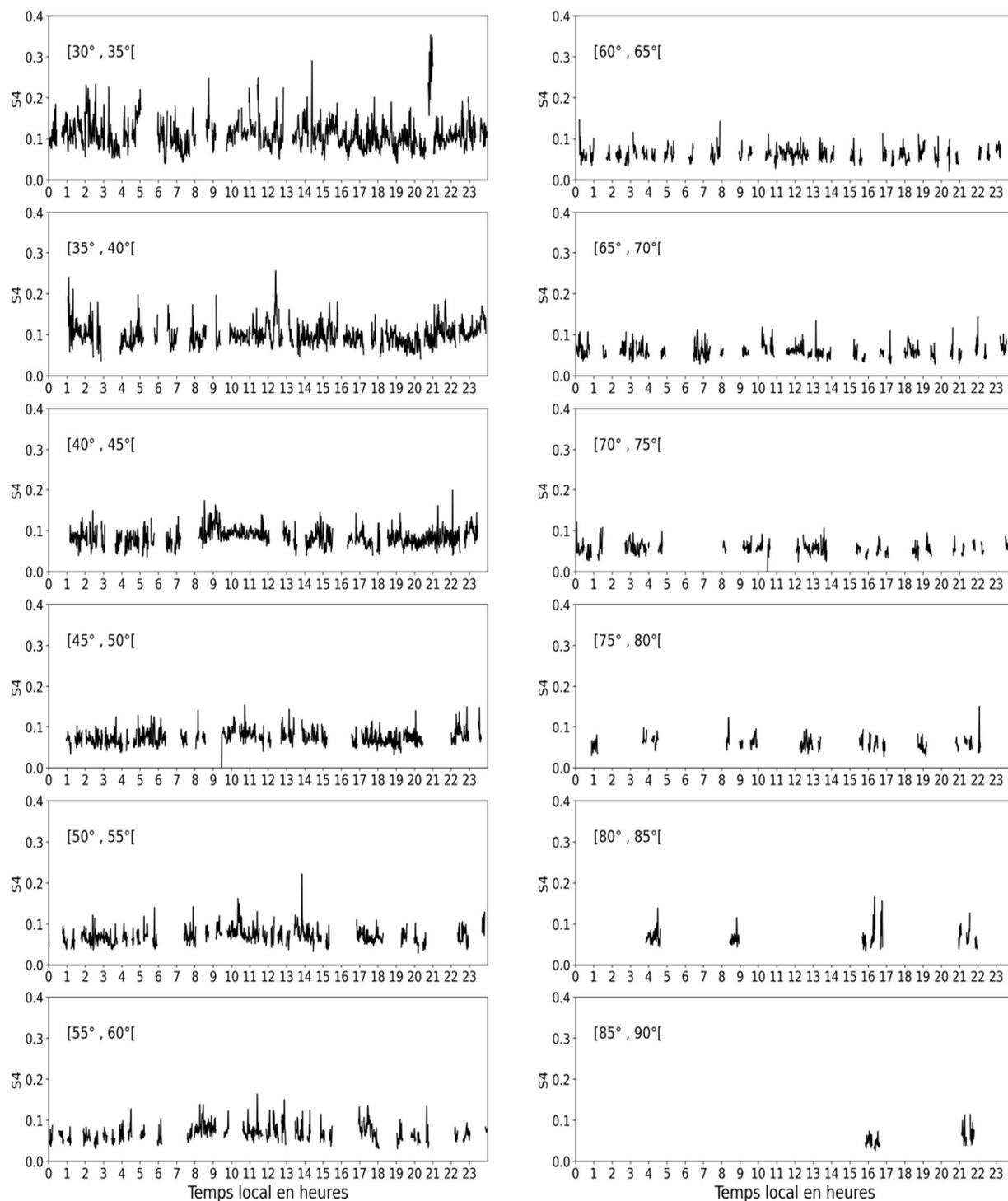


Figure 24 : Variation de l'intensité de la scintillation ionosphérique en fonction de l'angle d'élévation du satellite. Korhogo, décembre 2017.

3.1.3 Variation saisonnière

3.1.3.1 Variation saisonnière du taux d'occurrence de la scintillation en fonction de l'angle d'élévation

La figure 25 présente les variations saisonnières du taux d'occurrence de la scintillation ionosphérique.

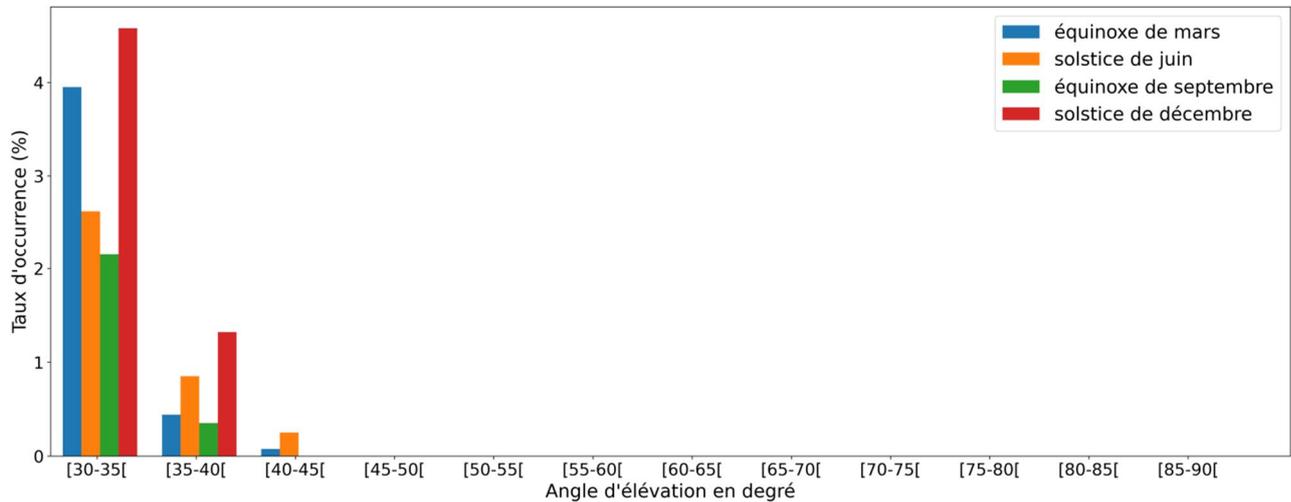


Figure 25 : Histogramme comparatif des taux d'occurrence saisonnière de la scintillation

Le solstice de décembre (4,58 %) et l'équinoxe de mars (3,95 %) ont les plus forts taux d'occurrence pour les angles d'élévation de [30° à 35° [. Ensuite, les solstices surpassent les équinoxes pour les angles de [35° à 40° [avec un taux plus élevé au solstice de décembre (1,32 %). Les angles de [40° à 45°[ne subissent des évènements de scintillation ionosphérique que pendant le solstice de juin (0,25 %) et l'équinoxe de mars (0,08 %). En revanche, au-dessus de 45° le taux d'occurrence de la scintillation ionosphérique est nul pour toutes les saisons.

3.1.3.2 Variation saisonnière de l'intensité de la scintillation en fonction de l'angle d'élévation

Les variations saisonnières de l'intensité de scintillation sont présentées par la figure 26.

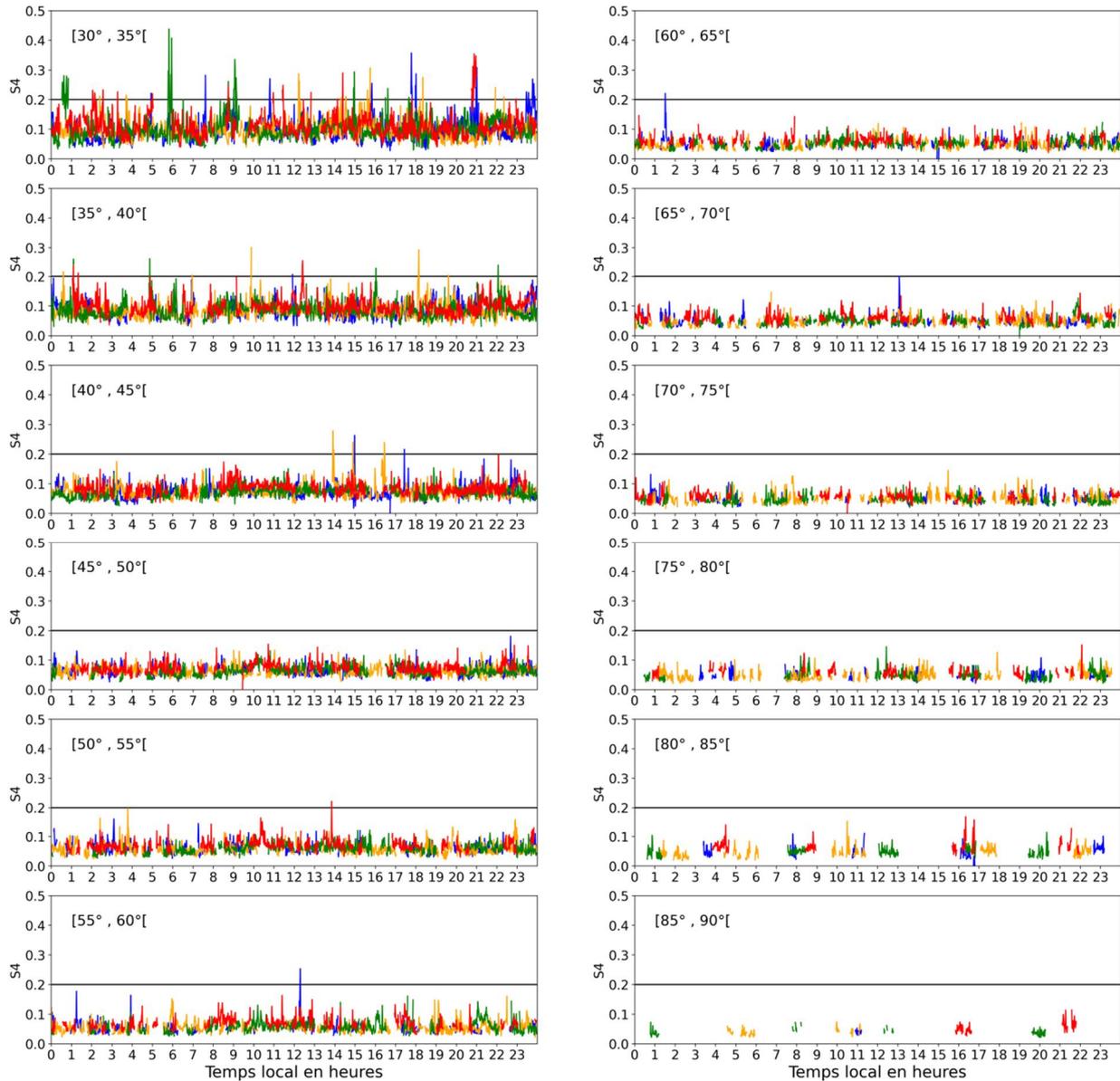


Figure 26 : Variation saisonnière de l'intensité de la scintillation en fonction de l'angle d'élévation Équinoxe de mars (bleu), solstice de juin (orange), équinoxe de septembre (vert), solstice de décembre (rouge).

On constate que pour les angles de $[30^{\circ}-35^{\circ}]$, les plus grandes intensités sont observées pendant les équinoxes de mars (courbe en bleu) et de septembre (courbe en vert). Particulièrement au cours de la journée (de 6h à 9h) à l'équinoxe de septembre et au cours de la nuit (à partir de 18h) à l'équinoxe de mars. Entre $[35^{\circ}-40^{\circ}]$, les plus faibles intensités sont observées à l'équinoxe de mars (toute la journée) et les plus fortes au solstice de juin (aux environs de 10h puis entre 18h et 20h) Pour les angles de $[40^{\circ}-45^{\circ}]$, les plus fortes intensités sont observées pendant le solstice de juin et l'équinoxe de mars entre 14h et 18h. Au-dessus de 45° les intensités restent faibles.

3.2 DISCUSSION

L'étude des caractéristiques de la scintillation ionosphérique en fonction de l'angle d'élévation du satellite a nécessité la connaissance du taux d'occurrence et de l'intensité de la scintillation. L'étude sur trois jours magnétiquement calmes de chacun des mois de mars, juin, septembre et décembre de l'année 2017 a permis de savoir que la fréquence d'apparition ainsi que l'intensité des scintillations apparues diminuent au fur et à mesure que l'angle d'élévation du satellite augmente. Ce qui est due à une diminution des effets de l'ionosphère sur le signal en destination du récepteur. En effet, au fur et à mesure que l'angle d'élévation du satellite augmente de 30° à 90° , le trajet parcouru par le signal à travers les couches ionosphériques rencontrées diminue. Par conséquent leurs effets aussi. L'angle d'élévation étant l'angle formé par le plan horizontal passant par le récepteur et la direction du signal reçu par le satellite, considérons deux signaux (S_1) et (S_2) en provenance du satellite avec respectivement des angles d'élévations de θ_1 et θ_2 telle que $30^\circ < \theta_1 < \theta_2 < 90^\circ$. Désignons par l l'épaisseur supposée fixe d'une couche ionosphérique traversée par ces deux signaux (figure 27).

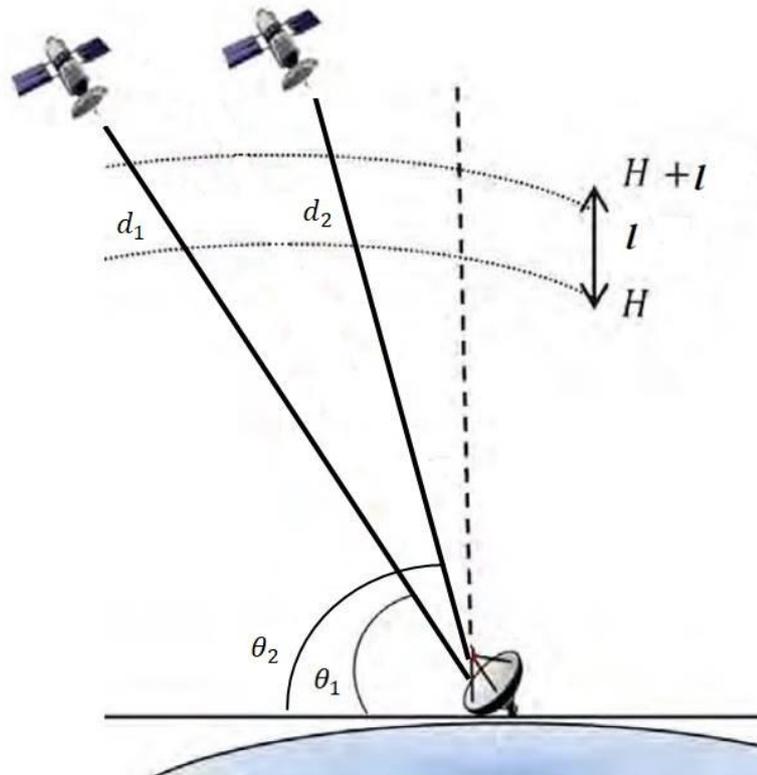


Figure 27: Illustration de la dépendance de la scintillation avec l'angle d'élévation du satellite

Les distances parcourues par ces signaux sont respectivement $d_1 = \frac{l}{\sin \theta_1}$ pour (S₁) et $d_2 = \frac{l}{\sin \theta_2}$ pour (S₂). Comme $30^\circ < \theta_1 < \theta_2 < 90^\circ$ alors $(\sin \theta_1, \sin \theta_2 \neq 0)$ et $\sin \theta_1 < \sin \theta_2$ d'où $d_1 > d_2$; l étant supposée fixe. Donc le signal (S₁) correspondant à l'angle d'élévation θ_1 plus petit parcourt à travers la couche ionosphérique une distance plus longue que celle de (S₂) par conséquent celui-ci endure plus les effets dégradatifs des phénomènes qui s'y déroulent parmi lesquels la scintillation ionosphérique.

Les signaux avec des angles d'élévation entre $[30^\circ-45^\circ]$, présentent des valeurs de S₄ compris entre 0,2 et 0,5. Par conséquent ceux-ci subissent des effets de scintillation ionosphériques de niveau moyen. Ce qui pourrait s'expliquer par le fait que l'année 2017 correspond à une activité solaire modérée. Ces résultats sont en accord avec Ackah *et al.* (2011) qui ont étudiés les variations diurne et saisonnière de la scintillation d'amplitude à la station GPS d'Abidjan lors d'un minimum solaire (2008-2009). Selon leurs travaux, la scintillation n'est pas intense avec des valeurs de S₄ inférieures à 1 dans la plus part des cas. Aussi l'analyse des caractéristiques de la scintillation ionosphérique de 2011 à 2015 à l'île Macquarie dans la région sub-Antarctique par Guo *et al.* (2017) montrent que pour l'année 2012, la scintillation d'amplitude est plus active entre 30° et 40° d'élévation.

En ce qui concerne les variations saisonnières de l'occurrence et de l'intensité, la scintillation d'amplitude est plus fréquente aux solstices que pendant les équinoxes avec un taux plus élevé au solstice de Décembre. Mais l'intensité de la scintillation est plus importante lors des équinoxes que les solstices. Précisément le matin en septembre (entre 6h et 9h) et le soir en mars (à partir de 18h) ce qui est particulièrement vérifié pour les signaux de plus grandes intensités à savoir ceux de $[30^\circ-35^\circ]$. Ces résultats sont en accord avec Ackah *et al.* (2011) qui affirment que la scintillation est plus importante aux équinoxes que pendant les solstices. Cependant, Ackah *et al.* (2011) ne distinguent pas taux d'occurrence et intensité et ne tiennent pas aussi compte de l'angle d'élévation car le comportement saisonnier de la scintillation peut être spécifique à la plage d'angle d'élévation considérée. Néanmoins, pour toutes les plages d'angles d'élévation les taux d'occurrences observés à l'équinoxe de mars sont supérieurs à ceux de l'équinoxe de septembre.

En revanche, de $[45^\circ$ à $90^\circ]$, les signaux ne sont pas affectés par la scintillation ionosphérique (S₄<0,2) quelle que soit la saison.

Aussi, le manque de données constaté lors de l'augmentation de l'angle d'élévation du satellite serait dû à la position géographique de la station de Korhogo par rapport à la configuration des orbites des satellites émetteurs. De sorte que plus l'angle d'élévation du satellite augmente moins le récepteur aurait tendance à recevoir les signaux émis.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

La dépendance de la scintillation ionosphérique avec l'angle d'élévation du satellite a été mise en évidence pour les jours magnétiquement calmes de l'année 2017 à partir des données GNSS de la station de Korhogo en région équatoriale Africaine. Il ressort de cette étude que l'occurrence et l'intensité de la scintillation ionosphérique diminuent au fur et à mesure que l'angle d'élévation augmente de 30° à 90° . Les signaux provenant des satellites ayant des angles d'élévation de $[30^\circ \text{ à } 45^\circ[$ présentent les plus forts taux d'occurrence et des effets modérés de la scintillation ionosphériques ($0,2 < S4 < 0,5$) à cause du long trajet parcourue par ceux-ci dans les couches de l'ionosphère. Par contre, les signaux avec des angles d'élévation compris entre $[45^\circ \text{ et } 90^\circ [$ ne sont pas affectés par la scintillation ionosphérique ($S4 < 0,2$). Aussi, cette dépendance présente-t-elle des variations saisonnières. Pour les angles d'élévation de $[30^\circ \text{ à } 35^\circ [$, la scintillation ionosphérique est plus fréquente au solstice de décembre mais plus intense lors des équinoxes Précisément le matin en septembre (entre 6h et 9h) et le soir en mars (à partir de 18h). Ceux de $[35^\circ \text{ à } 40^\circ [$ subissent plus d'évènements de scintillation ionosphérique pendant les solstices que les équinoxes avec un taux plus élevé au solstice de décembre et une intensité plus forte au solstice de juin (à 10h et 18h). Pour les angles d'élévation de $[40^\circ \text{ à } 45^\circ [$, la scintillation ionosphérique survient seulement au solstice de juin et à l'équinoxe de mars avec des intensités voisines. En revanche, les angles d'élévation de $[45^\circ \text{ à } 90^\circ [$ ne subissent pas de scintillation ionosphérique quelle que soit la saison. Il serait donc intéressant de réduire les effets de la scintillation ionosphérique lors des applications GNSS en privilégiant les données comprises dans cette plage d'angle d'élévation.

En perspective, nous préconisons

- Une étude analogue pour les jours magnétiquement perturbés afin de mettre en évidence «les effets de l'activité magnétique sur la scintillation ionosphérique en fonction de l'angle d'élévation du satellite.»
- Ensuite reprendre ces études en diverses stations (Abidjan, Man, Dakar...) afin de mettre en évidence «Les caractéristiques géographiques de la scintillation ionosphérique en fonction de l'angle d'élévation du satellite.»

REFERENCES

- Aarons J. (1982). Global morphology of ionospheric scintillations. *Proceedings of the IEEE*, 70(4) : 360–378.
- Ackah J.B., Obrou O.K., Zaka Z., Mene M.N. & Groves K. (2011). Study of Equatorial Ionospheric Scintillation and TEC characteristics at Solar minimum using GPS-SCINDA data. *Sun and Geosphere*, 6(1) : 27–30.
- Amari T., Canou A. & Aly J.-J. (2014). Characterizing and predicting the magnetic environment leading to solar eruptions. *Nature*, 514(7523) : 465–469.
- Ayachi M. (1993). Structure verticale de l'atmosphère neutre Morphologie de l'ionosphère. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 87(756) : 1037–1052.
- Bame S.J., Goldstein B.E., Gosling J.T., Harvey J.W., McComas D.J., Neugebauer M. & Phillips J.L. (1993). Ulysses observations of a recurrent high speed solar wind stream and the heliomagnetic streamer belt. *Geophysical Research Letters*, 20(21) : 2323–2326.
- Basu S., Groves K.M., Basu Su. & Sultan P.J. (2002). Specification and forecasting of scintillations in communication/navigation links : current status and future plans. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 64(16) : 1745–1754.
- Boutiouta S., Belbachir A.H. & Dekkiche H. (2006). Contrôle de l'activité ionosphérique à partir des données GPS. *contemporary publishing international*, 5(4) : 325–338.
- Cannat G. (2014). Le guide du ciel de juin 2014 à juin 2015. AMDS édition, Prades-le-Lez, 352 p
- Carrano C.S., Groves K.M., Neil W.J.M. & Doherty P.H. (2013). Direct Measurement of the Residual in the Ionosphere-Free Linear Combination during Scintillation. *Proceedings of the 2013 International Technical Meeting of The Institute of Navigation*, San Diego, California, pp 585–596.
- Chen J. (2001). Physics of Coronal Mass Ejections : A New Paradigm of Solar Eruptions. *Space Science Reviews*, 95(1) : 165–190.
- Davies K. (1990). Ionospheric radio. v. 31, P. Peregrinus on behalf of the Institution of Electrical Engineers, London (united kingdom), 580 p.

- Foucault E. (2020). IONO-HF : Propagation des ondes hautes fréquences dans l'ionosphère. Thèse De Doctorat, Astrophysique, Sciences De L'Espace, Planétologie, Université Paul Sabatier - Toulouse III (Toulouse, France), 178 p.
- Galmiche A. (2019). Modélisation de la scintillation ionosphérique en zone équatoriale : application à l'inversion de signaux GNSS pour la caractérisation de la turbulence. Thèse De Doctorat, Electromagnétisme Et Systèmes Haute Fréquence, Université Paul Sabatier - Toulouse III (Toulouse, France), 186 p.
- Groves K.M., Basu S., Weber E.J., Smitham M., Kuenzler H., Valladares C.E., Sheehan R., MacKenzie E., Secan J.A., Ning P., McNeill W.J., Moonan D.W. & Kendra M.J. (1997). Equatorial scintillation and systems support. *Radio Science*, 32(5) : 2047–2064.
- Guo K., Liu Y., Zhao Y. & Wang J. (2017). Analysis of Ionospheric Scintillation Characteristics in Sub-Antarctica Region with GNSS Data at Macquarie Island. *Sensors*, 17(1) : 137-154.
- Gurney R.J., Foster J.L. & Parkinson C.L. (1993). Atlas of satellite observations related to global change. Cambridge University Press, Cambridge (New York), 470 p.
- Hruska J. & Shea M.A. (1993). Solar-terrestrial predictions. *Advances in Space Research*, 13(9) : 451–455.
- Hunsucker R.D. & Hargreaves J.K. (2003). The high-latitude ionosphere and its effects on radio propagation. Cambridge University Press, Cambridge (New York), 617 p.
- Kelley M.C. & Heelis R.A. (1989). The earth's ionosphere: plasma physics and electrodynamics. v. 43, Academic Press, San Diego, 487 p.
- Knight M.F. (2000). Effets de la scintillation ionosphérique sur les récepteurs du système de positionnement global. Thèse De Doctorat, Génie Électrique Et Électronique, Université d'Adélaïde (Adélaïde, Australie), 297 p.
- Knight. M.F. & Finn A. (1996). The Impact of Ionospheric Scintillations on GPS Performance. *Proceedings of the 9th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation*, Kansas City, Missouri, pp 555–564.

- Kumar S. & Gwal A.K. (2000). VHF ionospheric scintillations near the equatorial anomaly crest : solar and magnetic activity effects. *Journal of Atmospheric and Solar Terrestrial Physics*, 62 : 157–167.
- Lassudrie-Duchesne P., Béniguel Y., Bourdillon A., Fleury R., Valette J.-J., Le Huy M. & Tran Thi L. (2010). Les effets de la scintillation ionosphérique sur le GPS. *Archive ouverte hal*, 58(231) : 17–34.
- Lilensten J. & Bornarel J. (2001). Sous les feux du soleil: vers une météorologie de l'espace. EDP Sciences, Les Ulis, 247 p.
- Lonchay M. & Warnant R. (2019). Intégration de cartes de scintillations ionosphériques dans les algorithmes de positionnement par satellites. *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, 72 : 115–142.
- Matsushita S. (1968). Solar quiet and lunar current systems in the Ionosphere. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 15(2) : 109–125.
- Orpheon (2021). << Le positionnement satellites GPS/GNSS>>. Consulté le 20 Août 2021. <https://reseau-orpheon.fr/le-reseau-orpheon/le-positionnement-gps-gnss/>.
- Otsuka Y., Shiokawa K. & Ogawa T. (2006). Equatorial ionospheric scintillations and zonal irregularity drifts observed with closely-spaced GPS receivers in indonesia. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 84 : 343–351.
- Paget M. (2013). Mise en évidence des effets de la scintillation ionosphérique sur les stations GNSS du Brésil. Mémoire De Diplôme D'ingénieur CNAM, Géomètre Et Topographe, École Supérieur des Géomètres et Topographes, 77 p.
- Romano V., Spogli L., De Franceschi G., Alfonsi L., Aquino M., Dodson A. & Mitchell C.N. (2011). Bipolar climatology of GPS ionospheric scintillation at solar minimum : Bipolar climatology of scintillation. *Radio Science*, 46(3) : 1-21.
- Sammuneh M.A. (2003). Contribution au positionnement en temps réel par GPS Prédiction de la correction ionosphérique. Thèse De Doctorat, Dynamique Des Systèmes Gravitationnels, Ecole Doctorale Astronomie & Astrophysique d'Ile de France (paris, France), 147 p.

- Tribu (2021). << Le fonctionnement de la géolocalisation>>. Consulté le 18 Août 2021.
<https://tribu.phm.education.gouv.fr/toutatice-portail-cms-nuxeo/binary/G%C3%A9olocalisation.pdf?type=FILE&path=%2Fdefault-domain%2Fworkspaces%2Fressources-snt-jbs%2Fdocuments%2F7-geolocalisation-et%2F2-supports-de-cours%2Fgeolocalisation.pdf&portalName=foad&liveState=true&fieldName=file:content&t=1592821901>
- Walter T., Blanch J. & Enge P. (2010). RAIM with Optimal Integrity and Continuity Allocations Under Multiple Failures. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 46(3) : 1235–1247.

ANNEXES

```
15 import matplotlib.pyplot as plt
16 import numpy as np
17
18
19 A = np.loadtxt("Occur.txt")
20 #y1 = [3, 11, 19, 27,35, 43, 51, 59,67, 75, 83, 91]
21 plt.rcParams["figure.figsize"] = (24, 9)
22 B1 =plt.bar(A[:,0], A[:,1],width=3)
23 #B2 =plt.bar(A[:,0], A[:,2],width=3, color = 'orange')
24 #B3 =plt.bar(A[:,0], A[:,3],width=3, color = 'green')
25 #B4 =plt.bar(A[:,0], A[:,4],width=3, color = 'red')
26 plt.xlim(0,100)
27 plt.xticks([3, 11, 19, 27,35, 43, 51, 59,
28             67, 75, 83, 91],
29            ['[30-35[', '[35-40[', '[40-45[', '[45-50[', '[50-55[', '[55-60[',
30            '[60-65[', '[65-70[', '[70-75[', '[75-80[', '[80-85[', '[85-90['])
31 plt.gca().xaxis.set_tick_params(labelsize = 18)
32 plt.gca().yaxis.set_tick_params(labelsize = 18)
33 plt.ylabel("Taux d'occurrence (%)",fontsize=20)
34 plt.xlabel("Angle d'élévation en degré",fontsize=20)
35 #plt.legend([B1, B2, B3, B4], ['équinoxe de mars', 'solstice de juin',
36                               # 'équinoxe de septembre', 'solstice de décembre
37                               # prop = {'size': 20})
38 plt.savefig("D:/conda/HistoOccurdecembre.png", dpi = 300, bbox_inches = 'tight')
39 plt.show()
```

Programme permettant d'obtenir les histogrammes des figures 17, 18, 19 et 20

```
7
8 import matplotlib.pyplot as plt
9 import numpy as np
10 A1 = np.loadtxt("Mars3035T.txt")
11 A2 = np.loadtxt("Mars3540T.txt")
12 A3 = np.loadtxt("Mars4045T.txt")
13 A4 = np.loadtxt("Mars4550T.txt")
14 A5 = np.loadtxt("Mars5055T.txt")
15 A6 = np.loadtxt("Mars5560T.txt")
16 A7 = np.loadtxt("Mars6065T.txt")
17 A8 = np.loadtxt("Mars6570T.txt")
18 A9 = np.loadtxt("Mars7075T.txt")
19 A10 = np.loadtxt("Mars7580T.txt")
20 A11 = np.loadtxt("Mars8085T.txt")
21 A12 = np.loadtxt("Mars8590T.txt")
22
23 plt.rcParams["figure.figsize"] = (24, 24)
24 #plt.figure(dpi=150)
25 plt.subplot(6,2,1)
26 plt.plot(A1[:,0]/60,A1[:,1], 'k-')
27 plt.xticks(np.arange(0, 24, 1))
28 plt.gca().xaxis.set_tick_params(labelsize = 16)
29 plt.gca().yaxis.set_tick_params(labelsize = 16)
30 plt.xlim(0,24)
31 plt.ylim(0,0.4)
32 plt.ylabel("S4",fontsize=16)
33 plt.text(1, 0.3, '[30° , 35°[', fontsize = 18)
34
35 plt.subplot(6,2,3)
36 plt.plot(A2[:,0]/60,A2[:,1], 'k-')
37 plt.xticks(np.arange(0, 24, 1))
38 plt.gca().xaxis.set_tick_params(labelsize = 16)
39 plt.gca().yaxis.set_tick_params(labelsize = 16)
40 plt.xlim(0,24)
41 plt.ylim(0,0.4)
42 plt.ylabel("S4",fontsize=16)
43 plt.text(1, 0.3, '[35° , 40°[', fontsize = 18)
```

Programme permettant d'obtenir la courbe de la figure 21

```
7
8 import matplotlib.pyplot as plt
9 import numpy as np
10
11
12 A = np.loadtxt("Occur.txt")
13 #y1 = [3, 11, 19, 27,35, 43, 51, 59,67, 75, 83, 91]
14 plt.rcParams["figure.figsize"] = (24, 9)
15 B1 =plt.bar(A[:,0]-2.25+1, A[:,1],width=1.5)
16 B2 =plt.bar(A[:,0]-0.75+1, A[:,2],width=1.5)
17 B3 =plt.bar(A[:,0]+0.75+1, A[:,3],width=1.5)
18 B4 =plt.bar(A[:,0]+2.25+1, A[:,4],width=1.5)
19 plt.xlim(0,100)
20 plt.xticks([3+0.75, 11+0.75, 19+0.75, 27+0.75,35+0.75, 43+0.75, 51+0.75, 59+0.75,
21             67+0.75, 75+0.75, 83+0.75, 91+0.75],
22            ['[30-35[', '[35-40[', '[40-45[', '[45-50[', '[50-55[', '[55-60[',
23            '[60-65[', '[65-70[', '[70-75[', '[75-80[', '[80-85[', '[85-90['])
24 plt.gca().xaxis.set_tick_params(labelsize = 18)
25 plt.gca().yaxis.set_tick_params(labelsize = 18)
26 plt.ylabel("Taux d'occurrence (%)",fontsize=20)
27 plt.xlabel("Angle d'élévation en degré",fontsize=20)
28 plt.legend([B1, B2, B3, B4], ['équinoxe de mars', 'solstice de juin',
29                               'équinoxe de septembre', 'solstice de décembre'],
```

Programme permettant d'obtenir l'histogramme de la figure 25

```

8 import matplotlib.pyplot as plt
9 import numpy as np
10 x=[0,1440]
11 y=[0.2, 0.2]
12 A1 = np.loadtxt("Mars3035T.txt")
13 A2 = np.loadtxt("Mars3540T.txt")
14 A3 = np.loadtxt("Mars4045T.txt")
15 A4 = np.loadtxt("Mars4550T.txt")
16 A5 = np.loadtxt("Mars5055T.txt")
17 A6 = np.loadtxt("Mars5560T.txt")
18 A7 = np.loadtxt("Mars6065T.txt")
19 A8 = np.loadtxt("Mars6570T.txt")
20 A9 = np.loadtxt("Mars7075T.txt")
21 A10 = np.loadtxt("Mars7580T.txt")
22 A11 = np.loadtxt("Mars8085T.txt")
23 A12 = np.loadtxt("Mars8590T.txt")
24
25 B1 = np.loadtxt("Juin3035T.txt")
26 B2 = np.loadtxt("Juin3540T.txt")
27 B3 = np.loadtxt("Juin4045T.txt")
28 B4 = np.loadtxt("Juin4550T.txt")
29 B5 = np.loadtxt("Juin5055T.txt")
30 B6 = np.loadtxt("Juin5560T.txt")
31 B7 = np.loadtxt("Juin6065T.txt")
32 B8 = np.loadtxt("Juin6570T.txt")
33 B9 = np.loadtxt("Juin7075T.txt")
34 B10 = np.loadtxt("Juin7580T.txt")
35 B11 = np.loadtxt("Juin8085T.txt")
36 B12 = np.loadtxt("Juin8590T.txt")
37
38 C1 = np.loadtxt("Sept3035T.txt")
39 C2 = np.loadtxt("Sept3540T.txt")
40 C3 = np.loadtxt("Sept4045T.txt")
41 C4 = np.loadtxt("Sept4550T.txt")
42 C5 = np.loadtxt("Sept5055T.txt")
43 C6 = np.loadtxt("Sept5560T.txt")
44 C7 = np.loadtxt("Sept6065T.txt")
45 C8 = np.loadtxt("Sept6570T.txt")
46 C9 = np.loadtxt("Sept7075T.txt")
47
48 D1 = np.loadtxt("Decem3035T.txt")
49 D2 = np.loadtxt("Decem3540T.txt")
50 D3 = np.loadtxt("Decem4045T.txt")
51 D4 = np.loadtxt("Decem4550T.txt")
52 D5 = np.loadtxt("Decem5055T.txt")
53 D6 = np.loadtxt("Decem5560T.txt")
54 D7 = np.loadtxt("Decem6065T.txt")
55 D8 = np.loadtxt("Decem6570T.txt")
56 D9 = np.loadtxt("Decem7075T.txt")
57 D10 = np.loadtxt("Decem7580T.txt")
58 D11 = np.loadtxt("Decem8085T.txt")
59 D12 = np.loadtxt("Decem8590T.txt")
60
61 plt.rcParams["figure.figsize"] = (24, 24)
62 #plt.figure(dpi=150)
63 plt.subplot(6,2,1)
64 plt.plot(x,y, 'k-')
65 plt.plot(A1[:,0]/60,A1[:,1], 'b-')
66 plt.plot(B1[:,0]/60,B1[:,1], color = 'orange')
67 plt.plot(C1[:,0]/60,C1[:,1], 'g-')
68 plt.plot(D1[:,0]/60,D1[:,1], 'r-')
69 plt.xticks(np.arange(0, 24, 1))
70 plt.gca().xaxis.set_tick_params(labelsize = 16)
71 plt.gca().yaxis.set_tick_params(labelsize = 16)
72 plt.xlim(0,24)
73 plt.ylim(0,0.5)
74 plt.ylabel("S4",fontsize=16)
75 plt.text(1, 0.4, '[30°, 35°]', fontsize = 18)
76
77 plt.subplot(6,2,3)
78 plt.plot(x,y, 'k-')
79 plt.plot(A2[:,0]/60,A2[:,1], 'b-')
80 plt.plot(B2[:,0]/60,B2[:,1], color = 'orange')
81 plt.plot(C2[:,0]/60,C2[:,1], 'g-')
82 plt.plot(D2[:,0]/60,D2[:,1], 'r-')
83 plt.xticks(np.arange(0, 24, 1))
84 plt.gca().xaxis.set_tick_params(labelsize = 16)
85 plt.gca().yaxis.set_tick_params(labelsize = 16)
86 plt.xlim(0,24)
87 plt.ylim(0,0.5)
88 plt.ylabel("S4",fontsize=16)
89 plt.text(1, 0.4, '[35°, 40°]', fontsize = 18)
90
91 plt.subplot(6,2,5)
92 plt.plot(x,y, 'k-')
93 plt.plot(A3[:,0]/60,A3[:,1], 'b-')
94
95
96
97
98
99
100 plt.xticks(np.arange(0, 24, 1))
101 plt.gca().xaxis.set_tick_params(labelsize = 16)
102 plt.gca().yaxis.set_tick_params(labelsize = 16)
103 plt.xlim(0,24)
104 plt.ylim(0,0.5)
105 plt.ylabel("S4",fontsize=16)
106 plt.text(1, 0.4, '[40°, 45°]', fontsize = 18)
107
108 plt.subplot(6,2,7)
109 plt.plot(x,y, 'k-')
110 plt.plot(A4[:,0]/60,A4[:,1], 'b-')
111 plt.plot(B4[:,0]/60,B4[:,1], color = 'orange')
112 plt.plot(C4[:,0]/60,C4[:,1], 'g-')
113 plt.plot(D4[:,0]/60,D4[:,1], 'r-')
114 plt.xticks(np.arange(0, 24, 1))
115 plt.gca().xaxis.set_tick_params(labelsize = 16)
116 plt.gca().yaxis.set_tick_params(labelsize = 16)
117 plt.xlim(0,24)
118 plt.ylim(0,0.5)
119 plt.ylabel("S4",fontsize=16)
120 plt.text(1, 0.4, '[45°, 50°]', fontsize = 18)
121
122 plt.subplot(6,2,9)
123 plt.plot(x,y, 'k-')
124 plt.plot(A5[:,0]/60,A5[:,1], 'b-')
125 plt.plot(B5[:,0]/60,B5[:,1], color = 'orange')
126 plt.plot(C5[:,0]/60,C5[:,1], 'g-')
127 plt.plot(D5[:,0]/60,D5[:,1], 'r-')
128 plt.xticks(np.arange(0, 24, 1))
129 plt.gca().xaxis.set_tick_params(labelsize = 16)
130 plt.gca().yaxis.set_tick_params(labelsize = 16)
131 plt.xlim(0,24)
132 plt.ylim(0,0.5)
133 plt.ylabel("S4",fontsize=16)
134 plt.text(1, 0.4, '[50°, 55°]', fontsize = 18)
135
136 plt.subplot(6,2,11)
137 plt.plot(x,y, 'k-')
138 plt.plot(A6[:,0]/60,A6[:,1], 'b-')
139 plt.plot(B6[:,0]/60,B6[:,1], color = 'orange')
140 plt.plot(C6[:,0]/60,C6[:,1], 'g-')
141 plt.plot(D6[:,0]/60,D6[:,1], 'r-')
142 plt.xticks(np.arange(0, 24, 1))
143 plt.gca().xaxis.set_tick_params(labelsize = 16)
144 plt.gca().yaxis.set_tick_params(labelsize = 16)
145 plt.xlim(0,24)
146 plt.ylim(0,0.5)
147 plt.ylabel("S4",fontsize=16)
148 plt.text(1, 0.4, '[55°, 60°]', fontsize = 18)
149 plt.xlabel("Temps local en heures",fontsize=20)
150
151 plt.subplot(6,2,2)
152 plt.plot(x,y, 'k-')
153 plt.plot(A7[:,0]/60,A7[:,1], 'b-')
154 plt.plot(B7[:,0]/60,B7[:,1], color = 'orange')
155 plt.plot(C7[:,0]/60,C7[:,1], 'g-')
156 plt.plot(D7[:,0]/60,D7[:,1], 'r-')
157 plt.xticks(np.arange(0, 24, 1))
158 plt.gca().xaxis.set_tick_params(labelsize = 16)
159 plt.gca().yaxis.set_tick_params(labelsize = 16)
160 plt.xlim(0,24)
161 plt.ylim(0,0.5)
162 plt.ylabel("S4",fontsize=16)
163 plt.text(1, 0.4, '[60°, 65°]', fontsize = 18)
164
165 plt.subplot(6,2,4)
166 plt.plot(x,y, 'k-')
167 plt.plot(A8[:,0]/60,A8[:,1], 'b-')
168 plt.plot(B8[:,0]/60,B8[:,1], color = 'orange')
169 plt.plot(C8[:,0]/60,C8[:,1], 'g-')
170 plt.plot(D8[:,0]/60,D8[:,1], 'r-')
171 plt.xticks(np.arange(0, 24, 1))
172 plt.gca().xaxis.set_tick_params(labelsize = 16)
173 plt.gca().yaxis.set_tick_params(labelsize = 16)
174 plt.xlim(0,24)
175 plt.ylim(0,0.5)
176 plt.ylabel("S4",fontsize=16)
177 plt.text(1, 0.4, '[65°, 70°]', fontsize = 18)
178
179 plt.subplot(6,2,6)
180 plt.plot(x,y, 'k-')
181 plt.plot(A9[:,0]/60,A9[:,1], 'b-')
182 plt.plot(B9[:,0]/60,B9[:,1], color = 'orange')
183 plt.plot(C9[:,0]/60,C9[:,1], 'g-')
184 plt.plot(D9[:,0]/60,D9[:,1], 'r-')
185 plt.xticks(np.arange(0, 24, 1))
186 plt.gca().xaxis.set_tick_params(labelsize = 16)
187 plt.gca().yaxis.set_tick_params(labelsize = 16)
188 plt.xlim(0,24)
189 plt.ylim(0,0.5)
190 plt.ylabel("S4",fontsize=16)
191
192
193
194
195
196
197
198
199
200
201
202
203
204
205
206
207
208
209
210
211
212
213
214
215
216
217
218
219
220
221
222
223
224
225
226
227
228
229
230
231
232
233
234
235
236
237

```

Programme permettant d'obtenir la courbe de la figure 26

Résumé

Aujourd'hui, en offrant la possibilité de mixer les signaux des différentes constellations de satellites, les systèmes globaux de positionnement et de navigation par satellites (GNSS) fournissent aux utilisateurs une meilleure disponibilité du positionnement précis. Cependant, les signaux GNSS subissent souvent une variation rapide d'amplitude et de phase lors de leur traversée de l'ionosphère, région de l'atmosphère terrestre où l'on assiste à la formation de « bulle » de plasma. Cette fluctuation du signal appelée scintillation ionosphérique, limite parfois de manière sévère les performances des GNSS. À la station de Korhogo située en région équatoriale Africaine, la dépendance de la scintillation ionosphérique avec l'angle d'élévation du satellite a été mise en évidence pour les jours magnétiquement calmes de l'année 2017. Il ressort de cette étude que l'occurrence et l'intensité de la scintillation ionosphérique diminue au fur et à mesure que l'angle d'élévation augmente. Les signaux provenant des satellites ayant des angles d'élévation de $[30^\circ \text{ à } 45^\circ [$ sont impactés par des effets de scintillations ionosphériques de niveau moyen ($0,2 < S_4 < 0,5$). Ces effets sont plus fréquents aux solstices mais plus intenses aux équinoxes. Par contre les signaux compris entre 45° et 90° ne sont pas affectés par la scintillation ($S_4 < 0,2$) quelle que soit la saison.

Mots clés : GNSS, scintillation ionosphérique, angle d'élévation, Korhogo, région équatoriale

ABSTRACT

Today, by offering the possibility of mixing signals from different satellite constellations, Global Positioning and Navigation Satellite Systems (GNSS) provide users with better availability of precise positioning. However, GNSS signals often undergo a rapid variation in amplitude and phase as they pass through the ionosphere, a region of the Earth's atmosphere where plasma "bubbles" are formed. This fluctuation of the signal, called ionospheric scintillation, sometimes severely limits the performance of GNSS. At the Korhogo station located in the equatorial region of Africa, the dependence of the ionospheric scintillation on the elevation angle of the satellite was demonstrated for the magnetically calm days of 2017. occurrence and intensity of the scintillation ionospheric decreases as the elevation angle increases. Signals from satellites with elevation angles of $[30^\circ \text{ to } 45^\circ [$ are impacted by medium level ionospheric scintillation effects ($0.2 < S_4 < 0.5$). These effects are more frequent at the solstices but more intense at the equinoxes. On the other hand, the signals between 45° and 90° are not attributed by the scintillation ($S_4 < 0.2$) whatever the season.

Keywords : GNSS, ionospheric scintillation, elevation angle, Korhogo, equatorial region