

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



UNIVERSITE DJILALI BOUNAAMA KHEMIS MILIANA

CENTRE DE RECHERCHE EN ASTRONOMIE,

ASTROPHYSIQUE ET GEOPHYSIQUE



Faculté des Sciences et de la Technologie

Département des Sciences de la Matière

Thèse Présentée

Pour l'obtention de diplôme

DOCTORAT

En

Physique Théorique

Option

Astrophysique

Titre :

**ANALYSE DES PERTURBATIONS DE LA MAGNETOSPHERE
CAUSEES PAR LES ÉJECTIONS DE MASSES CORONALES
SOLAIRES (CME)**

Réalisée par :

KERRACHE Fethia

Encadrée par :

NAITAMOR Samir

Les membres du Juré :

Nom Prénom	Grade	Lieu d'exercice	Qualité du juré
MATALLAH MOHAMED	Professeur	UDBKM	Président de juré
OUERDANE ABDALLAH	Professeur	UDBKM	Examineur
ABDELATIF TOUFIK EL HAK	Directeur de recherche	GRAAG	Examineur
FOUKA MOURAD	Maitre de recherche A habilité	CRAAG	Examineur

Année Universitaire 2021/2022

Résumé

Les tempêtes géomagnétiques sont très importantes pour la météorologie spatiale en raison de leurs effets sur l'environnement terrestre et la vie humaine. Elles peuvent perturber les télécommunications hertziennes (sans fil), les satellites, les systèmes de positionnement (GPS, *Global Positioning System*) ainsi que d'autres systèmes technologiques au Sol. Plusieurs techniques de sondage sont déployées pour mieux comprendre la réponse de l'environnement terrestre aux tempêtes géomagnétiques. Parmi celles-ci, la technique des ondes radio à très basse fréquence (VLF, *Very Low Frequency*) qui est la plus fiable pour étudier l'effet des orages magnétiques sur la région *D* de l'ionosphère. Cette étude, porte sur l'analyse des effets de trois orages magnétiques intenses sur la propagation des signaux VLF. Dans le cadre de ce travail, les signaux de trois émetteurs (DHO, GQD et NRK) sont analysés afin de mettre en évidence l'effet direct de la perturbation géomagnétique ainsi que son effet indirect caractérisé par la précipitation d'électrons énergétiques. Les résultats obtenus montrent que les anomalies du signal VLF sont clairement observables, que ce soit le jour ou la nuit. Pour l'effet indirect des perturbations géomagnétiques sur l'ionosphère, nous avons identifié trois types de précipitations (ou LEP, *Lightning induced Electron Precipitation*): canalisé (*Ducted*), non canalisé (*Non-Ducted*) et la réflexion magnétosphérique (*Magnetospheric Reflection*). À partir des observations simultanées de ces événements, nous avons montré que la région de l'ionosphère perturbée par les électrons énergétiques est plus large que la distance séparant les deux émetteurs DHO et GQD qui est de 728 km. Dans l'étude statistique des précipitations des électrons de 2011 à 2016, nous avons observé qu'elles sont en bonne corrélation avec l'indice *Dst* que le nombre de taches solaires. La modélisation au moyen du code (LWPC, *Long-Wave Propagation Capability*) des perturbations dues aux événements LEP a été effectuée afin de déterminer la densité électronique ainsi produite. Les résultats montrent que la hauteur de réflexion a diminué jusqu'à 82.4 km pour le type *ducted* et jusqu'à 80.26 km pour le type *non-ducted*. Ces changements ont produit une augmentation considérable de la densité électronique de la région *D* de l'ionosphère.

Abstract

Geomagnetic storms are very important for space weather because of their effects on the Earth's environment and human life. They can damage wireless telecommunications, satellites, global positioning systems (GPS) and other ground-based technological systems. Several survey techniques are deployed to better understand the response of the Earth's environment to geomagnetic storms. Among these, the very low frequency (VLF) radio wave technique is the most reliable for studying the effect of magnetic storms on the ionospheric *D* region. In this study, we analyzed the effect of three intense magnetic storms on the propagation of VLF signals. In this work, the signals from three transmitters (DHO, GQD and NRK) are analyzed to reveal the direct effect of the geomagnetic disturbance and its indirect effect characterized by the precipitation of energetic electrons. The obtained results show that the anomalies in the VLF signal are clearly observable, both during the day and at night. For the indirect effect of geomagnetic disturbances on the ionosphere, we have identified three types of precipitation (or LEP): ducted, non-ducted and magnetospheric reflection. From simultaneous observations of these events, we have shown that the disturbed ionosphere region due to energetic electrons is larger than the distance between the two transmitters DHO and GQD, which is 728 km. In the statistical study of the electron precipitations data recorded from 2011 to 2016, we observed that these correlate well with the Dst index rather than the sunspot number. Simulation using the Long-Wave Propagation Capability (LWPC) code of the LEP disturbances have been performed to determine the increased electron density. The results also show that the reflection height decreased to 82.4 km for the ducted type and 80.26 km for the non-ducted type. These changes produced a considerable increase in the electron density of the *D* region of the ionosphere.

ملخص

العواصف الجيومغناطيسية مهمة جدًا لطقس الفضاء بسبب تأثيرها على بيئة الأرض وحياة الإنسان. يمكن أن تلحق الضرر بالاتصالات اللاسلكية والأقمار الصناعية وأنظمة تحديد المواقع (GPS) والأنظمة التكنولوجية الأخرى القائمة على الأرض. يتم نشر عدة أنواع من تقنيات السبر لفهم استجابة بيئة الأرض للعواصف المغناطيسية الأرضية بشكل أفضل. من بين هذه التقنيات ، تعتبر تقنية الموجات الراديوية منخفضة التردد هي الأكثر موثوقية لدراسة تأثير العواصف المغناطيسية على منطقة الغلاف الأيوني. في هذه الدراسة ، قمنا بتحليل تأثير ثلاث عواصف مغناطيسية شديدة على انتشار الإشارات. في هذا العمل تم تحليل الإشارات من ثلاثة أجهزة إرسال (DHO و GQD و NRK) للكشف عن التأثير المباشر للاضطراب المغناطيسي الأرضي وتأثيره غير المباشر المتميز بترسيب الإلكترونات النسبية. تظهر النتائج التي تم الحصول عليها أن الحالات الشاذة في الإشارة يمكن ملاحظتها بوضوح ، أثناء النهار والليل على حد سواء. من أجل التأثير غير المباشر للاضطرابات المغناطيسية الأرضية على الأيونوسفير ، حددنا ثلاثة أنواع من الترسيب (أو LEP): الانعكاس الأنبوبي ، وغير الأنبوبي ، والانعكاس المغناطيسي. من الملاحظات المتزامنة لهذه الأحداث ، أظهرنا أن منطقة الغلاف المتأين المضطرب بسبب الإلكترونات النشطة أكبر من المسافة بين جهازي الإرسال DHO و GQD ، والتي تبلغ 728 كم. في الدراسة الإحصائية لترسب الإلكترون من 2011 إلى 2016 ، لاحظنا أنه يرتبط جيدًا بمؤشر Dst بدلاً من رقم البقع الشمسية. تم إجراء المحاكاة باستخدام كود القدرة على الانتشار طويل الموجة (LWPC) لاضطرابات LEP لتحديد كثافة الإلكترون المتزايدة. أظهرت النتائج أيضًا أن ارتفاع الانعكاس انخفض إلى 82.4 كم للنوع الأنبوبي و 80.26 كم للنوع غير الأنبوبي. أنتجت هذه التغييرات زيادة كبيرة في كثافة الإلكترون في المنطقة D من الأيونوسفير.

À mes parents.

*À toutes les personnes qui m'en tiennent au cœur et
qui occupent une grande place dans ma vie.*

Remerciements

Merci à vous !

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont permis à ce travail d'être gratifiant.

Je tiens à remercier en premier lieu mon directeur de thèse, Mr Samir NaitAmor, directeur de recherche au Centre de Recherche en Astronomie Astrophysique et Géophysique (CRAAG), pour son aide, sa confiance et l'attention honnête qu'il m'a accordée. Sous sa direction, j'ai pu travailler avec conviction et l'esprit léger. Je le remercie pour sa disponibilité qui m'a aidé à surmonter les nombreuses difficultés et inquiétudes rencontrées.

Je remercie évidemment Monsieur MATALLAH MOHAMED, professeur à l'UDBKM d'avoir accepté d'être le président de juré, aussi J'adresse tous mes remerciements à Monsieur OUERDANE ABDALLAH, professeure à l'UDBKM d'avoir accepté la tâche d'examiner ce manuscrit.

J'exprime ma gratitude à Monsieur ABDELATIF TOUFIK EL HAK, Directeur de Recherche au CRAAG, et à Monsieur FOUKA MOURAD, Maître de Recherche classe A au CRAAG, qui ont accepté d'examiner la thèse.

Je tiens à remercier sincèrement tous le personnel du CRAAG et de l'Université de Khemis Miliana pour leur accueil.

J'exprime mes profonds remerciements au Professeur M. Toufik Bouziane et au Professeur Chala Abdelouhad pour leur soutien tout au long de mon travail.

Mes plus grands remerciements vont à M. Bentriddi Salah Dine pour son aide et sa disponibilité pour faciliter la procédure administrative et le dépôt du dossier de thèse. Enfin, je tiens à remercier tous ceux qui nous ont aidés de quelque manière que ce soit à mener à bien ce travail.

Table des matières	
Liste des abréviations	
Liste des tableaux	
Liste des figures	

Introduction générale.....	1
1 Relation Soleil-Terre et propagation des ondes électromagnétiques	4
1.1 Relation Soleil-Terre	4
1.1.1 L'activité solaire.....	4
1.1.2 Les vents solaires.....	6
1.1.3 Les éruptions solaires	8
1.1.4 Les éjections de masses coronales.....	12
1.1.5 La magnétosphère.....	13
1.1.6 Les ceintures de radiations	15
1.1.7 Les orages géomagnétiques.....	17
1.1.8 L'ionosphère.....	21
1.1.8.1 Région D.....	22
1.1.8.2 Région E.....	23
1.1.8.3 Région F	23
1.2 Les ondes électromagnétiques et leur propagation.....	26
1.2.1 Les ondes radios	26
1.2.2 Propagation des ondes	28
1.2.3 Les ondes VLF	30
2 Instrumentations	31
2.1 Le récepteur VLF	31
2.2 Visualisation des données.....	33
2.3 Sélection des émetteurs	36
2.4 Satellite RBSP	37
3 Traitement des données et simulation.....	39
3.1 Sélection de l'événement.....	39
3.2 Traitement du signal VLF des événements de Mars, Juin et Décembre	42
3.2.1 Évènements FAC.....	43
3.2.2 Les évènements LEP	48
3.3 Simulation avec le code LWPC.....	50
3.3.1 Description du code LWPC.....	50
3.3.2 Utilisation du code LWPC.....	50

4	Analyse et interprétation du traitement des données	55
4.1	L'effet direct des orages géomagnétiques sur la région <i>D</i>	55
4.1.1	La super tempête du 17-18 Mars 2015	55
4.1.2	Tempête intense du 22 au 24 Juin 2015	62
4.1.3	Tempête intense du 20-21 Décembre 2015	67
5	Résultats des évènements LEP et leur simulation.....	72
5.1	L'effet indirect des orages géomagnétiques sur la région <i>D</i>	72
5.1.1	Les évènements LEP	72
5.1.2	Étude statistique des évènements LEP	76
5.1.3	Simulation d'évènement LEP au moyen du code LWPC.....	78
	Conclusion générale	84
	Annexe : Publication	86
	Bibliographies	99

Liste des abréviations

ACE: Advanced Composition Explorer

AE: Aurora Electrojet

AIA: Atmospheric Imaging Assembly

Å : Angstrom

AU: Astronomical Unit

APL: Applied Physics Laboratory

AWESOME: Atmospheric Weather Electromagnetic System for Observation Modeling and Education

CDAWEB: Cordinated Data Analysis Web

CME: Coronal Mass Ejection

CRAAG: Centre de Recherche en Astronomie Astrophysique et Géophysique.

Dst: Disturbance Storm Time

ECT: Energetic Particle, Composition and Thermal Plasma Suite.

EFW: Electric Field and Waves Suite

EM: Electromagnetic

EMFISIS: Electric and Magnetic Field Instrument Suite and Integrated Science.

ESA: European Spatial Agency

EUV: Extreme UltraViolet

FAC: Field Aligned Current

GCP: Great Circle Path

GOES: Geostationary Operational Environmental Satellites

GPS: Géo-Positionnement par Satellite

ICME: Interplanetary Coronal Mass Ejection

IMF: Interplanetary Magnetic Field

IRI: International Reference Ionosphere

Kp: Global Geomagnetic Activity Index

LASCO: Large Angle and Spectrometric Coronagraph Experiment

LEP: Lightning induced Electron Precipitations

LWPC: Long Wave Propagation Capability

MR: Magnetospheric Reflexing

NASA: National Aeronautics and Space Administration

NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration

OMNI: Database of the space physics data facility

RBSP: Radiation Belt Storm Probes.

RBSPICE: Radiation Belt Storm Probes Ion Composition Experiment

RPS: Relativistic Proton Spectrometer

SD: Stander Deviation

SDO: Solar Dynamic Observatory

SEP: Solar Energetic Particle

SID: Sudden Ionospheric Disturbances

SoHO: Solar and Heliospheric Observatory

SS: SUNSET

STEREO: Solar TERrestrial RELations Observatory

TLE: Transient Luminous Events

UV: Ultraviolet

UT: Universel Time

VLF: Very Low Frequuecy

Liste des tableaux

Chapitre 1 : Relation Soleil-Terre et propagation des ondes électromagnétiques

Tableau 1.1 : Classification des éruptions solaires en fonction du flux énergétique des rayons X dans la gamme 1-8 Å et de leur impact. 9

Tableau 1.2: Les indices géomagnétiques. Source astrosurf.com..... 19

Tableau 1.3: Les différentes gammes du spectre des radiofréquences en fonction de la fréquence et de la longueur d'onde. 27

Chapitre 2 : Instrumentation

Tableau 2.1: Liste des émetteurs VLF. 35

Chapitre 3 : Traitement des données et simulation

Tableau 3.1: Liste des trois émetteurs VLF. 43

Tableau 3.2: Temps caractéristiques des événements LEP..... 49

Chapitre 5 : Résultats des événements LEP et leur simulation

Tableau 5.1: Taux d'occurrence des différents types d'événements LEP sur les émetteurs NRK, DHO et GQD pour les trois tempêtes géomagnétiques : Mars, Juin et Décembre..... 75

Tableau 5.2: Le nombre des différents types d'événements LEP sur les émetteurs NRK, DHO et GQD de 2011 à 2016..... 77

Tableau 5.3: Les amplitudes et phases des perturbations mesurées et simulées du signal DHO dues aux événements LEP..... 79

Liste des figures

Chapitre 1 : Relation Soleil-Terre et propagation des ondes électromagnétiques

- Figure 1.1** : Progression des taches solaires des cycles solaires 24 et 25 (en haut), vue du Soleil à 195 Å entre les périodes calmes et actives. (Crédit image : SpaceWeatherLive.com, NASA).
..... 5
- Figure 1.2** : Différents phénomènes éruptifs. (Crédit image : NASA)..... 6
- Figure 1.3** : Observations du vent solaire par la sonde Ulysse. Le vent lent (400 km/s) est confiné aux régions équatoriales, tandis que le vent rapide (750 km/s) est visible au-dessus des pôles. (Crédit image : NASA). 7
- Figure 1.4** : Deux vues des régions actives : un gros plan des taches solaires (à gauche) et des boucles coronales dans la longueur d'onde de l'ultraviolet du Soleil (à droite). (Crédit image : <https://scied.ucar.edu>). 8
- Figure 1.5** : Observations des trois différentes classes C, M et X d'éruptions solaires dans la région 2297 le 11 Mars 2015 par le satellite GEOS. (Crédit image : SpaceWeatherLive.com).
..... 11
- Figure 1.6** : Une CME (HALO) éjectée le 23 Juillet 2012, comme observée par le satellite STEREO. (Crédit image : STEREO, NASA). 13
- Figure 1.7** : La structure de la magnétosphère terrestre. 15
- Figure 1.8** : Image des ceintures de Van Allen. (Crédits image : NASA). 17
- Figure 1.9** : Variation journalière de : a) l'indice AE, b) la pression P, c) la composante Z du champ magnétique interplanétaire IMF B_z , et enfin d) l'indice Dst, pour la tempête de Mars 2015. 20
- Figure 1.10** : La variation diurne et nocturne de la densité des électrons dans l'ionosphère aux minima et maxima du cycle solaire. (Crédit image : Station de surveillance SID). 22

Figure 1.11 : Exemple de perturbations dues à des phénomènes lumineux transitoires que sont : le Jet Gigantesque (GJ) (Event 1) et Elve (Event 2) enregistrés le 12 Décembre 2009. (Crédit image : NaitAmor et al. 2016).....	24
Figure 1.12 : Exemple de perturbations des signaux VLF dues à deux cyclones (Fiona et Gaston) dans l’océan Atlantique. (Crédit image : NaitAmor et al., 2018).....	25
Figure 1.13 : Le spectre électromagnétique et radiofréquence.....	26
Figure 1.14 : Les modes de propagation des ondes radios.....	29
Figure 1.15 : La propagation des signaux VLF de jour et de nuit. (Crédit image : https://sidstation.loudet.org/ionosphere-fr.xhtml).....	30
 Chapitre 2 : Instrumentations	
Figure 2.1 : Composition du récepteur VLF installé à Boumerdes (Algérie).	32
Figure 2.2 : Carte géographique des émetteurs (en bleu) et des récepteurs (rouge) VLF. (Crédit image : Robert Andrew Marshall, 2009).....	33
Figure 2.3 : Interface de l’application DAQViewer pour la visualisation du signal VLF (en haut), enregistrement en bande étroite du signal VLF (en bas).....	34
Figure 2.4 : Enregistrement à large bande du signal VLF.....	35
Figure 2.5 : Trajets émetteur-récepteur (Alger) du signal VLF.	36
Figure 2.6 : Les instruments du RBSP. (Crédit image : https://spaceflight101.com/rbsp/rbsp-science-instruments/).....	38

Chapitre 3 : Traitement des données et simulation

- Figure 3.1** : Visualisation des différentes étapes pour exploiter les données des différents instruments via le site CDAWEB..... 40
- Figure 3.2** : Conditions du vent solaire avant, pendant et après la tempête géomagnétique de Mars : a) indice AE, b) indice DST, c) pression, d) vitesse et e) champ magnétique B_z 41
- Figure 3.3** : Mêmes paramètres de vent solaire que dans la Figure 3.2 pour Juin. 41
- Figure 3.4** : Mêmes paramètres de vent solaire que dans la Figure 3.2 pour Décembre..... 42
- Figure 3.5** : À gauche : Une éjection de masse coronale observée le 21 Juin 2015 par le coronographe LASCO. À droite : Flux de rayons X enregistré par le satellite GEOS émis pendant l'éruption de classe M3.8 associée d'un CME. (Source : https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_1). 44
- Figure 3.6** : L'allure de l'amplitude du signal des trois émetteurs VLF pendant une éruption solaire de classe M3.8 enregistrée le 21 Juin 2015. 44
- Figure 3.7** : L'allure de l'amplitude du signal VLF pendant l'activité orageuse enregistrée le 24 Mars 2015 dans l'émetteur DHO. 45
- Figure 3.8** : Le signal VLF brut et traité pendant l'éruption solaire de classe M3.8..... 45
- Figure 3.9** : Variation de l'amplitude du signal des trois émetteurs (DHO, GQD et NRK) pendant la tempête de Décembre 2015. Les doubles flèches noires montrent les périodes où les anomalies ont été enregistrées, les flèches bleues montrent les périodes où les émetteurs étaient éteints. (Crédit image : Kerrache et al., 2021). 47
- Figure 3.10** : Exemple d'une ligne de champ magnétique (en rouge) pour une *L-shell* égale à 5. 48

Figure 3.11 : Événement LEP observé le 24 Mars 2015 à 3:22:36.5 UT. Les deux panneaux supérieurs montrent l'amplitude et la phase du signal DHO en ordre successif. Les deux panneaux inférieurs montrent l'amplitude et la phase du signal GQD.	49
Figure 3.12 : Les étapes de la simulation avec le code LWPC.	51
Figure 3.13 : La phase et l'amplitude des signaux DHO et GQD en fonction de la distance simulée par le code LWPC pour le jour du 24 Mars 2015 à 23:30 UT.....	53
Figure 3.14 : La phase et l'amplitude du signal NRK en fonction de la distance simulée par le code LWPC pour le jour du 24 Mars 2015 à 23:30 UT.	54
Figure 3.15 : Simulation de la phase et de l'amplitude en fonction de la distance pour l'émetteur NRK de jour et de nuit.	54

Chapitre 4: Analyse et interprétation du traitement des données

Figure 4.1 : Variation journalière a) : la composante Z du champ magnétique interplanétaire IMF B_z . b) : l'indice AE. c) : Indice Dst. d) : Amplitude normalisée du signal d'amplitude des trois émetteurs pendant la tempête de Mars 2015.	57
Figure 4.2 : Variation journalière des amplitudes des signaux des émetteurs (DHO, GQD et NRK) pendant la tempête de Mars 2015. Les doubles flèches noires montrent les périodes où des anomalies ont été enregistrées, les flèches bleues montrent les périodes où les émetteurs étaient éteints. (Crédit image : Kerrache et al., 2021).	58
Figure 4.3 : Variation journalière des amplitudes des signaux des émetteurs DHO, GQD et NRK vers la fin du mois de Mars 2015. Les lignes noires montrent les périodes où les émetteurs étaient éteints. (Crédit image : Kerrache et al., 2021).	59
Figure 4.4 : Panneau supérieur variation quotidienne de l'indice Dst, les deux panneaux du milieu Flux mesuré par les sondes Van Allen (RBSP) A et B, panneau en bas le signal d'amplitude normalisé de tous les émetteurs pendant la tempête de Mars 2015.	61

Figure 4.5 : Même présentation que la Figure 4.1 mais pour l'événement de Juin..... 63

Figure 4.6 : Même présentation que la Figure 4.2 de Mars, mais pour l'événement de Juin. La région zoomée montre les perturbations du signal dues aux FAC entre 17:00:00 UT et 18:00:00 UT. FAC, courants alignés avec le champ magnétique. 64

Figure 4.7 : Même présentation que la Figure 4.4 de Mars, mais pour l'événement de Juin.. 66

Figure 4.8 : Même présentation que la Figure 4.1 de Mars, mais pour l'événement de Décembre 2015..... 68

Figure 4.9 : Même présentation que la Figure 4.2 de Mars, mais pour l'événement de Décembre. (Crédit image : Kerrache et al. ; 2021). 69

Figure 4.10 : Même présentation que la Figure 4.4 de Mars, mais pour l'événement de Décembre. 71

Chapitre 5 : Résultats des évènements LEP et leur simulation

Figure 5.1 : Événement LEP observé le 27 Juin 2015 à 1:56:38.75 UT. Les quatre panneaux montrent l'amplitude du signal DHO, GQD, NRK et SPH respectivement. 73

Figure 5.2 : Visualisation des perturbations de type LEP dans le signal de NRK le 22 Décembre 2015..... 73

Figure 5.3 : a) Nombre total d'évènements LEP et nombre de taches solaires observées entre 2010 et 2016. b) Nombre total d'évènements LEP et moyenne annuelle de l'indice Dst observée pendant la même période..... 77

Figure 5.4 : Panneaux supérieurs : Les facteurs β (à gauche) et h' (à droite). Panneaux du milieu : La densité électronique des quatre événements ducted à différentes altitudes. Panneaux inférieurs : L'amplitude du signal VLF simulé (à gauche) et la phase (à droite). L'axe des x indique la distance par rapport à l'émetteur. Ici, Rx et F font référence à l'emplacement du récepteur de Boumerdes et à la position du silence (Fading), respectivement. 80

Figure 5.5 : Même légende que la figure 5.4 sauf qu'il s'agit ici d'évènements non-ducted. 81

Figure 5.6 : Comparaison entre les résultats de la simulation d'un évènement ducted et un évènement non-ducted. La légende est la même que celle de la figure 5.4. (Crédit image : Kerrache et al., 2021). 82

Figure 5.7 : Les chemins de propagation des ondes ducted et non ducted. Les ondes du mode siffleur non ducted se réfléchissent lorsque la fréquence de l'onde, f_w , est approximativement égale à la fréquence de résonance hybride inférieure locale, f_{LHR} . (Crédit image : Green and Inan., 2006). 83

Introduction générale

Introduction générale

Le Soleil fournit à la Terre la chaleur et la lumière nécessaires à la vie humaine. Cependant, le Soleil n'est pas stable et présente des variations cycliques décrites par le nombre de taches magnétiques apparaissant à sa surface. Les observations ont révélé que ce nombre de taches magnétiques (ou taches solaires) a un maximum tous les 10 à 11 ans d'un maximum au suivant, ce qui représente le cycle de l'activité solaire. Il a également été observé que ces changements à la surface du Soleil sont à l'origine de phénomènes spectaculaires tels que les éruptions solaires, les éjections de masse coronale et les détachements de filaments, qui augmentent en nombre et s'intensifient en puissance à l'approche du maximum du cycle. De plus, ces phénomènes peuvent être dangereux pour l'environnement de la Terre et la vie humaine. En effet, les rayonnements UV et X émis lors des éruptions solaires interagissent avec les atomes et les molécules présentes dans l'atmosphère terrestre et produisent ainsi une ionisation supplémentaire dans l'ionosphère. Cette augmentation de la densité électronique perturbe le fonctionnement des satellites, les télécommunications, du GPS, ...etc.

De nombreuses observations par satellites et au sol ont montré que les éruptions solaires peuvent être accompagnées par des éjections de masses coronales (*Coronal Mass Ejections*, CME) dans le milieu interplanétaire. Ces bulles de plasma magnétisé traversent le milieu entre le Soleil et la Terre en seulement deux à trois jours. Ces nuages magnétiques sont responsables des orages géomagnétiques sur Terre qui induisent des changements de longues durées du champ magnétique terrestre et la pénétration des particules du Soleil dans l'environnement terrestre, ce qui déclenche les fameux phénomènes lumineux dans les régions polaires connus sous le nom d'aurores polaires (boréales et australes). L'exemple de l'effet des CME sur la Terre est le célèbre événement de Carrington en 1859 où de superbes aurores polaires étaient visibles même à de très basses latitudes et où des interruptions des réseaux télégraphiques ont été signalées. L'événement géomagnétique le plus récent ayant causé des dommages matériels et financiers est celui observé en 1989 (Boteler, 2019) où des millions de Canadiens ont subi une longue coupure d'électricité (environ 9 heures).

Aujourd'hui, l'effet de ces événements sur l'humanité pourrait être plus dangereux et plus coûteux, car la vie dépend fortement des technologies modernes, notamment des moyens de télécommunications. En effet, les rayons UV et X émis lors des éruptions solaires peuvent perturber le fonctionnement des satellites, GPS, internet, ...etc, tandis que la pénétration de particules chargées dans l'atmosphère terrestre lors d'une CME provoquera des courants

Introduction générale

électriques au sol qui induisent la corrosion des pipelines et des surtensions des transformateurs électriques. Cependant, l'étude du couplage entre l'environnement terrestre et ces événements, que ce soit par des observations, la théorie ou la simulation, permettra de mieux comprendre les différents processus impliqués dans ce couplage, ce qui sera utile pour la prédiction et la prévention.

Plusieurs techniques d'observation sont utilisées pour observer les effets des CME sur la Terre à savoir : Les missions satellitaires, les sondeurs ionosphériques, au moyen des GPS, les magnétomètres, ...etc. Parmi celles-ci, la technique des ondes radio à très basse fréquence (*Very Low Frequency*, VLF) est parmi les plus avantageuses pour étudier l'effet des orages magnétiques et des éruptions solaires sur l'ionosphère, en particulier la région *D*. Le signal VLF (3-30 kHz) se propage très efficacement dans le guide d'ondes formé par la Terre et la région *D* de l'ionosphère et est donc très sensible à tout changement qui peut se produire dans ce guide d'ondes. Ces signaux ont été utilisés pour étudier l'effet des éruptions solaires (A. Kumar & Kumar, 2014), des éclipses solaires (Cohen et al., 2018), des tremblements de terre (Hayakawa et al., 2011), les tsunamis (Rozhnoi et al., 2012), les événements lumineux transitoires (NaitAmor et al., 2010; Salut et al., 2012 et 2013), les effets des tempêtes géomagnétiques (Choudhury et al., 2015 ; S. Kumar et al., 2015 ; Maurya et al., 2018 ; Nawanko et al., 2016).

Notre travail consiste à mettre en évidence les effets directs et indirects des tempêtes géomagnétiques sur la couche *D* de l'ionosphère à partir des données VLF enregistrées en 2015 par le récepteur VLF installé à la station régionale du CRAAG à Boumerdes. En effet, la pénétration des particules du CME dans l'environnement terrestre, suite à la reconnexion magnétique entre le vent solaire et la magnétosphère, constitue une source directe de perturbation appelée *Field Aligned Current* (FAC). Le second type de perturbation concerne la précipitation d'électrons énergétiques piégés dans la magnétosphère suite à leur interaction avec l'onde sifflante émise par la foudre, connue sous le nom de *Lightning induced Electron Precipitation* (LEP). En plus de l'étude instrumentale, nous avons simulé certains événements LEP en utilisant le code *Long Wave Propagating Capability* (LWPC) afin d'estimer la densité d'électrons produite par les LEP.

Le manuscrit est structuré en 5 chapitres. Le Chapitre 1 est consacré à la présentation de la bibliographie sur le Soleil, l'activité solaire, la connexion Soleil-Terre et enfin l'ionosphère et la propagation des signaux VLF. Le Chapitre 2 décrit l'instrument de mesure que nous avons utilisé pour l'enregistrement des signaux VLF, les différentes bases de données satellitaires et

Introduction générale

terrestres utilisées pour obtenir les paramètres du vent solaire et les indices géomagnétiques. Le Chapitre 3 décrit la méthode de traitement adoptée pour l'observation des effets directs des CME, la méthode d'identification des phénomènes LEP et enfin la simulation du signal VLF avec le code LWPC. Les résultats sont présentés en deux chapitres (Chapitre 4 et Chapitre 5) selon le type de perturbation à présenter. Une conclusion générale est formulée à la fin du manuscrit.

Chapitre 1 : Relation Soleil-Terre
et propagation des ondes électromagnétiques

Chapitre 1 : Relation Soleil-Terre et propagation des ondes électromagnétiques

1 Relation Soleil-Terre et propagation des ondes électromagnétiques

1.1 Relation Soleil-Terre

1.1.1 L'activité solaire

Le Soleil est l'importante étoile du système solaire, magnétisée, entièrement ionisée, de masse très grande composée principalement d'hydrogène et d'hélium avec quelques traces d'autres plus lourdes espèces. Malgré son importance pour la vie sur Terre, le Soleil peut être la source de phénomènes perturbateurs affectant la Terre et même d'autres planètes. C'est un astre actif qui contrôle les conditions de l'ensemble du milieu interplanétaire. Le soleil tourne autour de son axe de révolution d'une période de 27 jours à l'équateur et de 35 jours aux pôles.

Ce gradient de rotation angulaire est responsable de l'apparition de structures magnétiques à la surface du Soleil telles que les filaments et les taches solaires. Des observations continues du disque solaire ont révélé que la migration des taches solaires vers la surface du Soleil présente une certaine périodicité. En effet, au fil du temps, l'apparition des taches solaires change en nombre, en emplacement et en configuration magnétique. Tout d'abord, les observations ont montré que la tache solaire commence à apparaître aux hautes latitudes sous la forme d'un seul trou circulaire. Puis, au fil du temps, plusieurs taches solaires commencent à apparaître, parfois en groupe avec la migration des anciennes taches vers des latitudes plus basses.

Il a été observé que le nombre de taches solaires atteint son maximum sur une période entre 5 et 6 ans puis il diminue jusqu'à la disparition complète des taches solaires. Cette évolution constitue le cycle de l'activité solaire de 11 ans (voir Figure 1.1). En association avec l'apparition des taches solaires, plusieurs phénomènes éruptifs ont été observés tels que les éclats solaires (éruptions solaires), les particules énergétiques (*Solar Energetic Particles*, SEP), les éjections de masse coronale et les éruptions de filaments magnétiques comme présentés dans la Figure 1.2.

Chapitre 1 : Relation Soleil-Terre et propagation des ondes électromagnétiques

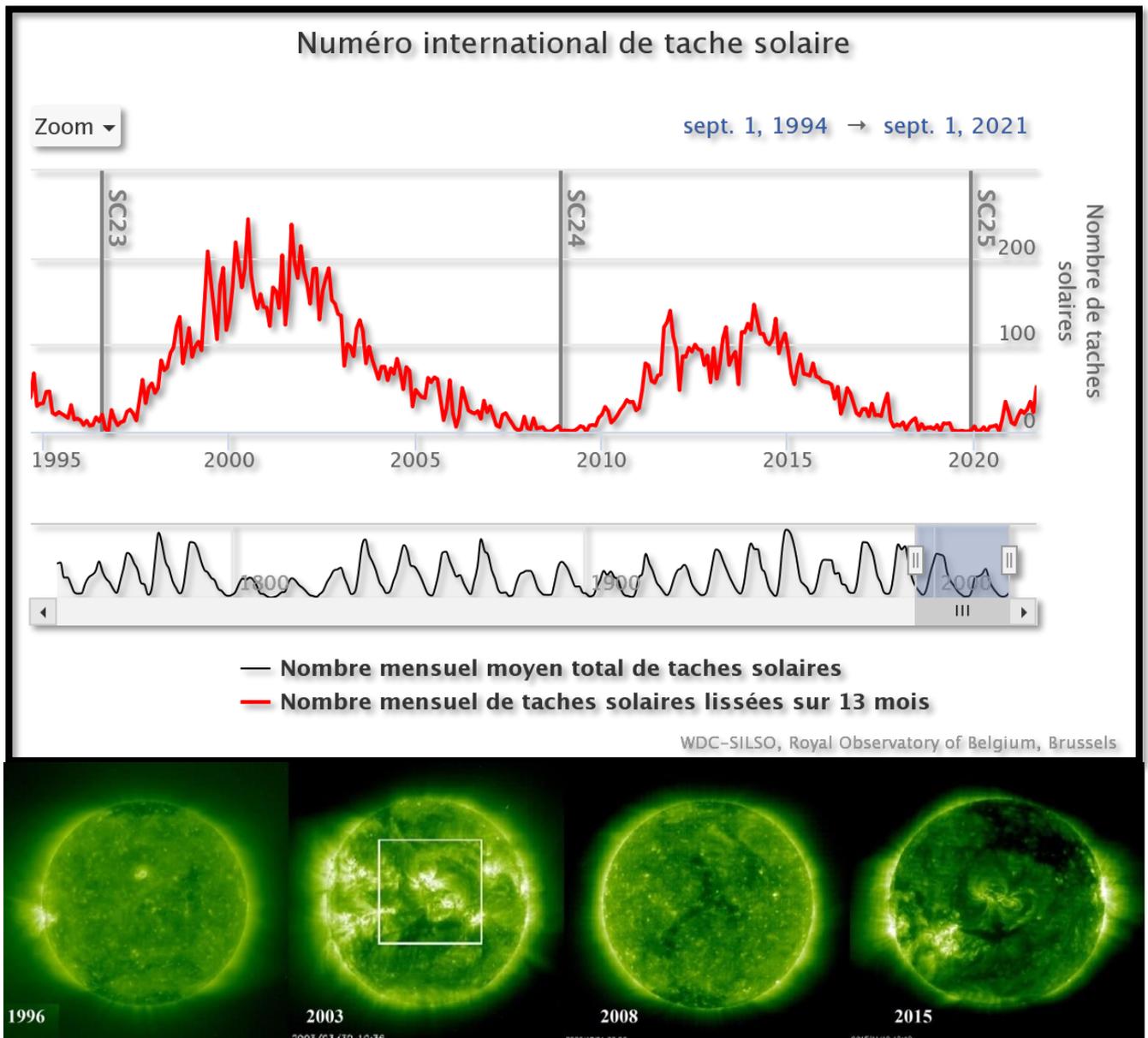


Figure 1.1 : Progression des taches solaires des cycles solaires 24 et 25 (en haut), vue du Soleil à 195 Å entre les périodes calmes et actives. (Crédit image : SpaceWeatherLive.com, NASA).

Chapitre 1 : Relation Soleil-Terre et propagation des ondes électromagnétiques

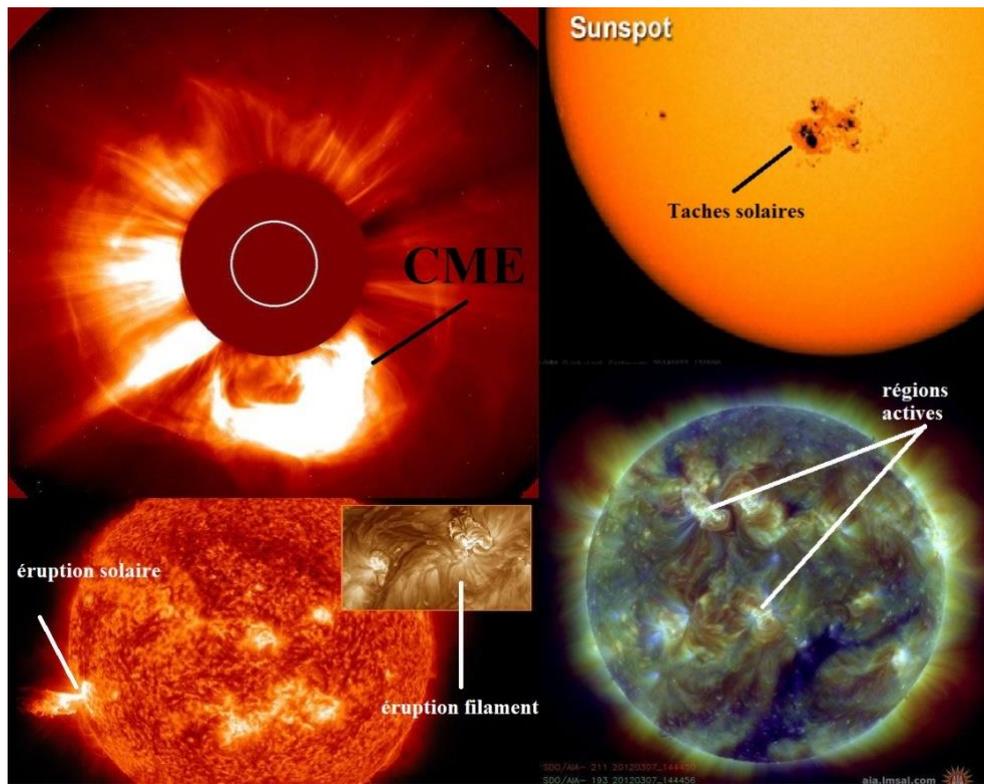


Figure 1.2 : Différents phénomènes éruptifs. (Crédit image : NASA).

1.1.2 Les vents solaires

Le milieu interplanétaire entre le soleil et les planètes est constitué de particules chargées, principalement des électrons, des protons avec un faible taux d'ions lourds, tels que He^+ , formant un plasma magnétisé de faible densité appelé le vent solaire. Son existence a été décrite pour la première fois par Parker en 1958. En Septembre 1959 Luna 2 a été lancée et restera dans l'histoire comme la première sonde à avoir prouvé la présence du vent solaire dans l'espace. Le vent solaire se déplaçant à une vitesse moyenne de 400 km/s (Parker, 1958). Selon les observations satellitaires, le vent solaire est classé en deux types, un vent solaire lent et un vent solaire rapide, en fonction de ses caractéristiques (vitesse, température, densité et de l'origine de sa formation). Cette décomposition a été mise en évidence à la fin des années 50, dont la trajectoire a permis de distinguer les différentes classes du vent solaire.

Pendant le minimum d'activité solaire, le vent solaire lent est une émission continue de particules provenant principalement des basses et moyennes latitudes du disque solaire et dont

Chapitre 1 : Relation Soleil-Terre et propagation des ondes électromagnétiques

la vitesse est comprise entre 300 km/s et 500 km/s (Sonny Lion, 2016). En revanche, le vent solaire rapide dépend fortement du cycle d'activité solaire et provient des trous coronaux polaires avec des vitesses de déplacement comprises entre 500 et 800 km/s (McComas et al., 2003, 2008).

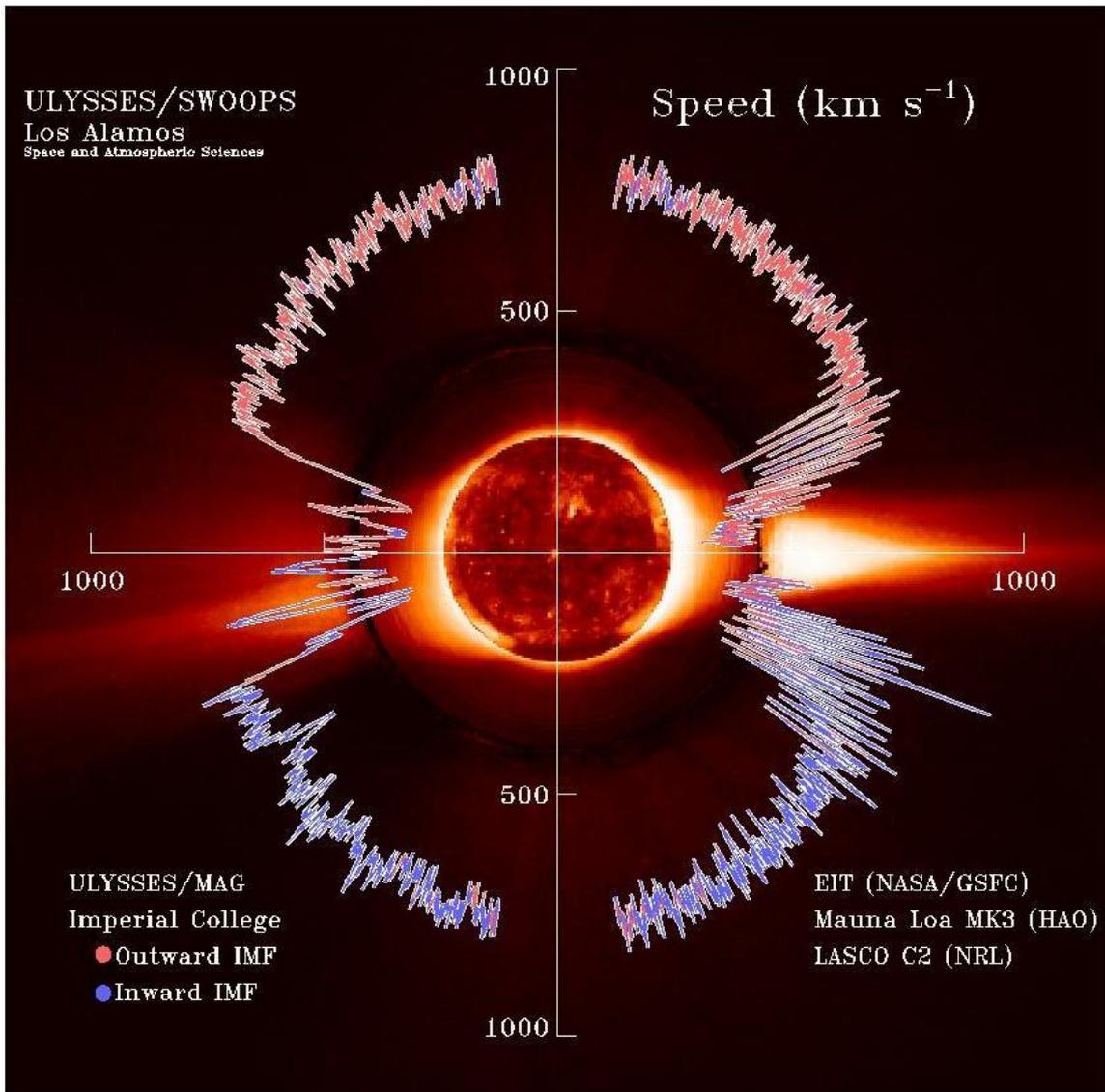


Figure 1.3 : Observations du vent solaire par la sonde Ulysse. Le vent lent (400 km/s) est confiné aux régions équatoriales, tandis que le vent rapide (750 km/s) est visible au-dessus des pôles. (Crédit image : NASA).

Chapitre 1 : Relation Soleil-Terre et propagation des ondes électromagnétiques

1.1.3 Les éruptions solaires

Les éruptions solaires appartiennent à des événements impulsifs du Soleil observées durant la progression de l'activité solaire. Elles se produisent dans les régions actives du Soleil où règne un champ magnétique très intense. Les régions actives apparaissent en association avec l'apparition des taches solaires, et donc elles suivent le cycle de l'activité solaire. La première éruption solaire enregistrée s'est produite le 1^{er} Septembre 1859 (R.Carrington., 1860 ; R. Hodgson, 1860).

L'éruption solaire est une violente transformation de l'énergie emmagasinée dans les structures en boucles de champ magnétique solaire au niveau des paires de taches solaires, Figure 1.4. Elles apparaissent comme des explosions dans le Soleil auquel un puissant rayonnement dans les longueurs d'ondes γ , X et UV est émis (Kretzschmar et al., 2010). Les rayons X émis durant l'éruption solaire sont mesurés par le satellite GEOS dans les longueurs d'ondes entre 1 Å et 8 Å. Selon l'intensité de ces rayons X, les éruptions solaires sont séparées en 5 classes : A, B, C, M et X du moins puissant au plus puissant respectivement.

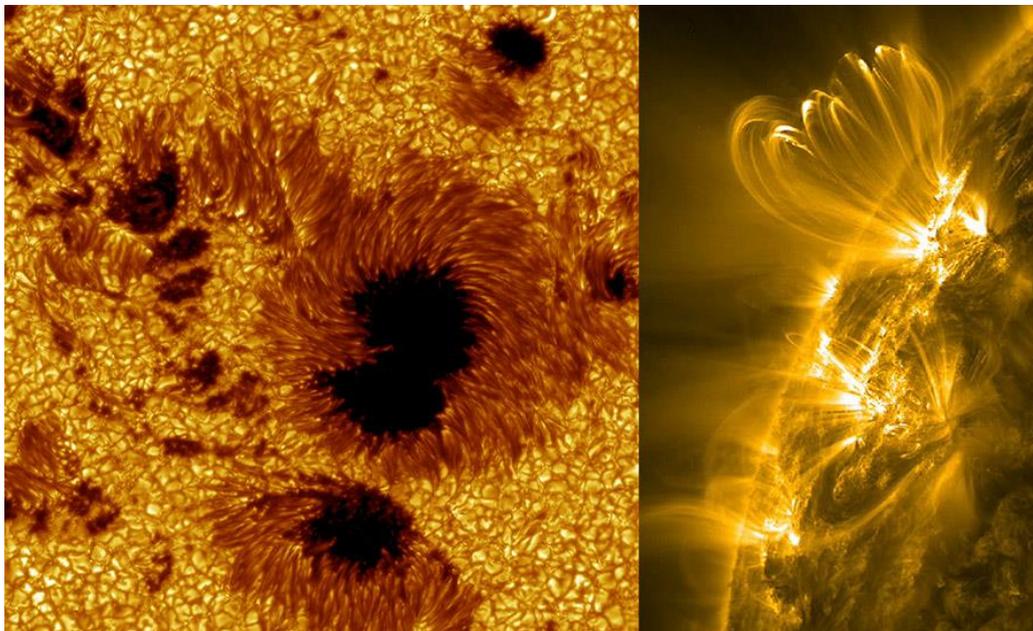


Figure 1.4 : Deux vues des régions actives : un gros plan des taches solaires (à gauche) et des boucles coronales dans la longueur d'onde de l'ultraviolet du Soleil (à droite).

(Crédit image : <https://scied.ucar.edu>).

Chapitre 1 : Relation Soleil-Terre et propagation des ondes électromagnétiques

Le Tableau 1.1 donne les flux des rayons X de chaque classe et leurs impacts possible sur l'environnement de la Terre. Il faut préciser que la classe X des éruptions solaires n'est pas limitée et peut atteindre des flux au-dessus de la saturation des détecteurs comme celle observée en Avril 2003 et qui a été estimée à X28. Dans la Figure 1.5 sont présentées trois exemples des éruptions solaires de classes C, M et X.

Tableau 1.1 : Classification des éruptions solaires en fonction du flux énergétique des rayons X dans la gamme 1-8 Å et de leur impact.

Classes de l'éruption	Flux (W/m ²) entre 1 et 8 Angströms	Impact
X	$>10^{-4}$	Impacts très importants sur le champ magnétique terrestre : <ul style="list-style-type: none"> • nuire la santé des astronautes • défavoriser des passagers des vols en hautes latitudes • interrompre les communications radios • perturber les satellites • provoquer des défaillances des réseaux de transport d'électricité
M	$10^{-4} > \text{flux} > 10^{-5}$	Perturbations du champ magnétique terrestre : <ul style="list-style-type: none"> • coupures de certaines communications radios dans les régions polaires
C	$10^{-5} > \text{flux} > 10^{-6}$	Sont généralement de trop faible intensité pour affecter notre environnement planétaire
B	$10^{-6} > \text{flux} > 10^{-7}$	
A	$< 10^{-7}$	

Chapitre 1 : Relation Soleil-Terre et propagation des ondes électromagnétiques

Il existe trois types des éruptions solaires : éruptifs, confinés et éruptifs ratés. En effet, durant l'éruption solaire de la matière peut s'échapper à la gravité du Soleil et s'éjecte dans le milieu interplanétaire, ce sont les phénomènes éruptifs. S'il n'y a pas de la matière qui s'éjecte après l'éruption on appelle donc ce type confiné. Parfois de la matière peut apparaître dans les images des coronographes, mais n'ayant pas suffisamment d'énergie pour échapper à la gravité du Soleil, et donc elle retourne vers le Soleil, ce sont les phénomènes éruptifs ratés. Les phénomènes éruptifs sont les plus importants à étudier puisqu'ils affectent énormément la Terre. Effectivement, la matière éjectée est constituée de particules chargées qui transportent avec elles un champ magnétique. Cependant, si la direction du déplacement de ce nuage magnétisé est vers la Terre, il peut être dangereux si les particules de ce nuage pénètrent dans l'environnement de la Terre. Il a été observé aussi que des particules très énergétiques sont projetées dans le milieu interplanétaire avec l'éruption et peuvent atteindre la Terre en quelques minutes seulement. Ce sont les événements de particules solaires énergétiques (ou *Solar Energetic Particles* en anglais).

Chapitre 1 : Relation Soleil-Terre et propagation des ondes électromagnétiques

Activité solaire

Satellite rayons-X GOES, rayonnement solaire moyen sur une minute dans la bande passante 1-8 Ångström

Zoom 2 heures 6 heures 24 heures

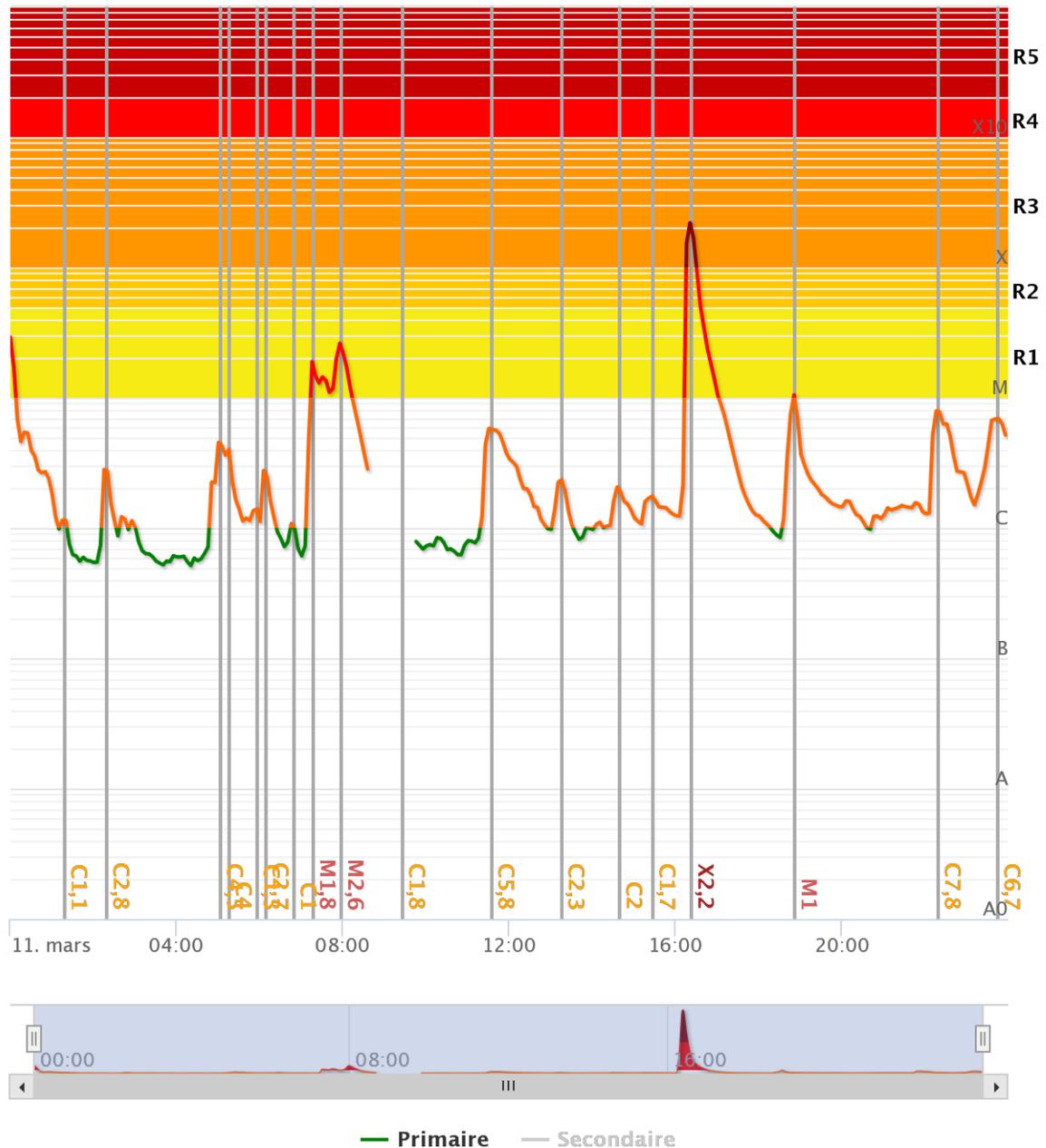


Figure 1.5 : Observations des trois différentes classes C, M et X d'éruptions solaires dans la région 2297 le 11 Mars 2015 par le satellite GEOS. (Crédit image : SpaceWeatherLive.com).

Chapitre 1 : Relation Soleil-Terre et propagation des ondes électromagnétiques

1.1.4 Les éjections de masses coronales

L'éjection de masse coronale est une expulsion de la matière et de champ magnétique depuis la couronne solaire vers le milieu interplanétaire. Elle a la forme d'un gigantesque nuage de plasma éjecté souvent lors de fortes éruptions solaires et l'éruption des filaments. Les CME sont des phénomènes à grande échelle puisque leur taille peut atteindre plusieurs dizaines de rayon solaire. Elles ont pour effet de modifier les caractéristiques du vent solaire vu que leurs vitesses peuvent atteindre des centaines de km/s. Assez rapides, elles peuvent parcourir la distance Terre-Soleil en quelques jours (typiquement trois jours).

Les CME sont observables au moyen de coronographes comme LASCO (à bord du satellite SOHO) et STEREO. Ces observations nous aident à estimer la vitesse de déplacement des CME, leur étendue et leur direction. Les CME sont liées à l'activité solaire puisqu'elles sont en une grande partie associée aux éruptions solaires. En effet, lorsque le Soleil est dans une période calme les éjections de masse coronale sont rares. Il peut y avoir quelques éjections de masses coronales par mois. Mais lorsque le cycle solaire s'approche du maximum, les éjections de masse coronale deviennent plus fréquentes et nous pouvons voir plusieurs CME par jour (Borovsky and Denton, 2006).

Les éjections de masse coronale et le champ magnétique se déplacent conjointement, et donc sont la principale source de fortes tempêtes géomagnétiques. En effet, si une CME est dirigée vers la Terre la reconnexion entre le champ magnétique du CME et la magnétosphère peut avoir lieu permettant ainsi aux particules du CME de pénétrer dans l'environnement de la Terre. C'est la raison pour laquelle il est très important de les surveiller en temps réel au moyen des observations satellitaires (tel que : SOHO et STEREO) et depuis le Sol par des télescopes optiques ou radios.

Il existe différentes formes de CME selon leur projection sur le plan du coronographe. Les CME dirigées vers la Terre ont une forme circulaire, et donc appelées halo. Par contre, les CME dont l'axe principal de déplacement est éloigné par rapport à l'axe Soleil-Terre elles ont une forme conique d'angle d'ouverture inférieur à 360° , et donc appelées halo partiel (Roussev and Sokolov, 2006). La Figure 1.6 montre une éjection de masse coronale de type HALO observée par STEREO le 23 Juillet 2012

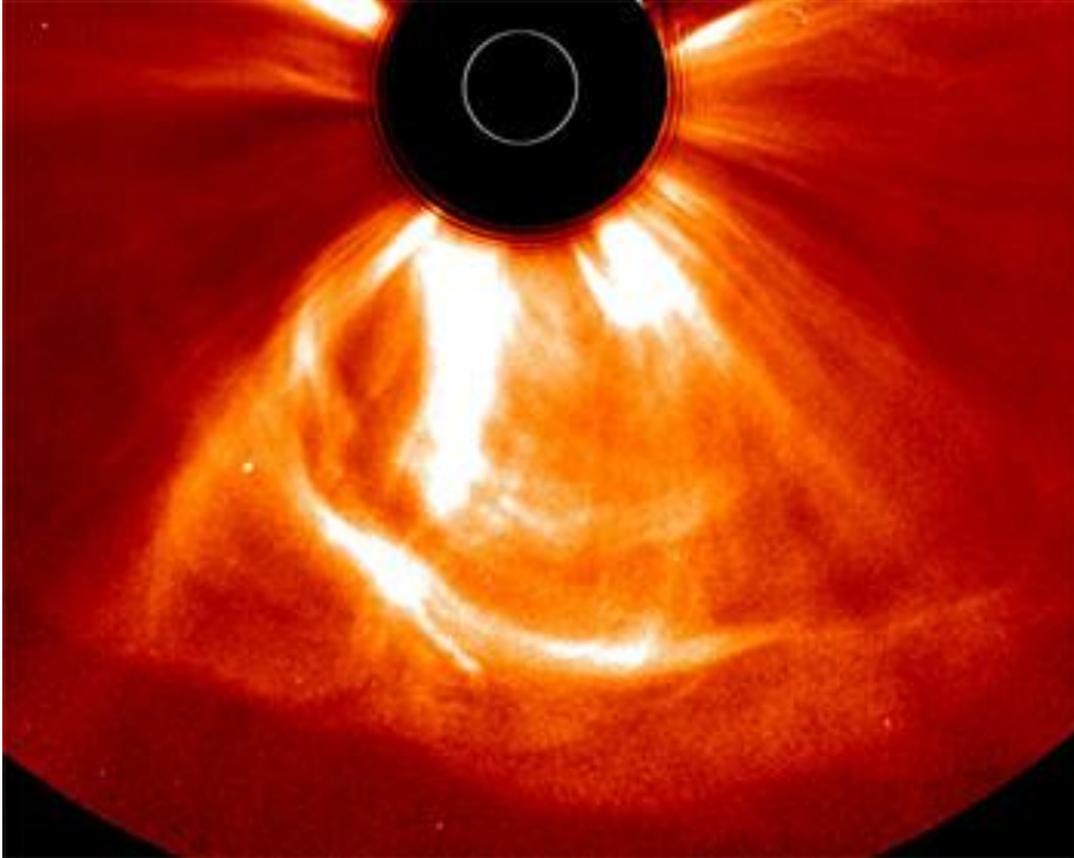


Figure 1.6 : Une CME (HALO) éjectée le 23 Juillet 2012, comme observée par le satellite STEREO. (Crédit image : STEREO, NASA).

1.1.5 La magnétosphère

Comme un aimant, notre Terre possède un champ magnétique. Il est généré par les mouvements complexes du fer liquide au cœur de notre planète. Ces mouvements sont dus non seulement à la rotation de la Terre, mais aussi au transport de chaleur par convection. La région à l'intérieur de laquelle le champ magnétique terrestre contrôle le mouvement de la matière s'appelle la magnétosphère. Ce bouclier magnétique fait office de barrière contre les multiples agressions venues de l'espace, comme les vents solaires et les CME. Sans le champ magnétique terrestre, l'atmosphère de la Terre ressemblerait à celle de Mars et de Vénus. La magnétosphère est très dynamique et n'atteint donc jamais un état d'équilibre. En effet, les vents solaires affectent continuellement la magnétosphère, modifiant sa taille et sa composition. En plus de

Chapitre 1 : Relation Soleil-Terre et propagation des ondes électromagnétiques

l'effet solaire, une série de processus internes peuvent déstabiliser la magnétosphère en provoquant des reconfigurations soudaines et quasi quotidiennes.

Contrairement à l'ionosphère et à l'atmosphère neutre, la magnétosphère a une densité plus faible et est toujours soumise à un plasma solaire très énergétique. Cette caractéristique de la magnétosphère signifie que les collisions entre particules sont rares. En d'autres termes, le libre parcours moyen d'une particule dans la magnétosphère est très grand, environ 100 000 km. Il s'agit alors d'un plasma non collisionnel et turbulent. Enfin, le plasma de la magnétosphère est formé de particules chargées et leur mouvement est donc contrôlé par le champ magnétique de la Terre. Inversement, le mouvement des particules chargées dans le plasma de la magnétosphère génère un champ électromagnétique qui modifie l'environnement électrique et magnétique de la Terre.

Comme le montre la Figure 1.7, la région extérieure de la magnétosphère est l'onde de choc où le vent solaire passe de l'état supersonique à l'état subsonique en raison des collisions avec la magnétosphère terrestre. Le plasma ralenti s'écoule ensuite dans la magnétogaine qui est une région de plasma très turbulente où circule une grande variété d'ondes électromagnétiques de très basse fréquence. Le champ magnétique de la magnétogaine est d'origine solaire et il est traversé par la matière du vent solaire. Au bord de la magnétosphère se trouve la magnétopause. Derrière la magnétopause se trouve un plasma, en partie d'origine solaire et en partie d'origine terrestre, aux caractéristiques complètement différentes. Dans la magnétosphère extérieure, du côté de la nuit, il y a deux lobes (nord et sud) sans plasma. Entre les deux lobes se trouve une couche de plasma très dense et instable avec un courant est-ouest. La magnétosphère interne contient les ceintures de radiation (ou ceintures de Van-Allen).

L'interaction entre le vent solaire et la magnétosphère fait que les particules du vent solaire pénètrent dans la magnétosphère, la couche de plasma (ou couche de courant) se remplit et que le courant s'intensifie. Cette situation fait craquer la couche de plasma en deux parties : une partie se déplace vers l'espace et l'autre vers la Terre, formant des sous-orages magnétiques. Les manifestations visibles de ces sous-orages se produisent dans les régions polaires et sont connues sous le nom d'aurores polaires. Dans des conditions extrêmes d'activité solaire, ces phénomènes deviennent plus spectaculaires, plus fréquents et peuvent être observés même dans des régions de latitude inférieure à celle des pôles.

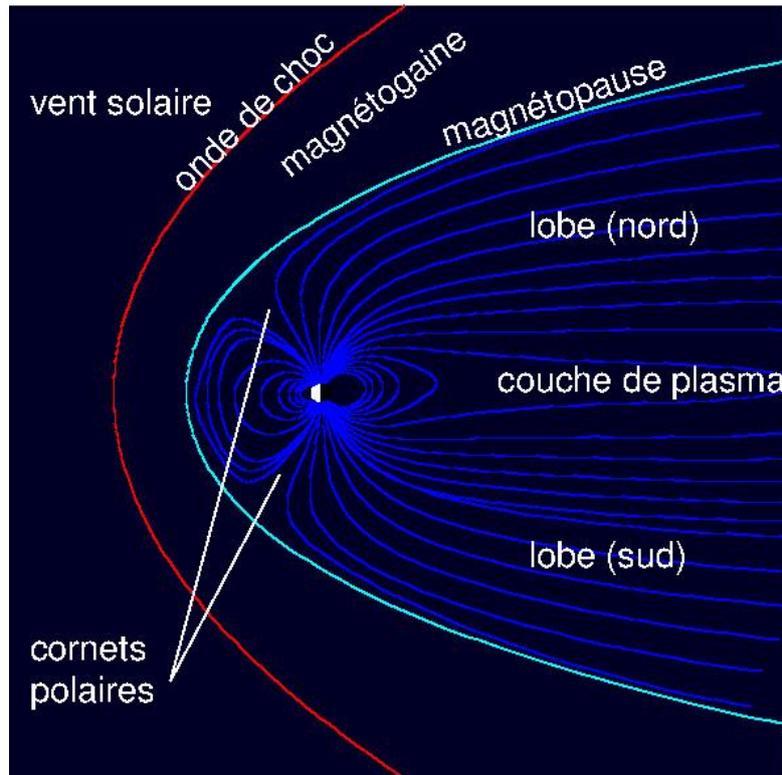


Figure 1.7 : La structure de la magnétosphère terrestre.
(Crédit image : www.encyclopedie-environnement.org).

1.1.6 Les ceintures de radiations

Avant 1958, les scientifiques avaient émis l'hypothèse que les ions et les électrons pouvaient être piégés par le champ magnétique terrestre. Ils pensaient que les particules capturées pendant une éruption solaire formaient un anneau qui disparaissait rapidement après l'éruption. Parmi eux, Kristian Birkeland et Carl Størmer qui avaient déjà étudié cette possibilité au milieu du XIX^e siècle. Suite au lancement des missions spatiales Explorer 1, Explorer 3, Explorer 4 et Pioneer 3, toutes en 1958, James Alfred Van Allen et ses étudiants ont analysé les données fournies par les différentes missions et ont pu confirmer que la Terre est entourée d'un grand flux de particules relativistes formant les ceintures de radiation (Jean Lilensten et Pierre-Louis Blelly, 2000). Elles sont actuellement appelées ceintures de Van

Chapitre 1 : Relation Soleil-Terre et propagation des ondes électromagnétiques

Allen. Des ceintures similaires ont également été observées autour d'autres planètes comme Jupiter, Saturne, Mercure.

En 2012, dans le cadre de la mission *Van Allen Probes*, la NASA a lancé deux satellites identiques nommés Van Allen Probes dans le but de caractériser les régions affectées de ces ceintures. L'un des principaux objectifs de la mission est de déterminer les processus impliqués dans l'accélération et le mouvement des particules (ions et électrons) au sein des ceintures et l'origine de leur déclenchement. Outre l'accélération des particules de la ceinture de radiation, la mission s'intéresse également à l'étude des processus par lesquels les électrons peuvent échapper au piégeage magnétique et se précipiter à basse altitude dans l'atmosphère (D. HERRERA, 2017 ; Solène Le Bourdieu, 2007 ; R. Benaquista, 2017). Les observations ont montré que la Terre est entourée de deux ceintures de radiation interne et externe de dimensions et de compositions différentes présentées sur la Figure 1.8.

La ceinture interne

La ceinture de radiation interne se situe entre 700 km et 10 000 km au-dessus de la surface de la Terre et se compose principalement de protons de haute énergie. L'origine des protons dans cette région provient du rayonnement cosmique et le vent solaire, qui sont ensuite piégés par le champ magnétique de la Terre.

La ceinture externe

Elle s'étend entre 13 000 km et 60 000 km au-dessus de la surface de la Terre. Toutefois, ces dimensions sont très variables et peuvent donc s'étirer ou se raccourcir en fonction de la période d'activité géomagnétique. La ceinture extérieure est principalement peuplée d'électrons de très haute énergie avec quelques proportions d'ions. Dans cette région très dynamique, le flux peut changer de 5 ordres de grandeur sur une période de quelques heures à quelques jours, avec une magnitude maximale de 4-5 rayons terrestres.

Les particules dans cette ceinture ont des vitesses très élevées où les processus d'accélération sont attribués au transport de particules externes, ou bien à une source d'énergie déployée à l'intérieur de la ceinture. Cette deuxième option a été confirmée par les données des sondes de Van Allen (ou RBSP), enregistrées en octobre 2012, où il a été observé qu'une augmentation de l'activité provenant du centre de la ceinture extérieure qui s'étend vers les bords de la ceinture. La partie intérieure de la ceinture extérieure contient des protons et des

Chapitre 1 : Relation Soleil-Terre et propagation des ondes électromagnétiques

ions lourds avec une densité de charge positive très élevée formant une barrière pour ces électrons les empêchant d'atteindre la ceinture intérieure ou même de se précipiter dans la basse atmosphère.

La ceinture de radiation extérieure peut se scinder en deux couches distinctes lors d'une forte perturbation géomagnétique. En effet, en février 2013 et sur la base des observations des deux sondes RBSP, un groupe de chercheurs de l'Université du Colorado a annoncé la découverte d'une troisième ceinture de radiation non permanente observée en septembre 2012.

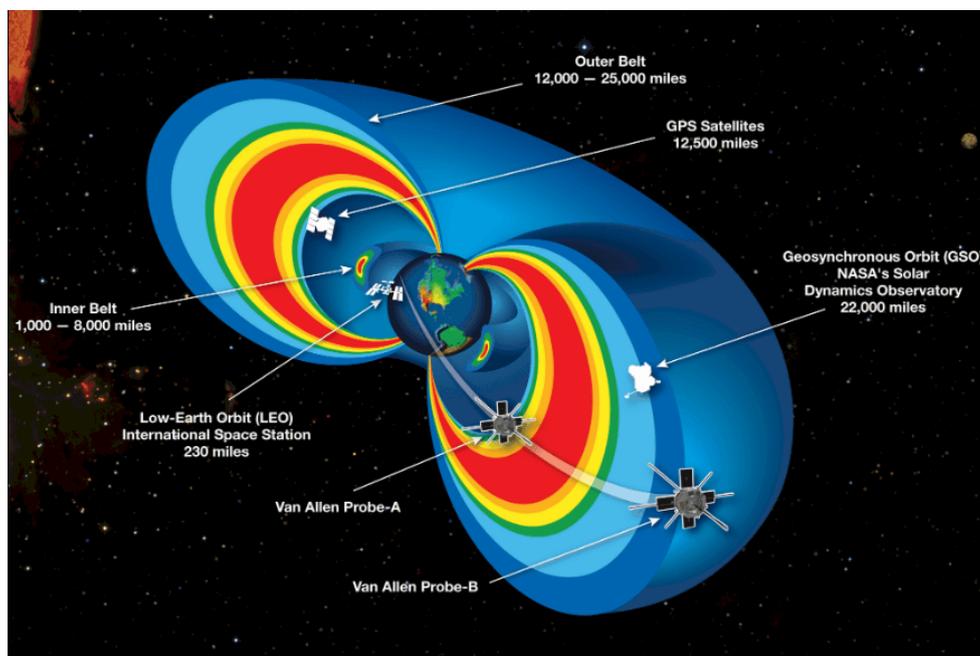


Figure 1.8 : Image des ceintures de Van Allen. (Crédits image : NASA).

Selon les scientifiques de l'université, le phénomène a été causé par une onde de choc (électromagnétique et plasma) provenant d'une éjection de masse coronale (CME) qui a persisté pendant quatre semaines avant d'être violemment déplacée par une autre onde de choc provenant d'une autre CME.

1.1.7 Les orages géomagnétiques

Les orages géomagnétiques sont de fortes perturbations du champ magnétique terrestre. Ils sont causés par la reconnexion du champ magnétique du vent solaire (ou IMF) avec celui de la magnétosphère (C. T. Russell, 2000; Gautier Nguyen, 2021). Il est établi que l'orientation de

Chapitre 1 : Relation Soleil-Terre et propagation des ondes électromagnétiques

l'IMF par rapport au dipôle magnétique terrestre joue un rôle important dans le déclenchement des orages magnétiques. En effet, la direction de l'IMF du vent solaire vers le sud (négatif) est la première condition pour établir une reconnexion magnétique du côté jour de la Terre. D'autre part, la pénétration de grandes quantités de plasma solaire dans la magnétosphère interne va provoquer l'intensification de divers courants qui vont à leur tour induire un champ magnétique qui va s'ajouter à celui de la Terre. Ces conditions conduisent au déclenchement d'orages magnétiques. Pour l'IMF positif (vers le nord), aucune reconnexion n'existe du côté jour et la probabilité de déclenchement d'un orage est donc faible. Néanmoins, une reconnexion du côté nuit au niveau de la queue de la magnétosphère peut avoir lieu et provoquer des sous-orages et des aurores polaires.

Ces perturbations dans le champ magnétique de la terre sont mesurées à l'aide de magnétomètres placés dans différentes régions. Les fluctuations du champ magnétique terrestre mesurées dans ces régions sont représentées par des indices géomagnétiques qui indiquent la sévérité de la perturbation. Parmi eux, nous définissons les indices les plus utilisés pour étudier les orages géomagnétiques : Kp, Dst et AE (M. M. Fares et al., 1997) donnés dans le Tableau 1.2.

Chapitre 1 : Relation Soleil-Terre et propagation des ondes électromagnétiques

Tableau 1.2: Les indices géomagnétiques. Source astrosurf.com.

Indice	Description	Échelle
Kp	Caractérise l'effet des particules du vent solaire sur le champ géomagnétique. Il est évalué tous les 3 heures. C'est la moyenne arithmétique des valeurs de K mesurées dans 13 observatoires dont 1 magnétomètre placé dans l'hémisphère Sud.	De 0 (calme) à 9 (très perturbé)
AE	Indice planétaire A moyenné sur la base des données d'un ensemble de stations spécifiques mesurant Kp	Entre 0-9
Dst	Disturbance Storm Time. Cet indice mesure la déclinaison du champ magnétique terrestre. Il permet d'évaluer la sévérité des tempêtes géomagnétiques. Plus la valeur du Dst est négative plus l'énergie accumulée dans la magnétosphère est importante.	-50 nT : conditions modérées -100 nT : Tempêtes intenses -250 nT : Tempêtes extrêmes

La Figure 1.9 présente un exemple de perturbation géomagnétique intense enregistrée le 17 Mars 2015. Les enregistrements montrent une forte diminution de l'indice Dst à -222 nT, une augmentation de la pression d'environ 29 nPa et l'indice AE atteint une valeur de 2000 nT, cette perturbation a atteint son maximum le 18 Mars et mettait plusieurs jours pour retourner à l'état d'équilibre.

Chapitre 1 : Relation Soleil-Terre et propagation des ondes électromagnétiques

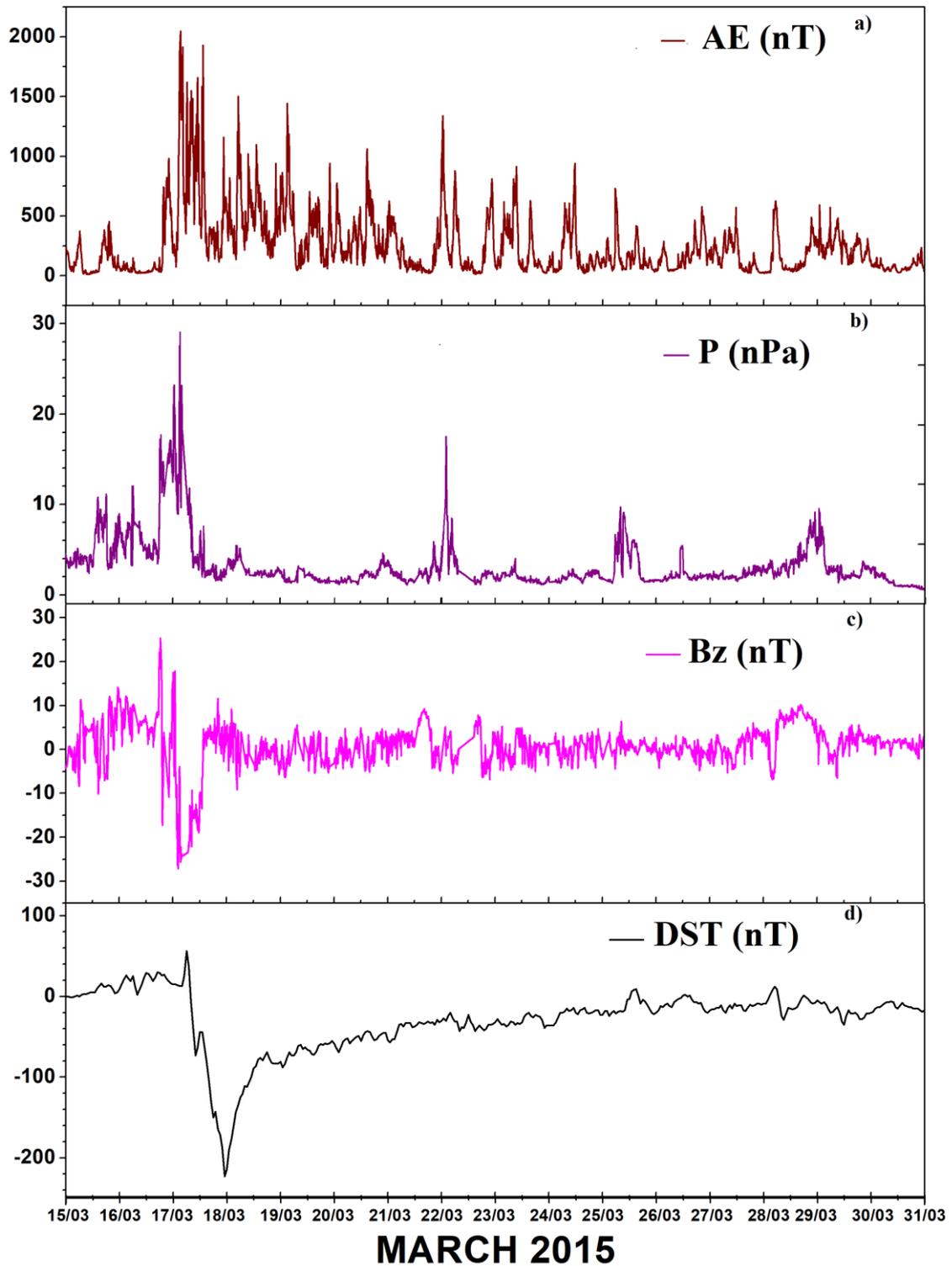


Figure 1.9 : Variation journalière de : a) l'indice AE, b) la pression P, c) la composante Z du champ magnétique interplanétaire IMF B_z , et enfin d) l'indice Dst, pour la tempête de Mars 2015.

Chapitre 1 : Relation Soleil-Terre et propagation des ondes électromagnétiques

1.1.8 L'ionosphère

L'atmosphère neutre de la Terre est ionisée sur toute la partie éclairée du globe à partir de 60 km jusqu'à 1 000 km. Cette région de l'atmosphère est appelée l'ionosphère. L'origine des électrons et des ions constituant l'ionosphère réside principalement dans l'interaction entre le flux de rayonnement solaire et les molécules de l'atmosphère neutre si l'énergie du photon est supérieure au seuil d'ionisation de la molécule pour lui arracher un électron. À cet effet, un équilibre entre la production de paires électron-ion et les processus de pertes par recombinaison et attachement s'établit. Puisque les processus de pertes varient en fonction de l'altitude, il en résulte des couches ionisées de densité d'électrons bien précise. Cette couche conductrice joue le rôle de réflecteur pour les ondes radioélectriques et permet la transmission sur de grandes distances malgré la courbure de la Terre

La théorie de formation de l'ionosphère a été proposée par Sidney Chapman (Chapman., 1931) pour comprendre le mécanisme de la formation des différentes couches ionisées. Dans cette théorie, le taux de production de paires électron-ion est proportionnel d'un côté à l'intensité du rayonnement incident, d'autre côté à la densité des particules neutres susceptibles d'absorber ce rayonnement. Ces deux facteurs varient en sens inverse en fonction de l'altitude. En effet, plus le rayonnement solaire pénètre dans l'atmosphère plus il est absorbé, et donc son intensité croît en même temps que l'altitude. Par contre, la densité des neutres diminue très rapidement quand l'altitude augmente. Il en résulte un maximum du taux de production de paires électron-ion situé à une altitude intermédiaire. La position du maximum de production de paires dépend de l'angle zénithal du Soleil. Cette théorie a permis à Chapman de déterminer ensuite la forme de la couche ionisée en égalant cette fonction de production à une fonction de perte. Il obtient ainsi différents types de couches, appelés respectivement α -Chapman et β -Chapman, dont on trouve des exemples dans l'ionosphère réelle. L'ionosphère est caractérisée par un profil vertical typique de la densité électronique comme illustré dans la Figure 1.8. Elle se compose de trois couches D, E et F lesquelles sont présentés ci-dessous (Yeh and Liu, 1972 ; Budden, 1988)

Chapitre 1 : Relation Soleil-Terre et propagation des ondes électromagnétiques

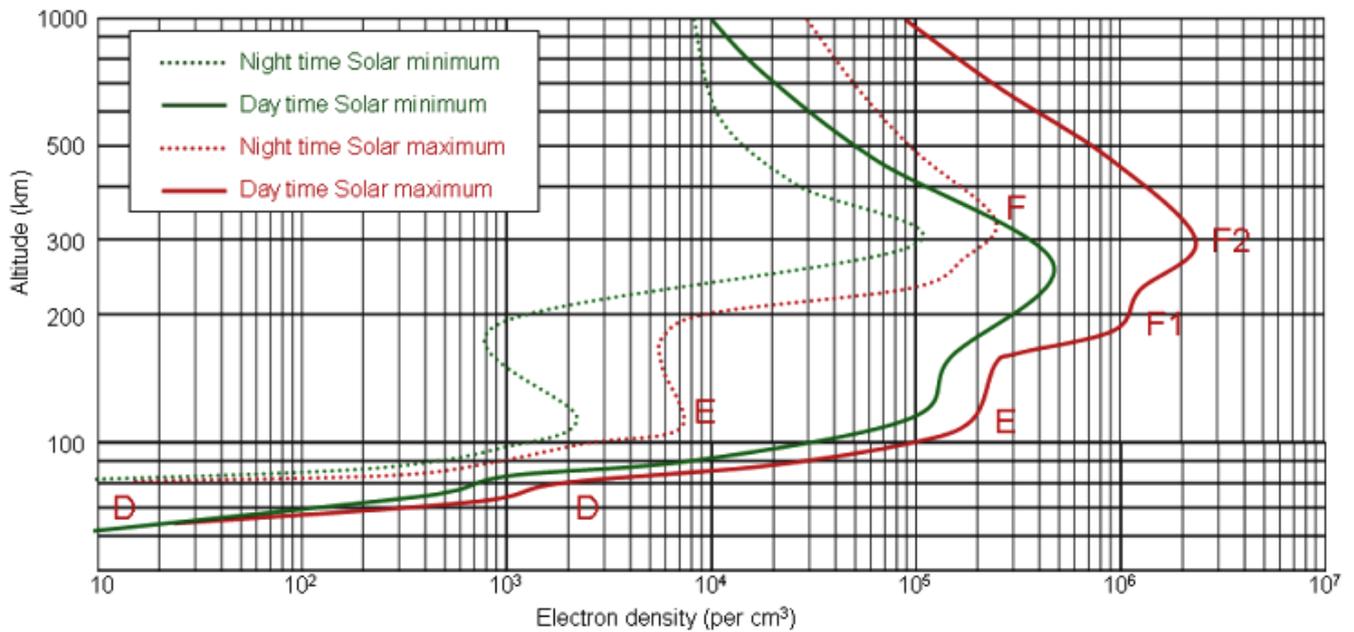


Figure 1.10 : La variation diurne et nocturne de la densité des électrons dans l'ionosphère aux minima et maxima du cycle solaire. (Crédit image : Station de surveillance SID).

1.1.8.1 Région D

Il s'agit de la couche inférieure de l'ionosphère qui s'étend d'environ 50 km à 90 km. La production de paires électron-ion est assurée par les rayons X et UV émis par le Soleil durant le jour et les rayons cosmiques durant la nuit. Du fait de sa proximité avec la surface terrestre, elle est soumise à des variations importantes sous l'effet de différentes sources de perturbation. En effet, les processus de perte (recombinaison et attachement) sont très importants à ces altitudes, car ils dépendent de la densité des neutres. Ceci a pour effet de réduire le nombre d'électrons pendant la nuit et de faire disparaître complètement la couche D de l'ionosphère.

Outre les changements liés à la variation diurne, il existe d'autres sources de perturbations qui peuvent modifier l'ionisation dans la couche D à savoir les éruptions solaires (Todoroki et al., 2007 ; A. Kumar et Kumar, 2014 ; Raulin et al., 2013), les événements lumineux transitoires (TLE) (Boeck et al., 1998 ; Haldoupis et al., 2004 ; Naitamor et al., 2010), les ondes de gravité atmosphérique (AGW) et les ondes acoustiques (Quentin Brissaud, 2016), les précipitations électroniques (Voss et al., 1984; Voss et al., 1998 ; Poussard et Corcuff, 2000 ; Inan et al. 2010).

Chapitre 1 : Relation Soleil-Terre et propagation des ondes électromagnétiques

L'avantage de la couche *D* de l'ionosphère est qu'elle constitue un excellent guide d'ondes pour les signaux de très basse fréquence (TBF ou VLF). Cet avantage a permis aux scientifiques de sonder la haute atmosphère à l'aide du signal VLF. De nombreux travaux ont été réalisés pour étudier le comportement de la couche *D* de l'ionosphère et de la haute atmosphère sous l'effet de différentes sources de perturbations. En effet, le premier type de perturbations qui a été largement étudié concerne l'effet des éruptions solaires sur la couche *D* (Bouderba et al., 2016 ; Kumar & Kumar, 2014).

Ces études ont établi une corrélation entre l'augmentation de la densité électronique et le flux des éruptions solaires. Il a également été montré que l'augmentation de la densité électronique dépend fortement de la position du Soleil par rapport au zénith. D'autre part, les effets des phénomènes atmosphériques comme les TLE (NaitAmor et al. 2010 ; NaitAmor et al., 2016) et les AGW (NaitAmor et al., 2018 ; Kumar et al., 2017 ; Marshal et Snively, 2014) sur la couche *D* de l'ionosphère ont également été étudiés, mais restent encore énigmatiques. Les travaux de ces auteurs ont permis d'établir une corrélation entre les anomalies observées dans le signal VLF et les phénomènes atmosphériques tels que les sprites, les elves et les cyclones, comme le présentent les figures 1.11 et 1.12.

1.1.8.2 *Région E*

Située au-dessus de la couche *D*, elle s'étend de 90 km à 120 km d'altitude et se compose principalement d'oxygène et d'azote. Sa densité électronique de 10^5 cm^{-3} lui permet de réfléchir les ondes radio de 10 MHz jusqu'à une fréquence limite qui dépend de l'angle d'incidence de l'onde sur la couche *E* et de sa densité électronique. Contrairement à la couche *D* de l'ionosphère, la couche *E* existe en permanence et est également affectée par les variations de l'activité solaire. Une autre propriété de la couche *E* est que pendant l'été, des nuages de plasma apparaissent dans les régions de latitude moyenne et durent de quelques minutes à plusieurs heures. C'est ce qu'on appelle une couche *E* sporadique dont la densité électronique est proche de celle de la couche *F*.

1.1.8.3 *Région F*

Elle s'étend de 120 km à 800 km au-dessus de la couche *E*. Elle est très chaude, 1 000 °C et fortement ionisée, 10^6 cm^{-3} , et est peuplée principalement d'oxygène, d'azote et d'hydrogène. Elle assure la propagation des ondes électromagnétiques courtes dont la longueur d'onde est

Chapitre 1 : Relation Soleil-Terre et propagation des ondes électromagnétiques

comprise entre 10 et 100 m. La particularité de la couche F est que pendant la journée, elle se décompose en deux sous-couches F1 et F2. Cette séparation en deux sous-couches peut persister lors du maximum d'activité solaire puisque d'importants rayonnements X et UV ainsi que des particules énergétiques sont émis par le Soleil.

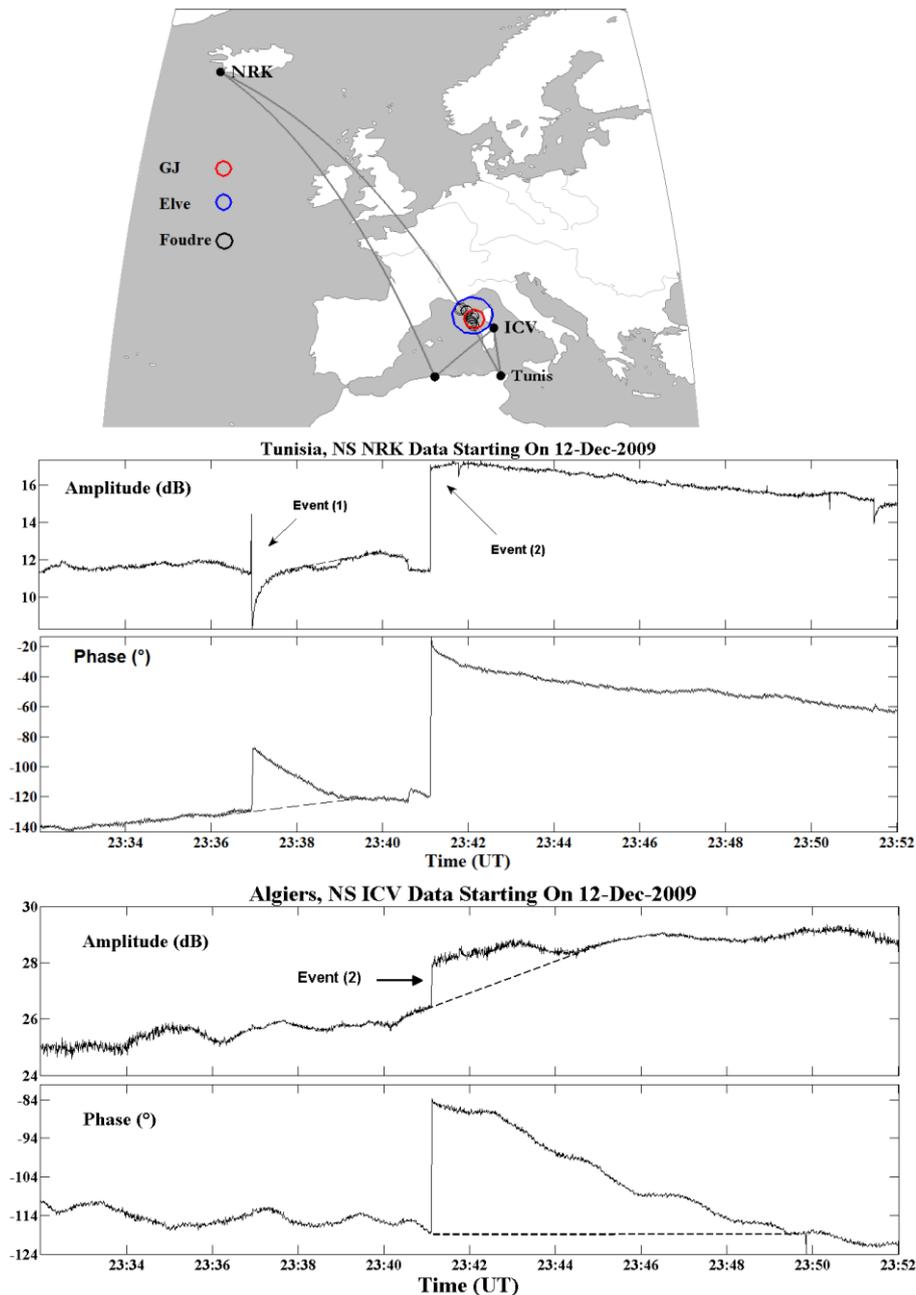


Figure 1.11 : Exemple de perturbations dues à des phénomènes lumineux transitoires que sont : le Jet Gigantesque (GJ) (Event 1) et Elve (Event 2) enregistrés le 12 Décembre 2009. (Crédit image : NaitAmor et al. 2016).

Chapitre 1 : Relation Soleil-Terre et propagation des ondes électromagnétiques

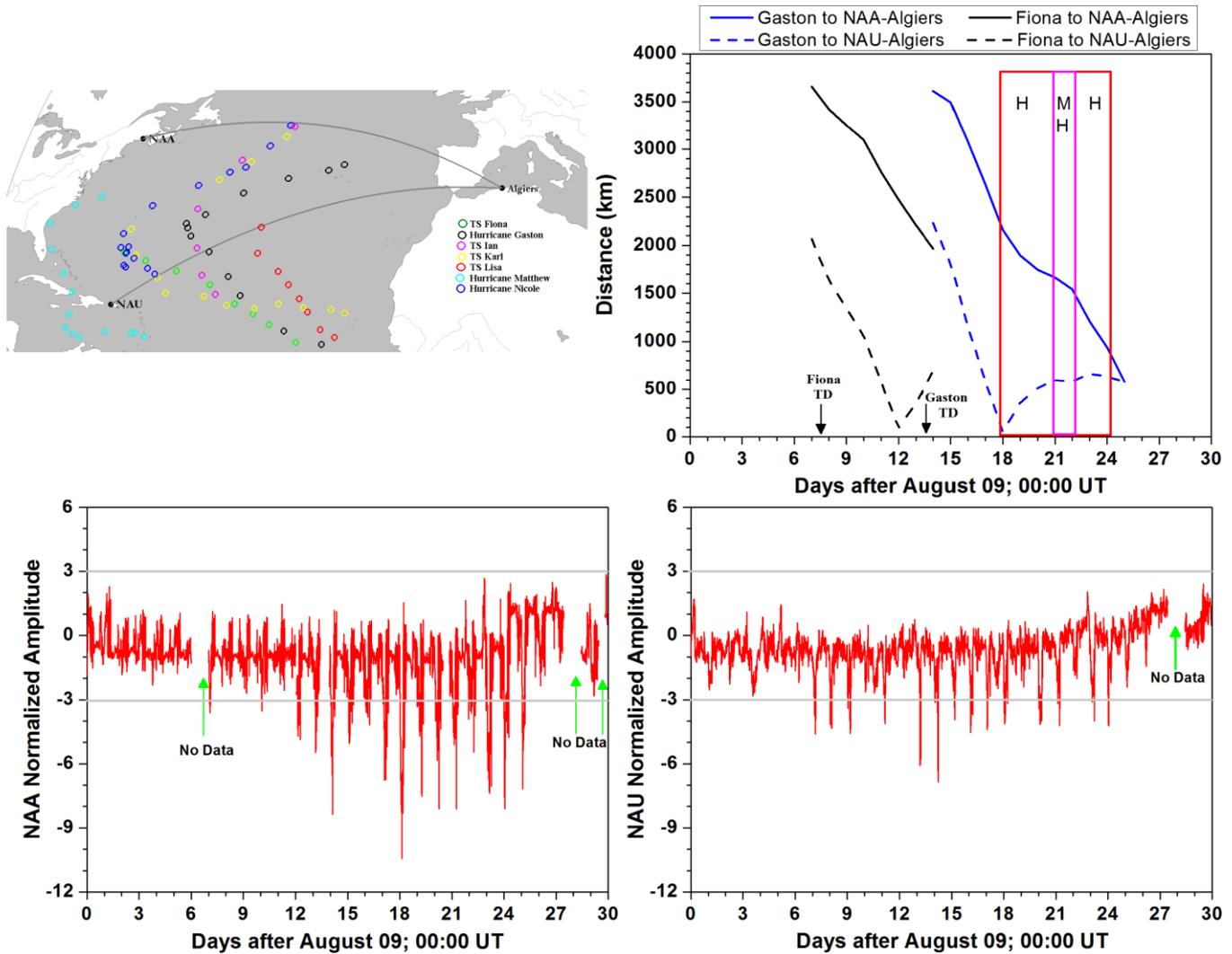


Figure 1.12 : Exemple de perturbations des signaux VLF dues à deux cyclones (Fiona et Gaston) dans l'océan Atlantique. (Crédit image : NaitAmor et al., 2018).

Chapitre 1 : Relation Soleil-Terre et propagation des ondes électromagnétiques

1.2 Les ondes électromagnétiques et leur propagation

1.2.1 Les ondes radios

Les ondes électromagnétiques sont des émissions de photons à différentes longueurs d'onde provenant de sources naturelles ou de laboratoire. En fonction de leur fréquence, les ondes électromagnétiques sont classées en différentes gammes telles que les rayons X, le visible, les UV, les ondes radio, formant ainsi le spectre électromagnétique, Figure 1.13. Selon ce spectre, les ondes radio vont de 3 Hz à 300 GHz. L'utilisation de ce spectre est fondamentale dans de nombreux domaines, tels que les télécommunications, l'aéronautique, le maritime, le militaire et la recherche scientifique. En général, les ondes radio sont classées en grandes ondes, ondes moyennes et petites ondes selon la gamme de fréquences à laquelle l'onde est émise. Leur classification standard est présentée dans le Tableau 1.3.

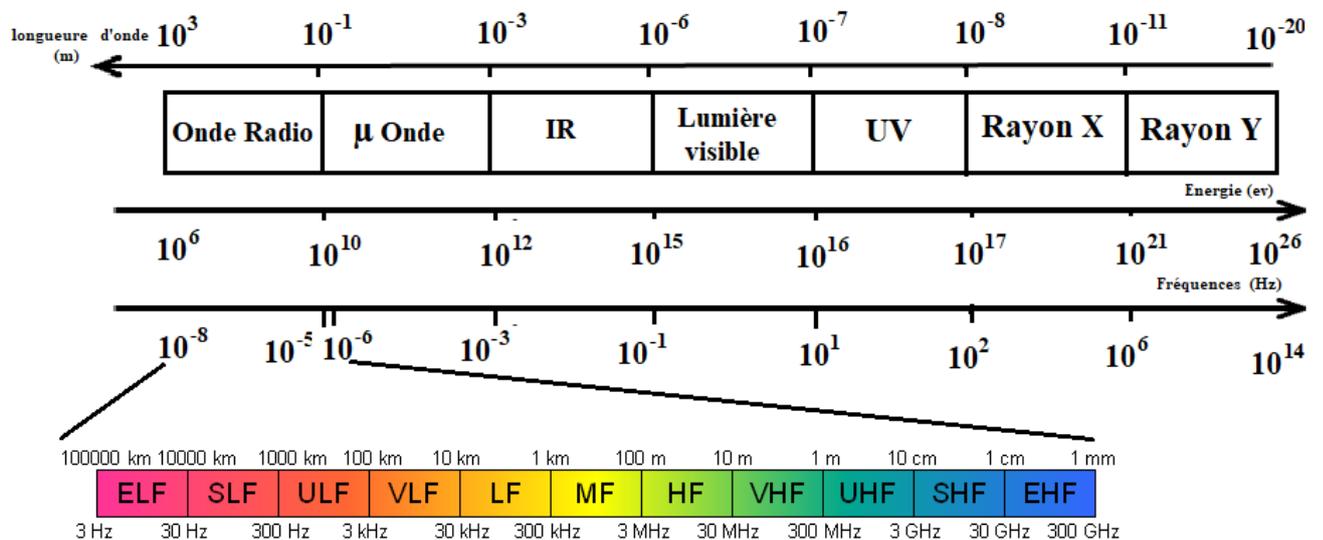


Figure 1.13 : Le spectre électromagnétique et radiofréquence.

Chapitre 1 : Relation Soleil-Terre et propagation des ondes électromagnétiques

Tableau 1.3: Les différentes gammes du spectre des radiofréquences en fonction de la fréquence et de la longueur d'onde.

Bande Radiofréquence	Appellation anglophone	Appellation francophone	Fréquences (Hz)	Longueur d'onde (m)
ELF	<i>Extremly low frequency</i>	EBF	3-30 Hz	10000 Km-100000 Km
SLF	<i>Super low frequency</i>	SBF	30-300 Hz	1000 Km-10000 Km
ULF	<i>Ultra low frequency</i>	UBF	300 Hz -3 KHz	100 Km -1000 Km
VLF	<i>Very low frequency</i>	TBF	3-30 KHz	10-100 Km
LF	<i>Low frequency</i>	BF	30-300 KHz	1 Km -10 Km
MF	<i>Medium frequency</i>	MF	300 KHz-3 MHz	100 m -1 km
HF	<i>High frequency</i>	HF	3-30 MHz	10 m-100 m
VHF	<i>Very high frequency</i>	THF	30-300 MHz	1 m-10 m
UHF	<i>Ultra high frequency</i>	UHF	300 MHz - 3 GHz	10 cm - 1 m
SHF	<i>Super high frequency</i>	SHF	3-30 GHz	1 cm-10 cm
EHF	<i>Extremly high frequency</i>	EHF	30-300 GHz	1 mm -1 cm

Chapitre 1 : Relation Soleil-Terre et propagation des ondes électromagnétiques

1.2.2 Propagation des ondes

Les ondes radio, naturelles ou de télécommunication, se déplacent à la vitesse de la lumière C et leur propagation dépend de la longueur d'onde (ou fréquence). Plus la longueur d'onde est petite, plus la distance de propagation est grande. Un autre facteur important qui peut affecter le mouvement des ondes est le milieu de propagation (sol, mer, ionosphère ... etc.). En effet, selon les théories de la propagation des ondes électromagnétiques, le milieu est caractérisé par sa perméabilité magnétique μ , sa permittivité électrique ϵ et sa conductivité σ qui changent d'un endroit à l'autre. En fonction des ordres de grandeur de ces paramètres, les ondes électromagnétiques peuvent être absorbées, réfléchies, réfractées, diffusées ou s'échapper dans l'espace. La relation de dispersion des ondes électromagnétiques dans un milieu froid, faiblement ionisé et magnétisé se résume par l'équation d'Apleton-Hartree donnée par

$$n = 1 - \frac{X}{1 - iZ - \frac{1}{2}Y^2 \sin^2 \theta \pm \frac{1}{1 - X - iZ} \left(\frac{1}{4}Y^4 \sin^4 \theta + Y^2 \cos^2 \theta (1 - X - iZ)^2 \right)^{1/2}}$$

n : indice de réfraction complexe, $i = \sqrt{-1}$: unité imaginaire, $X = \frac{\omega_0^2}{\omega^2}$, $Y = \frac{\omega_H}{\omega}$, $Z = \frac{\nu}{\omega}$,
 ν : fréquence de collision d'électrons, $\omega = 2\pi f$: fréquence angulaire, f : fréquence ordinaire (cycles par seconde ou Hertz). $\omega_0 = 2\pi f_0 = \sqrt{\frac{Ne^2}{\epsilon_0 m}}$: électron fréquence plasma. $\omega_H = 2\pi f_H = \frac{B_0 |e|}{m}$:
électron fréquence gyroscopique. ϵ_0 : permittivité de l'espace libre. B_0 : ambient champ magnétique force. e : charge électronique. m : masse électronique. θ : angle entre l'ambiance champ magnétique vecteur et le vecteur d'onde.

La Terre et l'ionosphère forment un guide d'ondes parfait, la Terre étant sa paroi inférieure et l'ionosphère sa paroi supérieure. Si la conductivité électrique de la Terre est élevée, elle peut être considérée comme un miroir optique totalement réfléchissant. Pour l'ionosphère, la propagation des ondes dépend de la densité électronique des couches ionosphériques qui change avec le temps, l'altitude et le lieu géographique. Effectivement, l'ionisation des espèces présentes dans l'atmosphère étant principalement due au rayonnement solaire où le taux de production de paires électron-ion change entre le jour et la nuit, en fonction des saisons et du cycle d'activité solaire. Ces changements affectent la propagation des ondes électromagnétiques, qui est plus efficace la nuit et pendant le minimum d'activité solaire.

Chapitre 1 : Relation Soleil-Terre et propagation des ondes électromagnétiques

Une fois transmise, l'onde radio se propage dans le guide d'ondes selon plusieurs modes : Le mode direct (en ligne de visée), l'onde de sol et enfin l'onde de ciel (ou onde ionosphérique) (Figure 1.14).

1. Propagation directe (ligne de visée) LOS : son trajet suit une ligne droite entre l'émetteur et le récepteur sur une très courte distance. Ce type de propagation concerne principalement les ondes dans les gammes de fréquences VHF, UHF et SHF.
2. L'onde de sol (*Ground Wave*) : Toute onde se propageant près de la surface de la Terre est appelée onde de sol, et se divise en deux types : la propagation directe et la propagation indirecte :
 - Propagation directe : la propagation directe de l'onde entre deux antennes suit la sphéricité de la terre, elle est donc stable sur une distance au maximum de 500 km, elle est dominante pour les fréquences VLF, LF et HF.
 - La propagation indirecte : quand l'onde électromagnétique est rebondie par le sol, elle est dite onde réfléchie, elle se répond pour les fréquences VHF et UHF.
3. Onde de ciel (*Sky Wave*) : ce type d'onde se propage par réflexion entre la Terre et l'ionosphère. En fonction de la distance de propagation, cette onde peut subir une ou plusieurs réflexions pour atteindre le récepteur. La réflexion de l'onde par l'ionosphère ne peut avoir lieu que si la fréquence du plasma du milieu est supérieure ou égale à la fréquence de l'onde radio. Dans le contraire, l'onde pénètre dans l'ionosphère et subit une atténuation de puissance due à l'interaction entre cette onde et les électrons.

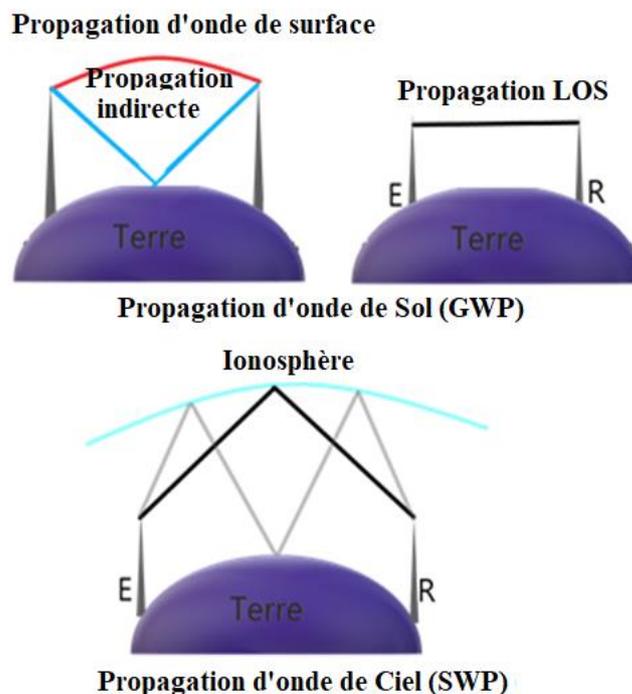


Figure 1.14 : Les modes de propagation des ondes radios.

Chapitre 1 : Relation Soleil-Terre et propagation des ondes électromagnétiques

1.2.3 Les ondes VLF

Ce sont des ondes dont la fréquence est comprise entre 3 kHz et 30 kHz (longueur d'onde de 10 à 100 km). Leur particularité est de se propager avec une grande efficacité et une faible atténuation à des distances très éloignées (plusieurs Mm) entre l'émetteur et le récepteur. Cette particularité a permis aux scientifiques d'étudier le milieu à partir duquel elles se propagent afin de mieux comprendre le comportement de la couche inférieure de l'ionosphère et de la moyenne atmosphère (la mésosphère). En effet, durant le jour les ondes VLF sont réfléchies par la limite supérieure de la couche D (à environ 74 km) et que durant la nuit la réflexion est assurée par la limite inférieure de la couche E (à environ 87 km) comme le présente la Figure 1.15. Ces altitudes (entre 70 km et 100 km) ne sont accessibles qu'au moyen des ondes VLF et sont le siège de plusieurs phénomènes perturbateurs, tant de jour que de nuit. Cependant, des modèles théoriques ont été proposés pour décrire la propagation des ondes VLF dans l'ionosphère, à savoir la théorie des rayons (Born et Wolf, 1965) et la théorie des modes (Poulsen, 1991 ; Barr et al., 2000). Cette dernière décrit bien la propagation de l'onde VLF et tient compte de la courbure de la Terre. Par contre, la théorie des rayons est limitée pour des distances inférieures à 1000 km et suppose que le guide d'onde est constitué de deux plans parallèles, la Terre et l'ionosphère.

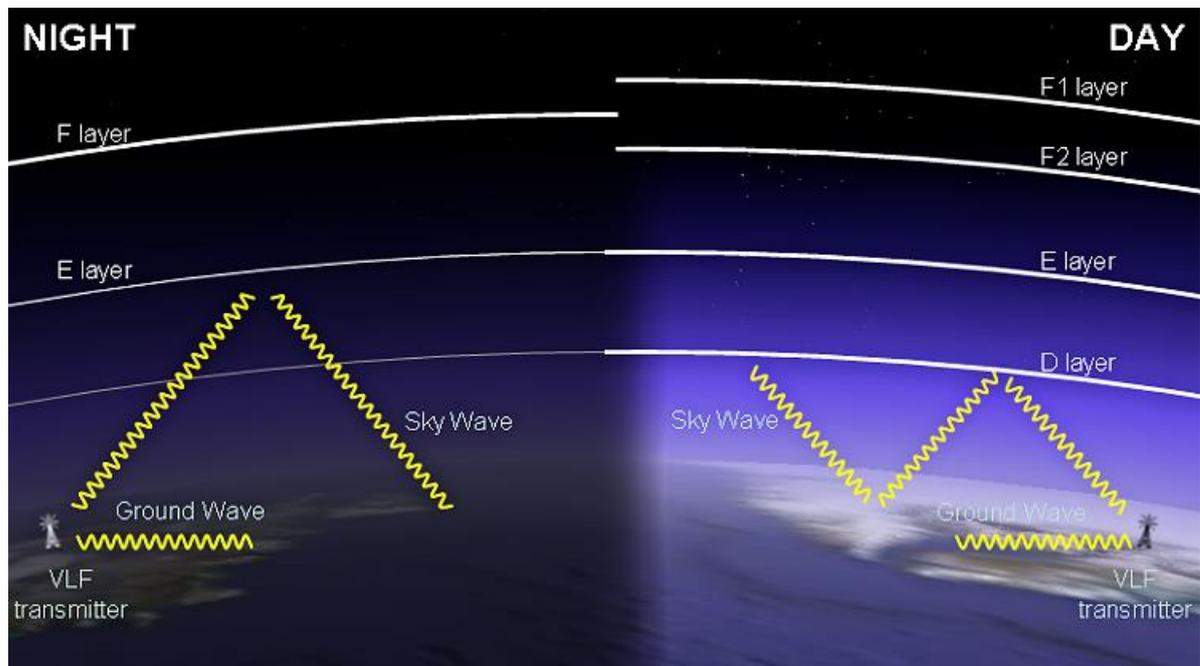


Figure 1.15 : La propagation des signaux VLF de jour et de nuit. (Crédit image : <https://sidstation.loudet.org/ionosphere-fr.xhtml>).

Chapitre 2 : Instrumentation

2 Instrumentations

2.1 Le récepteur VLF

L'instrument de mesure que nous avons utilisé dans le cadre de ce travail est le récepteur VLF (3 kHz à 50 kHz) appartenant au Centre de Recherche en Astronomie Astrophysique et Géophysique (CRAAG) et installé à la station régionale de Boumerdes. L'instrument fait partie du réseau AWESOME de récepteurs VLF (Deborah et al., 2008 ; Cohen et al., 2010) installés dans différentes régions (Figure 2.2). L'instrument a été installé en août 2006 et est opérationnel jusqu'à nos jours. Il se compose de :

- **Antenne VLF** : antenne en forme de deux triangles isocèles orientés dans les deux directions Nord-Sud (N-S) et Est-Ouest (E-w).
- **Une antenne GPS (*Geo-Positioning Satellite*)** : permet un horodatage électronique très précis à environ 10 ns en temps universel (UT).
- **Un préamplificateur** : monté près de l'antenne, il amplifie le signal qui est ensuite envoyé au récepteur.
- **Une ligne de récepteur** : effectue un traitement de filtrage supplémentaire du signal reçu, le synchronise avec le signal GPS pour la datation, puis l'envoie à la carte d'acquisition pour être stocké en bande étroite ou en bande large.
- **Carte d'acquisition de données et PC** : un ordinateur équipé d'une carte d'acquisition de données National Instrument permet le stockage des données.

Ces différents composants sont présentés dans la Figure 2.1.



Un préamplificateur



Ligne du Récepteur



Antenne TBF



Antenne GPS



Ordinateur

Figure 2.1 : Composition du récepteur VLF installé à Boumerdes (Algérie).

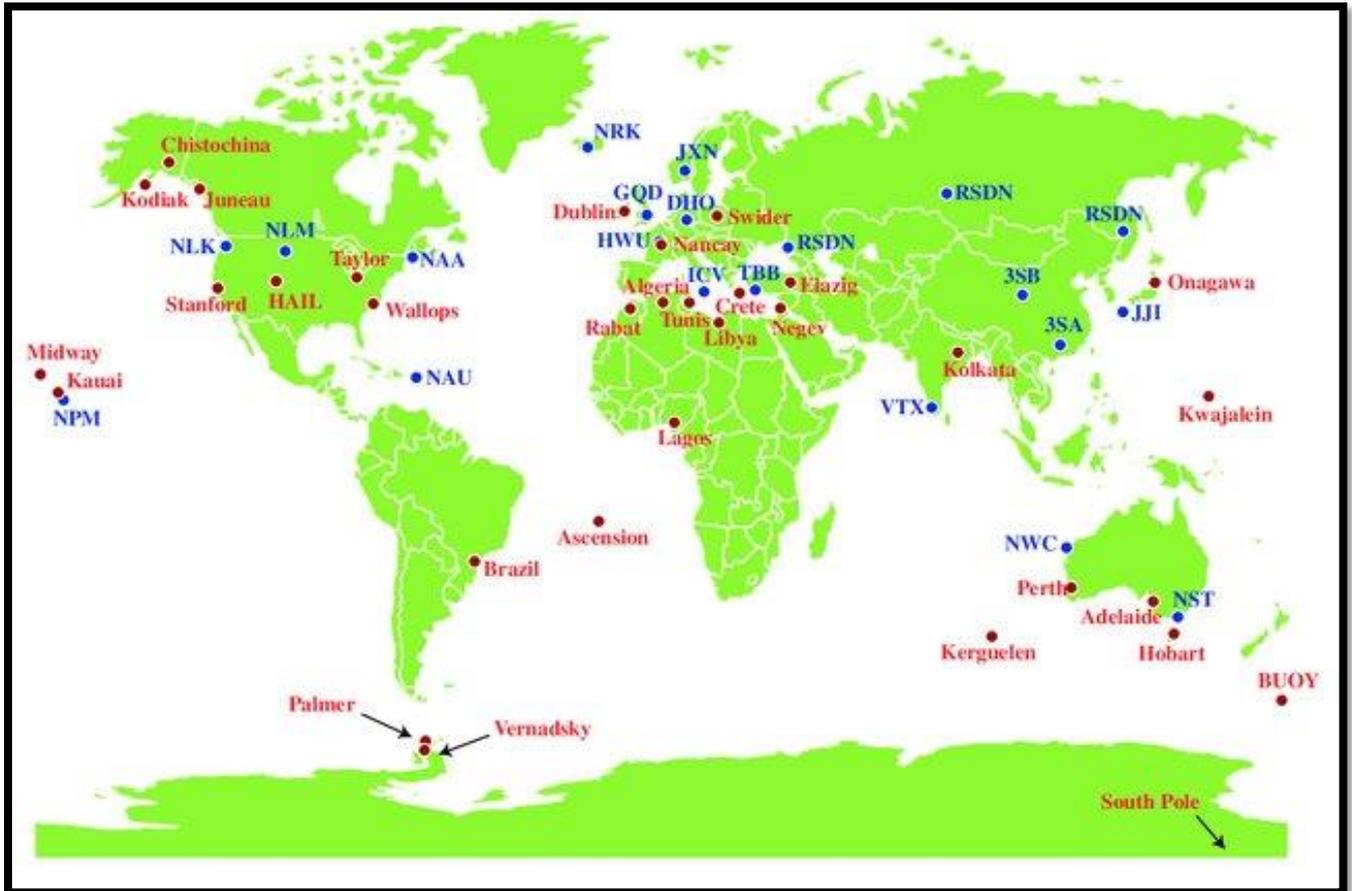


Figure 2.2 : Carte géographique des émetteurs (en bleu) et des récepteurs (rouge) VLF.
(Crédit image : Robert Andrew Marshall, 2009).

2.2 Visualisation des données

Afin de visualiser et traiter le signal VLF, un programme Matlab a été développé par le groupe du réseau AWESOME de l'université de Stanford, illustré dans la Figure 2.3. Ce programme permet de visualiser les données en larges bandes et en bandes étroites après avoir effectué les étapes nécessaires. La Figure 2.3 présente un exemple de l'amplitude du signal VLF de l'émetteur GQD enregistré le 30 octobre 2016 en haute résolution (50 Hz). À partir du tracé, nous distinguons clairement les périodes diurnes et nocturnes qui correspondent à la propagation dans le jour et dans la nuit du signal VLF. Il est clairement observable que pendant la nuit, l'amplitude du signal est très élevée par rapport au jour. Ceci est dû à l'atténuation du signal lorsqu'il pénètre dans la couche D de l'ionosphère où la densité des électrons est faible pour réfléchir l'onde VLF.

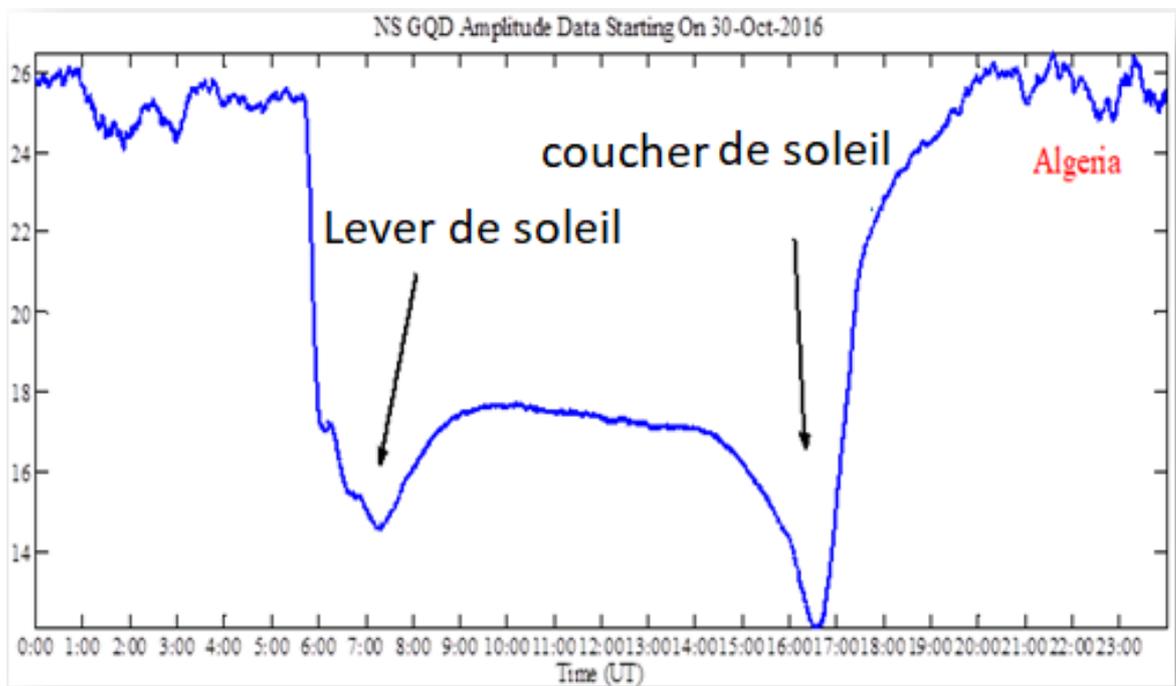
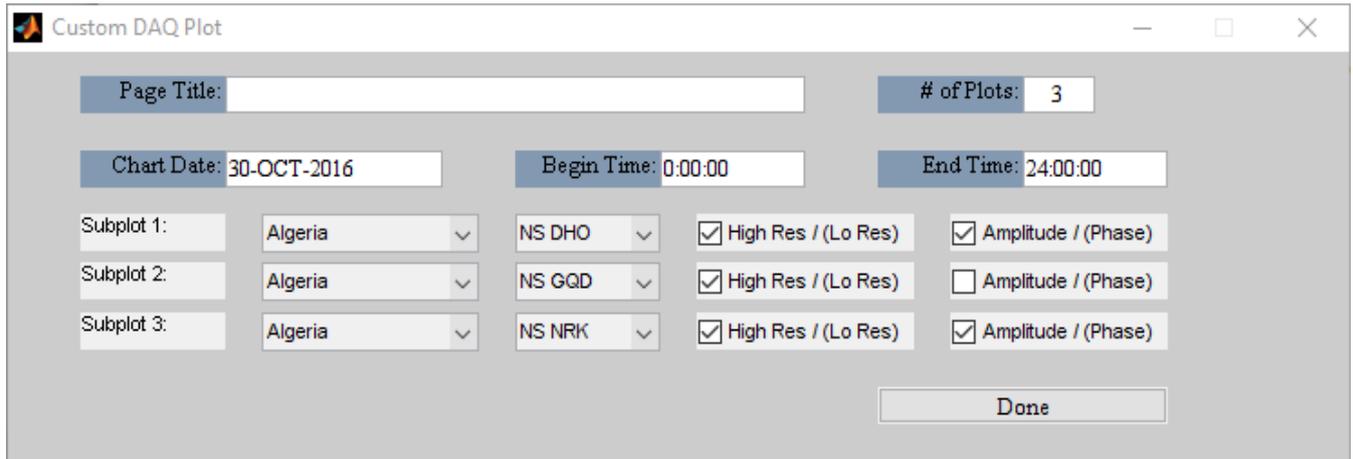


Figure 2.3 : Interface de l'application DAQViewer pour la visualisation du signal VLF (en haut), enregistrement en bande étroite du signal VLF (en bas).

L'autre type de visualisation des données est celui des larges bandes présentées dans la Figure 2.4. Les enregistrements dans la Figure 2.4 présentent des traits verticaux et des traits horizontaux. Pour les traits horizontaux, ils sont fixés à des fréquences spécifiques qui correspondent aux fréquences de quelques émetteurs VLF donnés dans le Tableau 2.1 et dont les signaux peuvent atteindre la région du récepteur. En revanche, pour les traits verticaux, ils englobent tout le spectre de fréquences VLF (de 3 kHz à 50 kHz) et représentent les émissions de la foudre pendant une activité orageuse proche ou éloignée du récepteur.

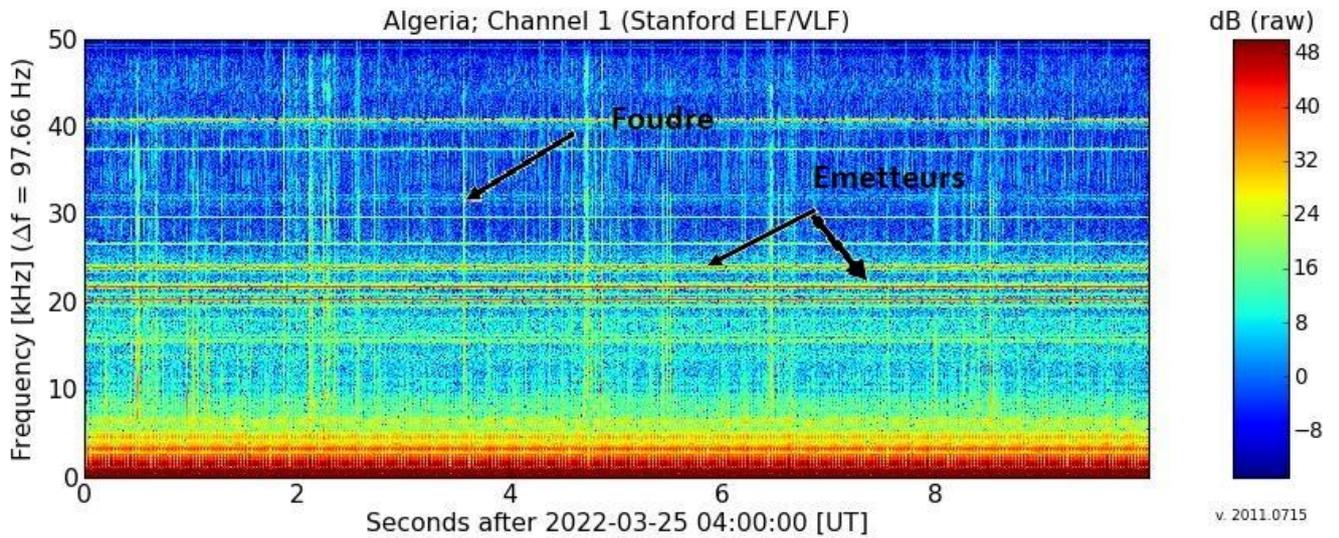


Figure 2.4 : Enregistrement à large bande du signal VLF.

Tableau 2.1: Liste des émetteurs VLF.

Émetteurs	Fréquence (Hz)	Longitude	Latitude	Location
GQD	19600	-3.280	52.911	Anthorn, Great Britain (NATO)
ICV	20270	9.731	40.93	Isola di Tavolara, Italy (NATO)
GQD	22100	-3.280	52.911	Anthorn, Great Britain (NATO)
DHO	23400	7.614	53.079	Rhauderfehn, Germany (NATO)
NAA	24000	-67.281	44.646	Cutler, Maine, USA
NRK	37500	-22.459	63.851	Grindavik, Iceland (USA)
NAU	40750	-67.178	18.399	Aguada, Puerto Rico (USA)
NSC	45900	13.500	38.000	Sicily, Italy (USA)

2.3 Sélection des émetteurs

Dans notre étude, nous avons sélectionné trois émetteurs VLF, dont l'un se trouve à une latitude élevée (NRK) et les deux autres (DHO et GQD) en moyennes latitudes, Figure 2.4. L'importance de ce choix est qu'il nous permet d'étudier l'effet des perturbations géomagnétiques à différentes latitudes. D'autre part, il nous permet de voir l'étendue spatiale (en longitude) de la perturbation puisque les émetteurs DHO et GQD se trouvent aux mêmes latitudes et forment un triangle isocèle avec le récepteur Boumerdes.

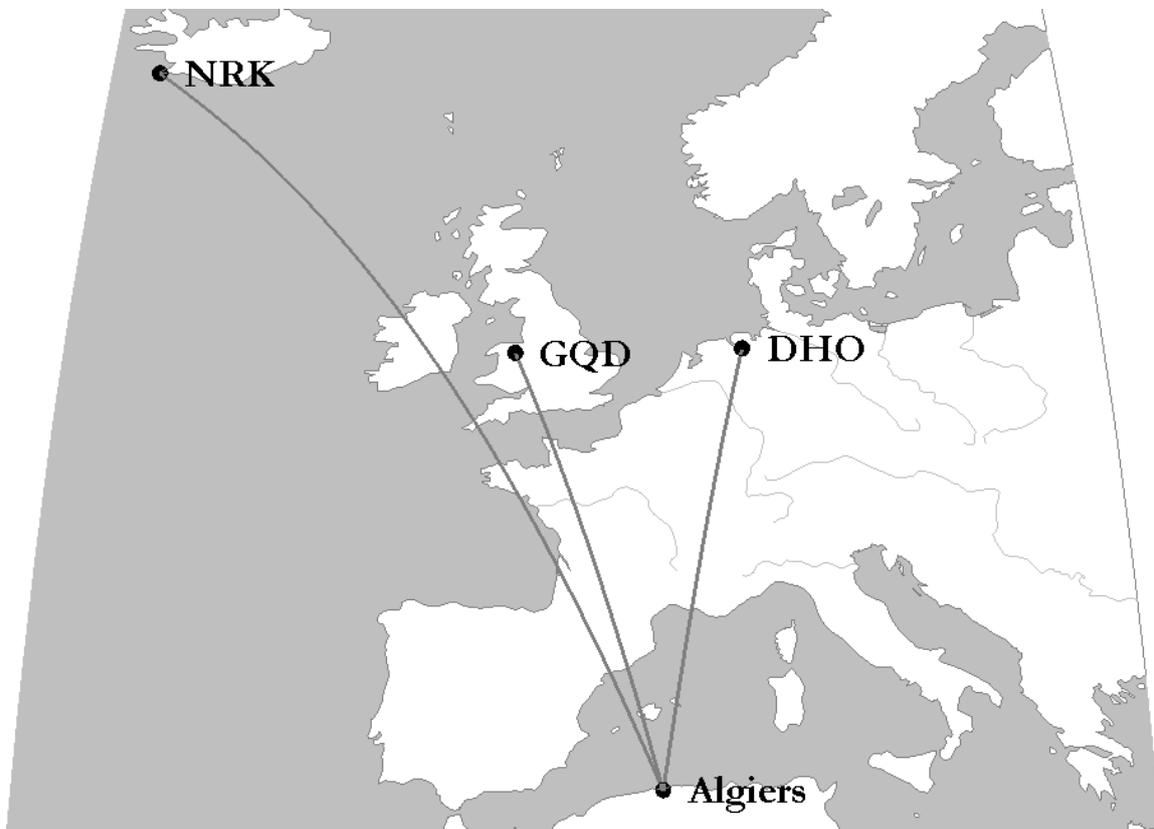


Figure 2.5 : Trajets émetteur-récepteur (Alger) du signal VLF.

2.4 Satellite RBSP

Les sondes de Van Allen (initialement *Radiation Belt Storm Probes* ou *RBSP*) sont deux sondes identiques d'une mission spatiale de la NASA lancée le 30 août 2012. L'objectif de ses missions est d'analyser l'influence du Soleil, à travers son activité, sur la Terre et l'environnement spatial proche de la Terre. Plus précisément, le programme se concentre sur l'impact de l'activité solaire sur l'espace proche de la Terre et sur diverses missions d'exploration spatiale. La mission comprend deux satellites transportant les mêmes instruments pour collecter des données sur le comportement des électrons relativistes et des ions pendant l'évolution de l'activité solaire. La mission s'est terminée le 18 octobre 2019.

Les deux satellites sont placés sur une orbite elliptique avec un périhélie de 600 km et un aphélie de 30 600 km et une inclinaison de 10°. Cette orbite leur permet de traverser les ceintures de radiation qui entourent la Terre et de faire des observations in situ. Au début, la mission avait une durée de deux ans car l'électronique des instruments est soumise à un très fort flux de radiations lors de la traversée des ceintures de Van Allen qui a pour effet d'endommager les instruments et de brouiller les mesures. Finalement, les satellites ont survécu 7 ans et c'est l'épuisement des ergols utilisés pour contrôler leur trajectoire et leur orientation qui a mis fin à la mission. Les instruments à bord des deux satellites (E. Y. Adams et al., 2016) sont :

- **ECT** (*Energetic Particle, Composition and Thermal Plasma Suite*) : c'est une suite de trois instruments qui mesurent les caractéristiques des ions et des électrons (MagEIS, HOPE et REPT).
- **EMFISIS** (*Electric and Magnetic Field Instrument Suite and Integrated Science*) : il s'agit de deux types de magnétomètres qui mesurent le champ magnétique et les ondes du plasma d'électrons et d'ions.
- **EFW** (*Electric Field and Waves Suite*) : mesure les champs électriques qui transmettent leurs énergies aux particules des ceintures de radiation et modifient la structure de la magnétosphère interne.
- **RBSPICE** (*Radiation Belt Storm Probes Ion Composition Experiment*) : mesure les courants annulaires générés par les tempêtes magnétiques.

Chapitre 2 : Instrumentations

- **RPS** (*Relativistic Proton Spectrometer*) : Mesure les flux de protons à haute énergie (50 Mev-2 Gev).

La Figure 2.5 présente ces instruments. Les deux satellites transmettent des données à trois stations au sol ; la station principale étant l'antenne parabolique de 18 m de diamètre de Johns Hopkins située à l'APL (*Applied Physics Laboratory*) à Laurel dans le Maryland. Deux autres antennes paraboliques de 13 m de diamètre de la Space Network University sont basées en Australie et Hawaï. https://destinationorbite.net/documentations/ft_02_08_2012.pdf.

Pour une étude comparative entre les observations au sol et dans la ceinture de radiation, nous avons utilisé les données de l'instrument REPT (*Relativiste Electron Proton Telescope*) (Baker et al., 2021) intégré dans la suite ECT qui mesure les électrons avec des énergies entre 4-10 Mev et les protons entre 20-75 Mev.

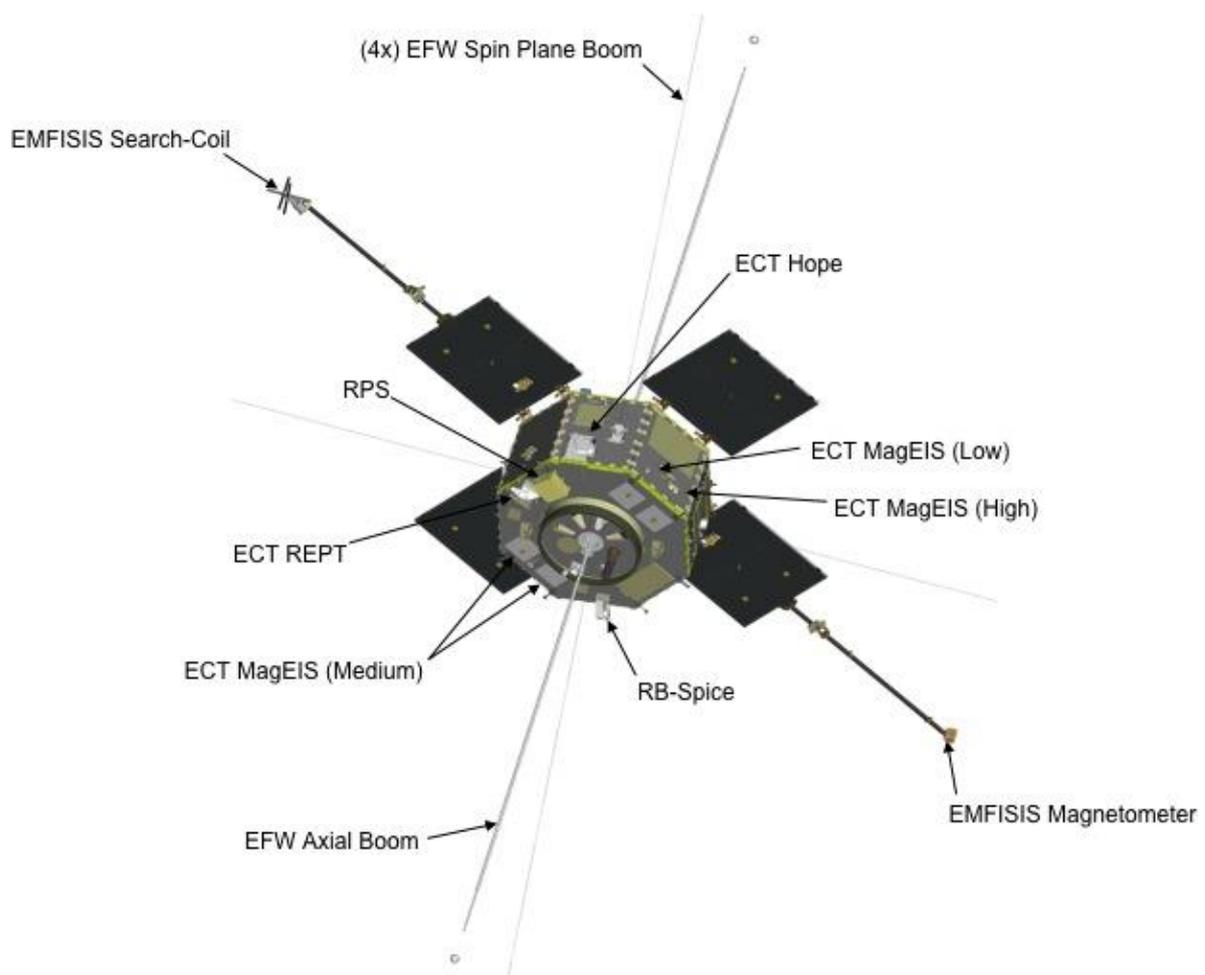


Figure 2.6 : Les instruments du RBSP. (Crédit image : <https://spaceflight101.com/rbsp/rbsp-science-instruments/>).

Chapitre 3 :

Traitement des données et simulation

3 Traitement des données et simulation

3.1 Sélection de l'événement

Le but de ce travail est d'étudier les effets des perturbations géomagnétiques sur la basse couche de l'ionosphère, la région D , causées par les CME. Pour mener à bien ce travail, nous avons d'abord sélectionné des événements géomagnétiques très intenses caractérisés par de fortes chutes de l'indice Dst ($Dst < -100$ nT). La détermination de ces événements se fait à partir de la base de données des différentes missions satellitaires et stations au sol appelée *Cordinated Data Analysis Web* (CDAWEB : <https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/index.html/>). Dans la Figure 3.1, nous présentons le site CDAWEB où le choix des missions satellitaires et/ou du type de base de données à utiliser est effectué. Après avoir choisi la base de données, l'utilisateur saisit ensuite les dates, les heures de début et de fin de la période considérée et le type de fichier de sortie (graphique de résultats ou fichier data).

Dans notre cas, nous nous intéressons à la base de données OMNI qui regroupe les données sur le plasma dans le milieu interplanétaire (densité, température, champ magnétique, vitesse), les conditions dans la magnétosphère (externe et interne), les différents indices géomagnétiques (K_p , A_p , AE , Dst) et le champ magnétique au sol. Il est également possible de préciser l'échantillonnage des enregistrements en fonction du besoin et de la nature des études à réaliser. En effet, si le but est d'observer des phénomènes de courte durée ou de très faible périodicité, le choix idéal est les données hautes résolutions (fraction de seconde). Dans le cas contraire, le site OMNI propose des enregistrements des données de basses résolutions.

Dans les figures 3.2, 3.3 et 3.4, nous montrons des exemples d'évènements que nous avons analysés à savoir : L'événement le plus important du cycle 24 enregistré en Mars 2015, l'événement de Juin 2015 et enfin l'événement de Décembre 2015. Dans ces figures, nous avons tracé les valeurs de la composante B_z du champ magnétique interplanétaire, la vitesse du vent solaire incluant la CME, la pression dans le vent solaire, l'indice géomagnétique Dst et l'indice d'électrojet auroral AE. D'après ces figures, les conditions dans le milieu interplanétaire, telles qu'indiquées par l'intensité de B_z , la vitesse et la pression, sont faibles avant l'arrivée de chaque CME et présentent ensuite des changements brusques et aléatoires qui peuvent durer plusieurs jours.

The figure shows two screenshots of the CDAWeb Data Explorer interface. The top screenshot displays the configuration options for data retrieval and plotting. The bottom screenshot shows the resulting data visualization for the OMNI H0 MRG1HR instrument.

Configuration Options:

- Select start and stop times from which to GET or PLOT data:**
 - Start time (YYYY/MM/DD HH:MM:SS.mmm): 2015/03/01 13:00:00.000
 - Stop time (YYYY/MM/DD HH:MM:SS.mmm): 2021/03/31 13:00:00.000
- Compute uniformly spaced binned data for scalar/vector/spectrogram data (not available with noise filtering) **NEW**
- Use spike removal to filter data without binning (not available with noise filtering)(Warning: Experimental !!).
- Select an activity:**
 - Plot Data : select one or more variables from list below and press submit.
 - Also create PS and PDF best quality outputs (all plot types except images and plasmagrams). Many panels per dataset are allowed but <=4 panels optimal for standard Y-axis height and single page display.
 - Use coarse noise filtering to remove values outside 3 deviations from mean of all values in the plotted time interval.
 - Increase the Y-axis height for time-series and spectrogram plots. **NEW**
 - Combine all time-series and spectrogram plots, for all requested datasets, into one plot file.
 - Plot overlay options. **NEW**
 - List Data (ASCII/CSV): select one or more variables from list below and press submit. (Works best for < 31 days)
 - Download original files : press submit button to retrieve list of files. (Max. 200 days - use [HTTPS site](https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/) for larger requests)
 - Create V3.8 CDFs for download or Autoplot demonstration: select one or more variables from the list below and press submit.
 - Create audio files based on data from selected variables. **NEW**

Note: [CDF patch](#) required for reading Version 3.8 CDFs in IDL or MATLAB.
Get [CDFX](#) - IDL GUI plotting/listing toolkit software. To be used with either the daily or "created" CDF files available above.

NEW Pressing the "Submit" button will spawn a new window/tab in order to support the new "Previous" and "Next" functions.

Visualization:

OMNI (1AU IP Data) IMF, Plasma, Indices, Energetic Proton Flux: HD>Definitive Hourly

1-h Est
1-h AE

TIME RANGE=2015/3/1 (60) to 2015/3/31 (90)

Please acknowledge data provider, J.H. King, N. Papitashvili at ADNET, NASA GSFC and CDAWeb when using these data.
Generated by CDAWeb on Wed Jun 16 09:00:53 2021

Figure 3.1 : Visualisation des différentes étapes pour exploiter les données des différents instruments via le site CDAWEB.

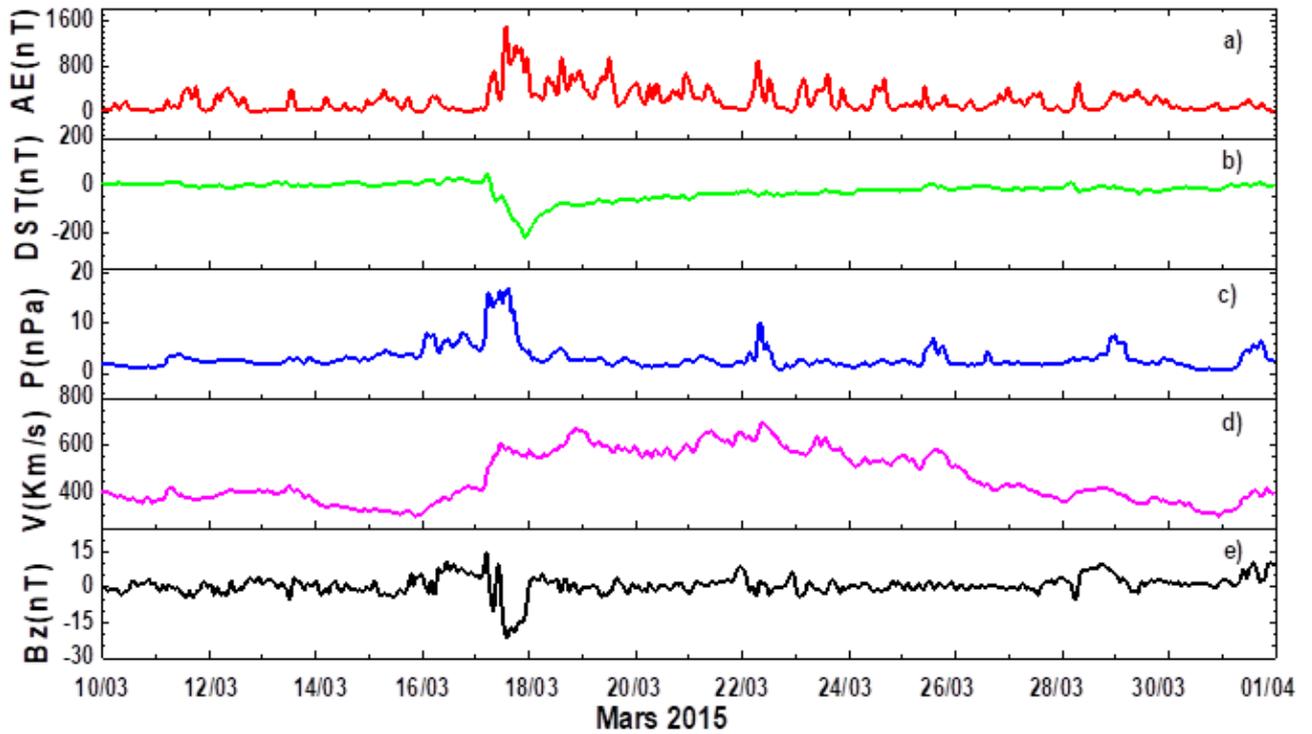


Figure 3.2 : Conditions du vent solaire avant, pendant et après la tempête géomagnétique de Mars : a) indice AE, b) indice Dst, c) pression, d) vitesse et e) champ magnétique B_z .

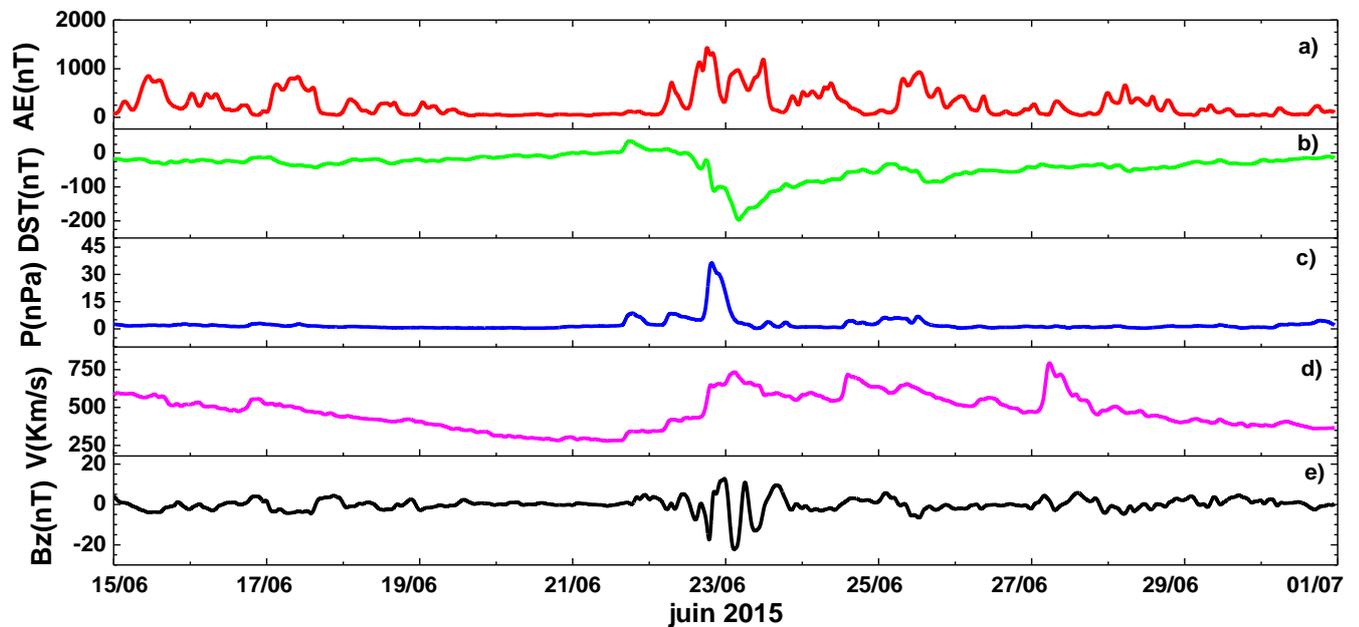


Figure 3.3 : Mêmes paramètres de vent solaire que dans la Figure 3.2 pour Juin.

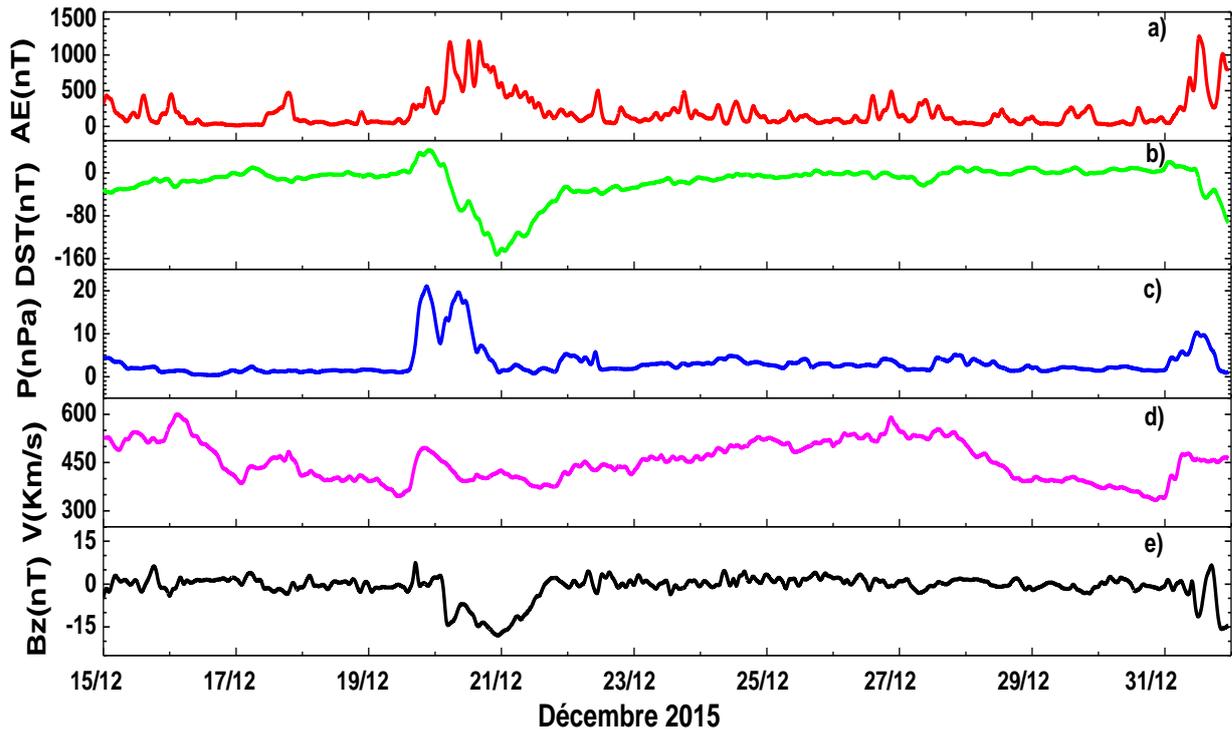


Figure 3.4 : Mêmes paramètres de vent solaire que dans la Figure 3.2 pour Décembre.

3.2 Traitement du signal VLF des événements de Mars, Juin et Décembre

Cette section décrit la méthode que nous avons utilisée pour révéler les effets des perturbations géomagnétiques sur la couche *D* de l'ionosphère et la propagation des ondes VLF. Comme nous avons étudié deux types différents de précipitations d'électrons à savoir : les courants alignés aux lignes du champ magnétique (*Field Aligned Current*, FAC) et les précipitations des électrons induites par l'onde électromagnétique sifflante émise par la foudre (*Lightning induced Electron Precipitations*, LEP), le traitement est donc différent. Les caractéristiques des émetteurs considérés dans cette étude et leurs coordonnées géographiques sont données dans le Tableau 3.1. Il convient également de noter que nous avons utilisé des données à haute résolution (fréquence d'échantillonnage de 50 Hz) pour étudier les deux types de perturbations.

Tableau 3.1: Liste des trois émetteurs VLF.

Nom	Localisation	Longitude	Latitude	Fréquence (KHz)
NRK	Islande	22.46°W	63.85°N	37.50
GQD	Angleterre	3.28°W	52.91°N	19.6
DHO	Allemagne	7.61°E	53.07°N	23

3.2.1 Évènements FAC

Après avoir sélectionné les évènements qui ont provoqué de fortes perturbations géomagnétiques, nous avons ensuite recherché les jours que nous pouvons considérer comme calmes ou dont l'indice Dst était supérieur à -50 nT. Cette étape nous permettra de calculer l'amplitude moyenne ambiante (ou normale) du signal VLF et sa déviation standard (SD) qui sera utilisé comme référence pour le signal non perturbé. Le nombre de jour calmes à considérer dépend de la disponibilité des enregistrements et ne doit pas être moins de 10 jours au total. Il convient de noter que ce type de perturbation peut se produire aussi bien le jour que la nuit, d'où la nécessité de supprimer les perturbations du signal VLF qui sont dues à des évènements bien connus tels que les éruptions solaires. En effet, dans la figure 3.5 nous avons présenté une éruption solaire de classe M3.8 enregistrée par le satellite GOES le 21/06/2015 et la CME associée observée aussi par LASCO C2. La Figure 3.6 présente les amplitudes des émetteurs VLF NRK, GQD et DHO durant la même période que l'éruption M3.8. Il est observé que les perturbations du signal VLF dues aux éruptions solaires peuvent produire une augmentation de l'amplitude du signal ou une diminution. Ce phénomène est uniquement dû à la structure modale du signal VLF enregistré. Dans la section résultats et discussion, nous clarifions mieux ce comportement et son influence sur l'amplitude et la phase du signal enregistré.

Outre les perturbations dues aux éruptions solaires, les émissions de la foudre sont également captées par le récepteur, car elles émettent leur puissance beaucoup plus dans la gamme VLF et apparaissent sous la forme d'un pic très important d'une durée de 20 ms. Cependant, ces perturbations sont également éliminées, que ce soit de jour ou de nuit (Figure 3.7).

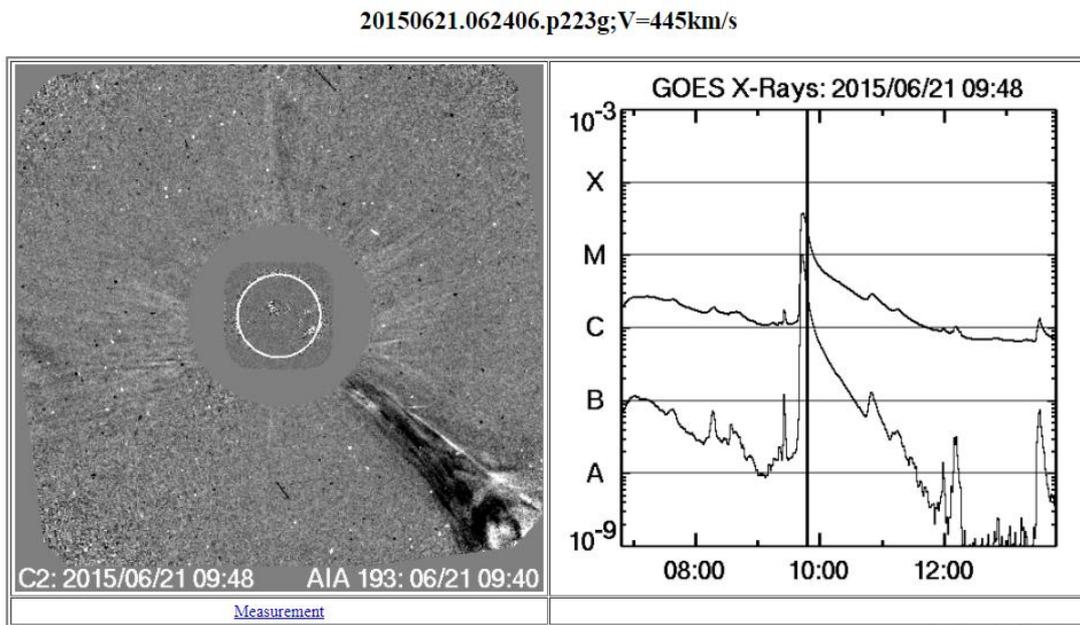


Figure 3.5 : À gauche : Une éjection de masse coronale observée le 21 Juin 2015 par le coronographe LASCO. À droite : Flux de rayons X enregistré par le satellite GEOS émis pendant l'éruption de classe M3.8 associée d'un CME. (Source : https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_1).

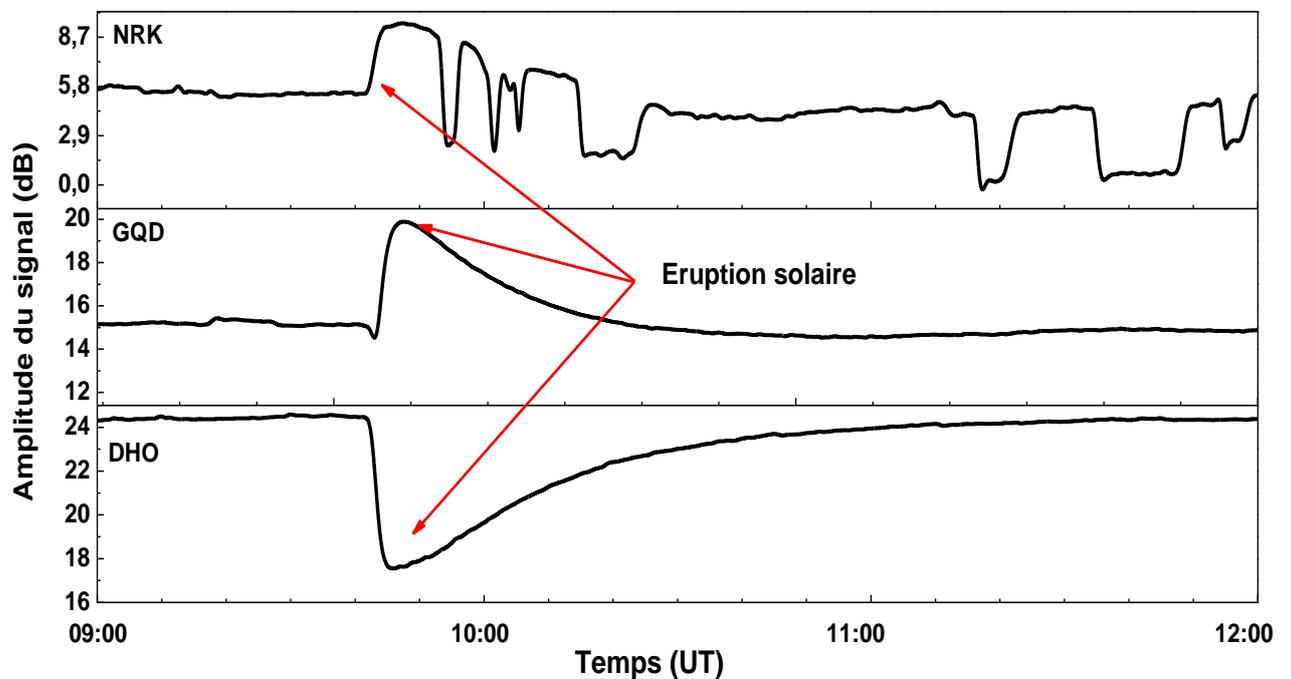


Figure 3.6 : L'allure de l'amplitude du signal des trois émetteurs VLF pendant une éruption solaire de classe M3.8 enregistrée le 21 Juin 2015.

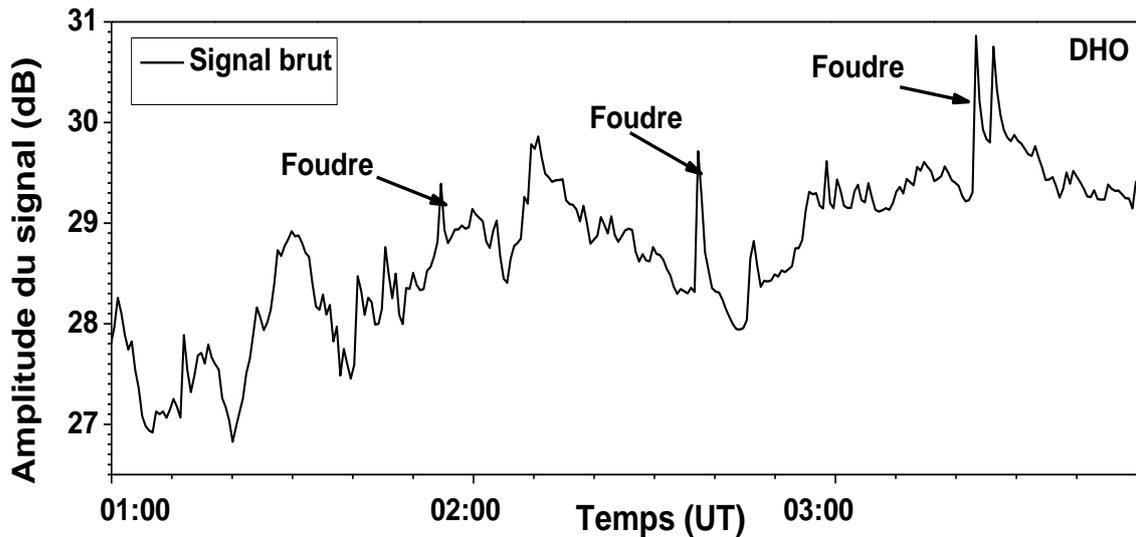


Figure 3.7 : L'allure de l'amplitude du signal VLF pendant l'activité orageuse enregistrée le 24 Mars 2015 dans l'émetteur DHO.

Après avoir supprimé les traces d'éruptions solaires et d'éclairs du signal VLF, nous nous sommes ensuite interpolé le signal par une fonction linéaire pour compléter les données. Un exemple du signal interpolé est présenté à la Figure 3.8 (signal sans éruption). Il convient de mentionner que ces procédures sont effectuées sur les signaux de tous les émetteurs pendant les périodes calmes et actives.

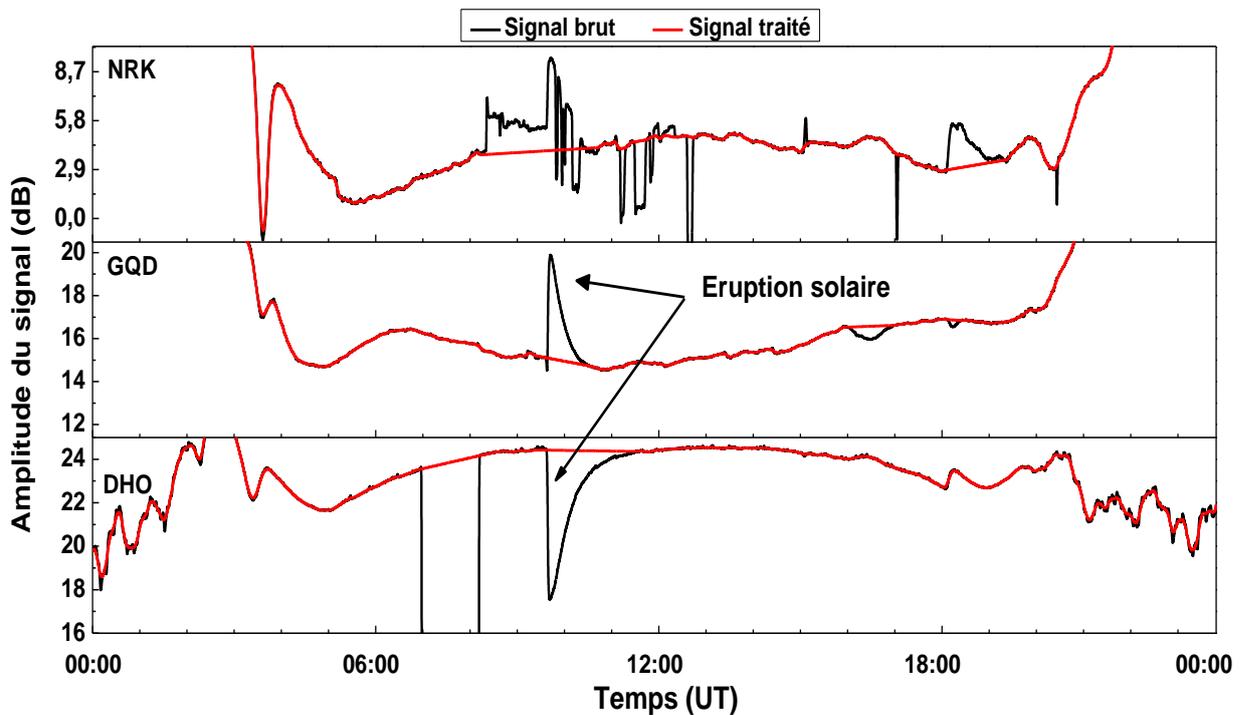


Figure 3.8 : Le signal VLF brut et traité pendant l'éruption solaire de classe M3.8.

Chapitre 3 : Traitement des données et simulation

Après avoir traité les amplitudes des signaux pendant la période calme (sans perturbations géomagnétiques), nous avons donc calculé la valeur moyenne de l'amplitude de chaque émetteur A_{moyenne} et sa déviation standard σ à chaque échantillonnage. Nous considérons une perturbation due au FAC lorsque la condition définie par $|A_{\text{perturbé}} - A_{\text{moyenne}}| \geq 3\sigma$ est vérifiée. Ici $A_{\text{perturbé}}$ est l'amplitude du signal perturbé. La Figure 3.9 présente un exemple des enregistrements d'une période calme et d'une période perturbée pendant la tempête de Décembre 2015 où les anomalies ont été enregistrées dans les trois émetteurs. Sur la base de ces figures nous pouvons noter que la méthode d'analyse utilisée illustre bien l'effet de la perturbation géomagnétique sur la basse couche de l'ionosphère et la propagation des signaux VLF.

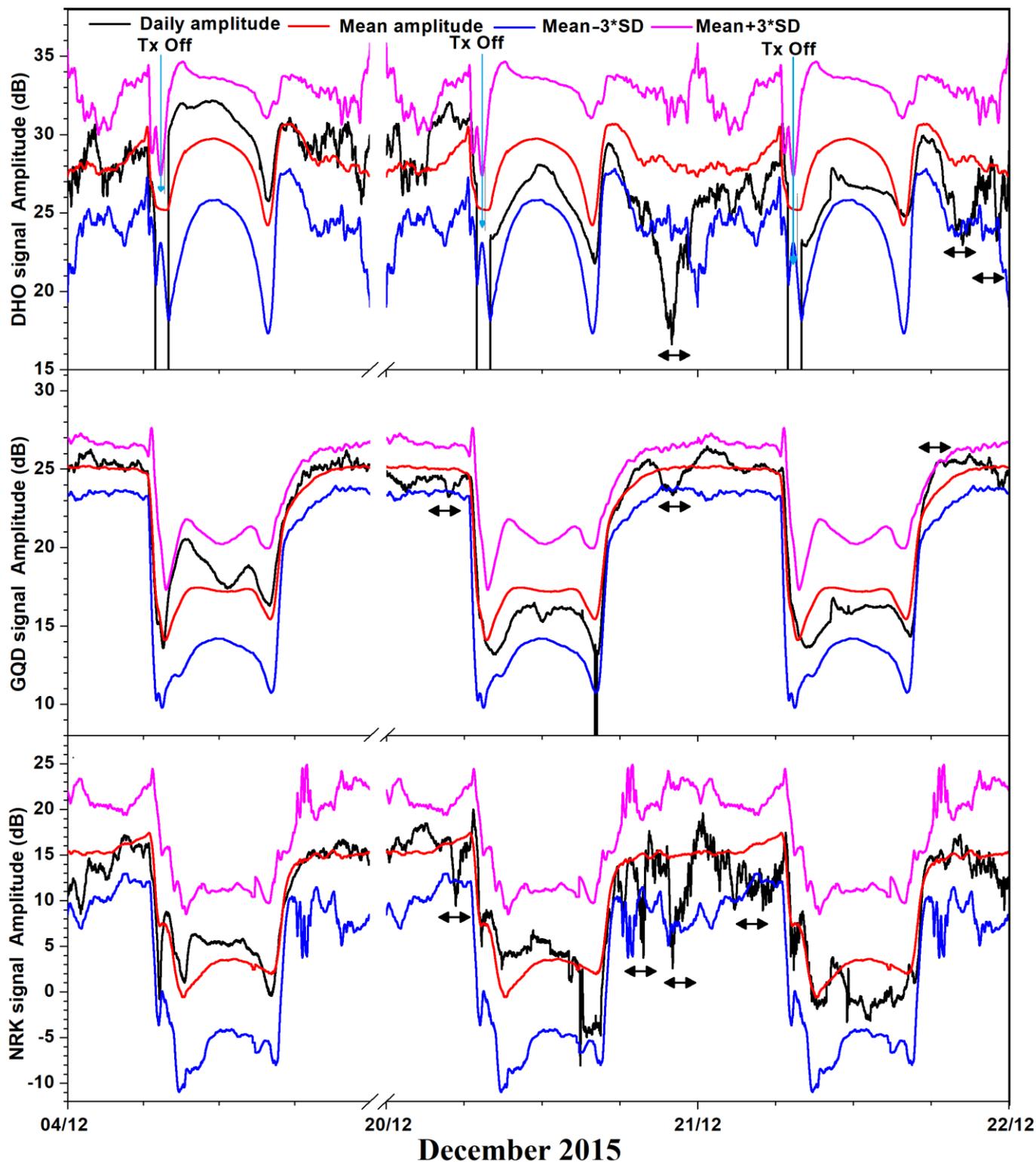


Figure 3.9 : Variation de l’amplitude du signal des trois émetteurs (DHO, GQD et NRK) pendant la tempête de Décembre 2015. Les doubles flèches noires montrent les périodes où les anomalies ont été enregistrées, les flèches bleues montrent les périodes où les émetteurs étaient éteints. (Crédit image : Kerrache et al., 2021).

3.2.2 Les évènements LEP

Lors de cette étape de mesure, la classification des différents types de LEP est basée sur les temps caractéristiques : Δt qui représente le temps entre la trace de la foudre et le début de la perturbation, t_d qui représente le temps que met la perturbation pour atteindre son maximum et enfin t_r est le temps de retour à l'équilibre (ou recouvrement). La détermination des deux premiers temps caractéristiques va nous permettre de connaître la région de la ceinture de radiation depuis laquelle les électrons précipitent (ou *L-Shell*) (Figure 3.10). Cette précipitation devient importante lors des perturbations géomagnétiques. Effectivement, la reconnexion entre les lignes du champ magnétique du vent solaire et celui de la magnétosphère permet aux particules d'origines solaires de pénétrer dans la magnétosphère interne (ou ceinture de radiation). Il est donc important de corréler la classe d'énergie des électrons qui ont pénétré dans l'atmosphère avec l'intensité de la perturbation géomagnétique.

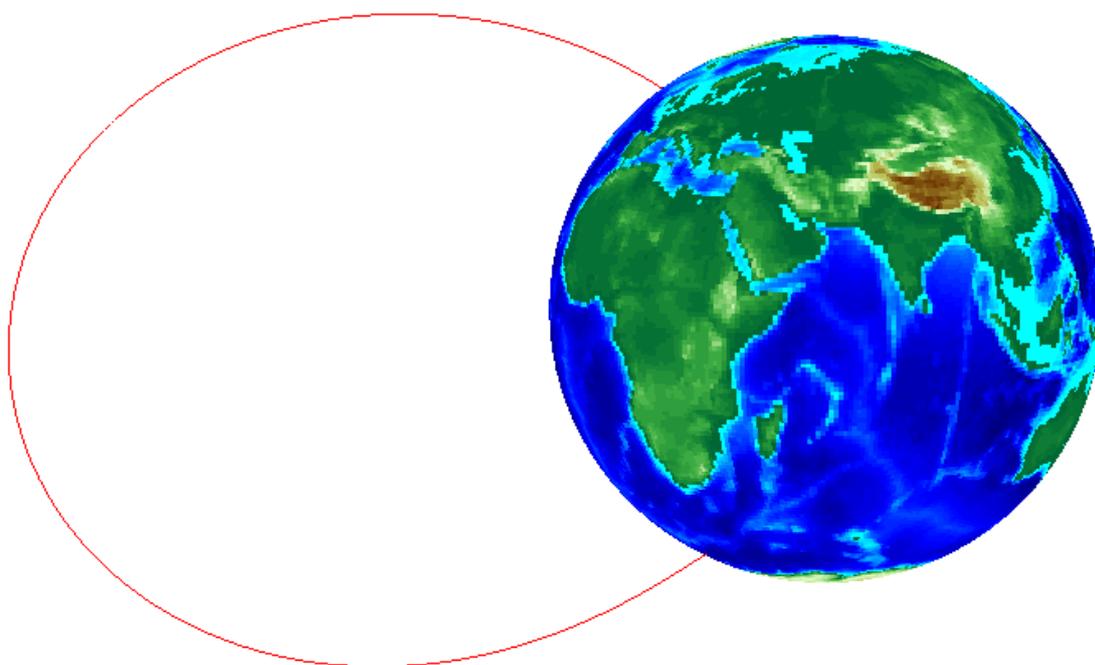


Figure 3.10 : Exemple d'une ligne de champ magnétique (en rouge) pour une *L-shell* égale à 5.

La Figure 3.11 montre un événement LEP enregistré le 24 Mars 2015 dans les émetteurs DHO et GQD. D'après la Figure, le pic intense correspond à l'émission de la foudre dans la gamme de fréquences VLF, qui sera utilisée comme référence pour la détermination des différents temps caractéristiques LEP. Ici, le temps Δt entre le pic de foudre et le début de la

Chapitre 3 : Traitement des données et simulation

perturbation est égal à 700 ms. Alors que pour le temps t_d également égal à 700 ms. Sur la base des différentes observations des événements LEP, trois types ont été identifiés en fonction de leurs temps caractéristiques : les événements ducted, non-ducted, et réflexion magnétosphérique (MR) (Tableau 3.2) (Johnson, 2001).

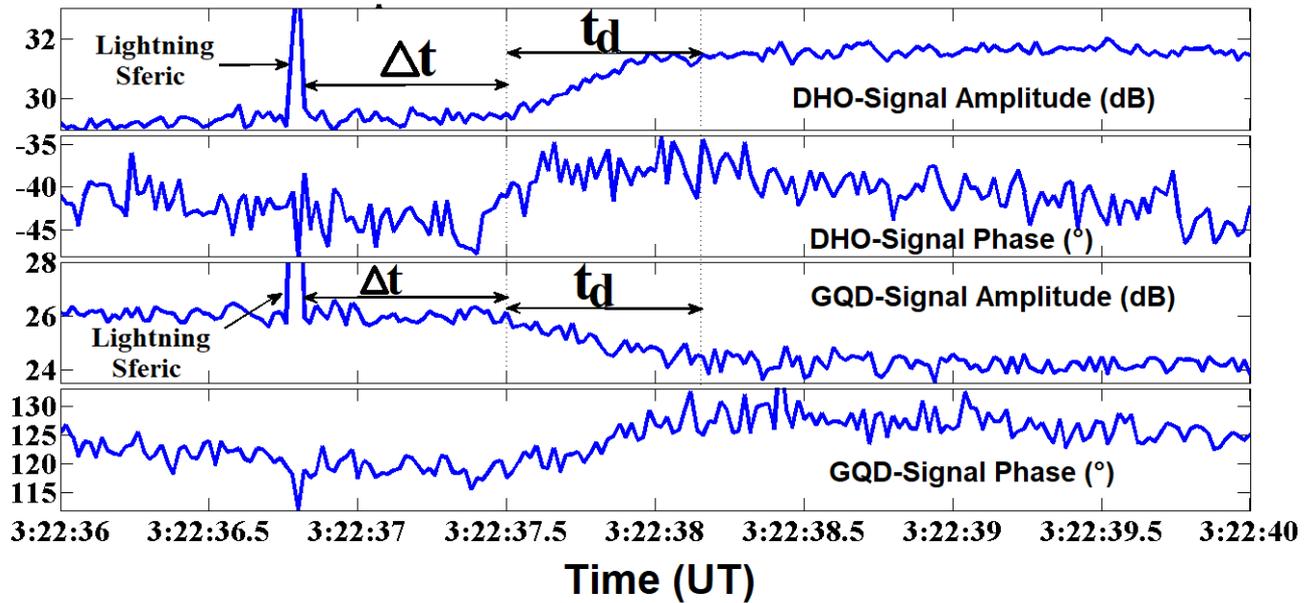


Figure 3.11 : Événement LEP observé le 24 Mars 2015 à 3:22:36.5 UT. Les deux panneaux supérieurs montrent l'amplitude et la phase du signal DHO en ordre successif. Les deux panneaux inférieurs montrent l'amplitude et la phase du signal GQD.

Tableau 3.2: Temps caractéristiques des événements LEP (Johnson, 2001).

Type	Δt (sec)	t_d (sec)	Temps de retour à l'équilibre (sec)
Ducted	0.6	1.7	10-100
No-ducted	0.7-1.3	2	10-100
MR	4	2	30-45

3.3 Simulation avec le code LWPC

3.3.1 Description du code LWPC

En considérant le guide d'ondes formé par la Terre et l'ionosphère, le code Long Wave Propagation Capability (LWPC) (Ferguson., 1998 ; Ferguson et Snyder., 1989) est un logiciel qui a fait ses preuves depuis longtemps dans la simulation de la propagation des ondes électromagnétiques à très basse fréquence (VLF : 3-30 kHz). Basé sur la théorie des modes, ce code peut reproduire l'amplitude et la phase du signal à différentes distances par rapport à l'émetteur. Le paramètre clé de cette théorie est le profil de la densité électronique à différentes altitudes et différentes régions de la Terre (Polaires, moyennes latitudes ou bien équatoriennes) donné par l'équation suivante :

$$N_e \text{ (cm}^{-3}\text{)} = 1,43 \times 10^7 \times e^{-0,15 \times z} \times e^{\beta \times (z-h')}$$

Ce profile, dite de Wait (1964) (Wait and Spies., 1964), suppose que la densité électronique augmente avec l'altitude et dépend uniquement de deux paramètres que sont : h' (km) qui représente la hauteur d'échelle et β (km^{-1}) qui représente le facteur de forme. Durant le jour, ces paramètres prennent des valeurs fixes (74 km pour h' et 0.3 km^{-1} pour β) alors que durant la nuit ces paramètres changent d'une région à une autre et d'une fréquence du signal à une autre. Il a été montré aussi que ces deux paramètres varient en fonction : du cycle de l'activité solaire (Raulin et al., 2006), dues aux phénomènes lumineux transitoires (NaitAmor et al 2016), les électrons énergétiques (LEP) (Kerrache et al., 2021). Cependant, connaissant les paramètres de la perturbation du signal VLF (l'amplitude et la phase) et au moyen du code LWPC nous pouvons donc évaluer les changements dans les paramètres de Wait qui mènent soit à l'augmentation ou la diminution de la densité des électrons.

3.3.2 Utilisation du code LWPC

Dans cette partie du travail, nous donnerons quelques exemples de la simulation du signal VLF au moyen du code LWPC. En fait, et comme nous l'avons dit précédemment, le code considère un guide d'ondes formé par la Terre et l'ionosphère et prend en compte les paramètres réels du milieu, à savoir : la permittivité électrique du sol et de la mer, la perméabilité magnétique, l'intensité du champ magnétique et la densité électronique de l'ionosphère (jour ou nuit). Les paramètres à introduire dans le code sont : le nom de l'émetteur,

Chapitre 3 : Traitement des données et simulation

les coordonnées géographiques du récepteur, l'heure et le jour de l'an comme le montre la Figure 3.12.

```
gcpath - Bloc-notes
Fichier Edition Format Affichage Aide
case-id GQD coverage of the Mediterranean
Name the output files
tx gcpath
Identify the transmitter
tx-data GQD
Choose the LWPM model night environment
ionosphere lwpm night
Set maximum range
range-max 5000
Choose receivers at (36.75N 03.47E) (36.75N 03.47E) an
receivers 36.75 -03.47 36.75 -03.47
+receivers 36.75 -03.47
gcpath
start
quit
[]

Run started on 08-05-2021 at 10:18:16
case-id GQD coverage of the Mediterranean
Name the output files
tx gcpath
Identify the transmitter
tx-data GQD
Choose the LWPM model night environment
ionosphere lwpm night
Set maximum range
range-max 5000
Choose receivers at (36.75N 03.47E) (36.75N 03.47E) an
receivers 36.75 -03.47 36.75 -03.47
+receivers 36.75 -03.47
gcpath
start

case_id: GQD coverage of the Mediterranean
xmtr_id tlat tlon bearing range r
gqd 52.92 3.28 161.0 5000. 36
rho lon azim dip bfield sigma eps

C:\WINDOWS\system32\cmd.exe
C:\WPCv21>Rem: BEARINGS.CMD exercises the BEARINGS/+BEARINGS option
C:\WPCv21>Rem: with a specific date and time chosen to put the
C:\WPCv21>Rem: day-night terminator on the path
C:\WPCv21>Rem: Delete previous files
C:\WPCv21>del Output\bearings.*
C:\WPCv21>Rem: Generate data
C:\WPCv21>\WPCv21\lwpm.exe bearings

bearings - Bloc-notes
Fichier Edition Format Affichage Aide
GQD coverage of the Mediterranean
freq= 22.1 tlat= 52.9 tlon= 3.3 bearing=161.0 power= 200.
z component incl= 0. heading= 0. talt= 0.0 ralt= 0.0
dist amplitude phase dist amplitude phase dist amplitude phase
0. 65.5974 0.0000 1020. 73.6457 124.8967 2040. 69.9138 176.5451
20. 107.0765 106.0647 1040. 73.5857 126.5325 2060. 70.1353 177.4161
40. 102.1147 120.4482 1060. 73.5870 128.5450 2080. 70.4315 178.1677
60. 97.7566 127.8108 1080. 73.7437 132.1730 2100. 70.8112 179.9402
80. 93.6774 130.0898 1100. 73.6800 137.2838 2120. 71.1179 183.1594
100. 91.2735 121.4402 1120. 73.4398 141.8130 2140. 71.2047 187.3526
120. 90.5071 117.4249 1140. 73.1570 145.3928 2160. 71.0220 191.4815
140. 89.8799 118.6864 1160. 73.0359 147.9772 2180. 70.6685 194.4549
160. 88.8525 124.3584 1180. 73.1467 150.1758 2200. 70.2583 196.4814
180. 86.8650 126.7171 1200. 73.2236 154.5686 2220. 69.8438 197.6930
200. 85.3187 122.8781 1220. 73.1398 159.9532 2240. 69.4693 198.2269
220. 84.2141 117.0468 1240. 72.9191 165.9083 2260. 69.1714 198.5771
240. 84.4480 111.8605 1260. 72.8548 171.5078 2280. 68.8752 199.1160
260. 84.5480 117.3002 1280. 72.5936 178.3665 2300. 68.5511 199.3653
280. 83.5302 123.1375 1300. 72.0386 184.2795 2320. 68.2726 199.3842
300. 81.9461 127.0253 1320. 71.4123 188.6972 2340. 68.0118 199.6341
320. 79.6593 124.3317 1340. 70.7934 191.7767 2360. 67.7038 199.9572
340. 78.4262 112.0806 1360. 70.2801 195.2511 2380. 67.3571 199.8825
360. 78.8925 99.0593 1380. 69.9641 197.8696 2400. 67.0624 199.3389
380. 80.6840 97.0193 1400. 69.7317 201.1729 2420. 66.8555 199.0437
400. 81.6169 104.8921 1420. 69.3625 205.4396 2440. 66.6228 199.4606
420. 81.8473 113.4064 1440. 68.7471 209.5518 2460. 66.2520 199.8902
440. 81.2408 125.8695 1460. 67.8396 212.2285 2480. 65.8306 199.3313
460. 79.5086 136.6792 1480. 66.9529 211.3364 2500. 65.5279 198.1092
480. 77.3207 141.6138 1500. 66.5582 209.9470 2520. 65.3642 197.1478
500. 73.8590 145.9447 1520. 66.1017 210.6620 2540. 65.2870 197.1290
520. 69.1145 138.1898 1540. 65.3061 210.3009 2560. 65.1574 198.5409
540. 64.4590 106.4208 1560. 64.4576 205.8129 2580. 64.7964 200.9114
560. 65.4480 60.5531 1580. 63.8685 200.3989 2600. 64.1313 203.0251
580. 68.0038 37.0164 1600. 63.7482 193.6059 2620. 63.2269 203.7054
600. 72.6892 31.0431 1620. 64.0915 186.9065 2640. 62.2196 202.3568
```

Figure 3.12 : Les étapes de la simulation avec le code LWPC.

Chapitre 3 : Traitement des données et simulation

Dans les figures 3.13, 3.14, nous avons présenté les amplitudes et les phases des trois émetteurs (DHO, GQD et NRK) en fonction de la distance émetteur-récepteur pendant une période calme. Ce qui est observé est que le signal présente des ondulations d'amplitude et de durée variables en fonction de la distance. Ces ondulations sont très importantes près de l'émetteur. A des distances plus élevées, la structure de l'amplitude et la phase devient stable. Ces structures d'onde ne sont que l'effet du changement modal du signal près et loin de l'émetteur. Effectivement, à proximité de l'émetteur, plusieurs modes sont émis avec des vitesses de phase et des coefficients d'atténuation différents. Comme les modes élevés ont des coefficients d'atténuations très élevés, ils subissent un amortissement en s'éloignant de l'émetteur. Ainsi, à grande distance de l'émetteur, seuls les modes fondamentaux survivront. La Figure 3.15 montre les simulations de la propagation du signal durant le jour et durant la nuit pour l'émetteur NRK. D'après la Figure la propagation du signal durant le jour est plus stable que la nuit. Cette stabilité est caractérisée par la disparition des ondulations fortement atténuées à grandes distances de l'émetteur.

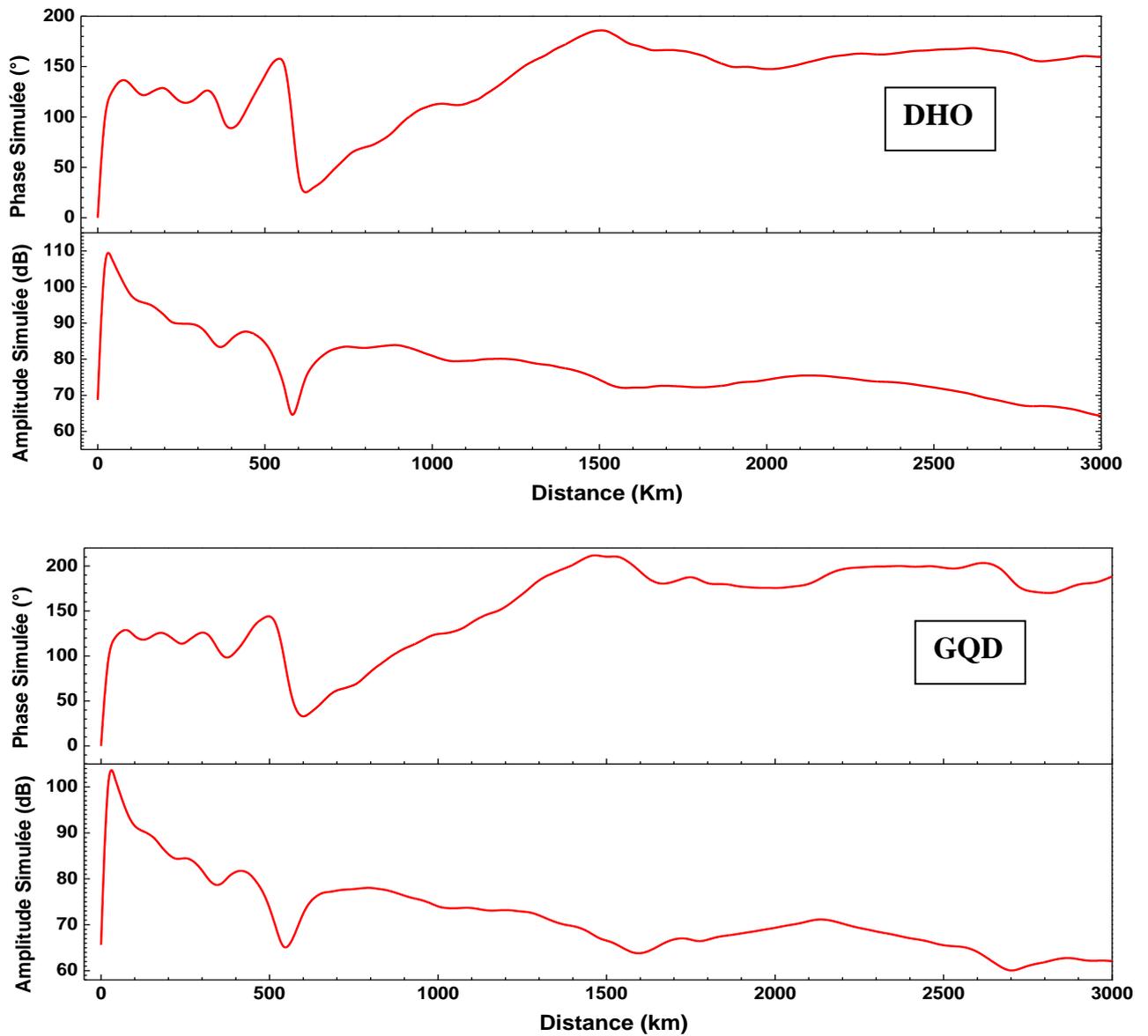


Figure 3.13 : La phase et l'amplitude des signaux DHO et GQD en fonction de la distance simulée par le code LWPC pour le jour du 24 Mars 2015 à 23:30 UT.

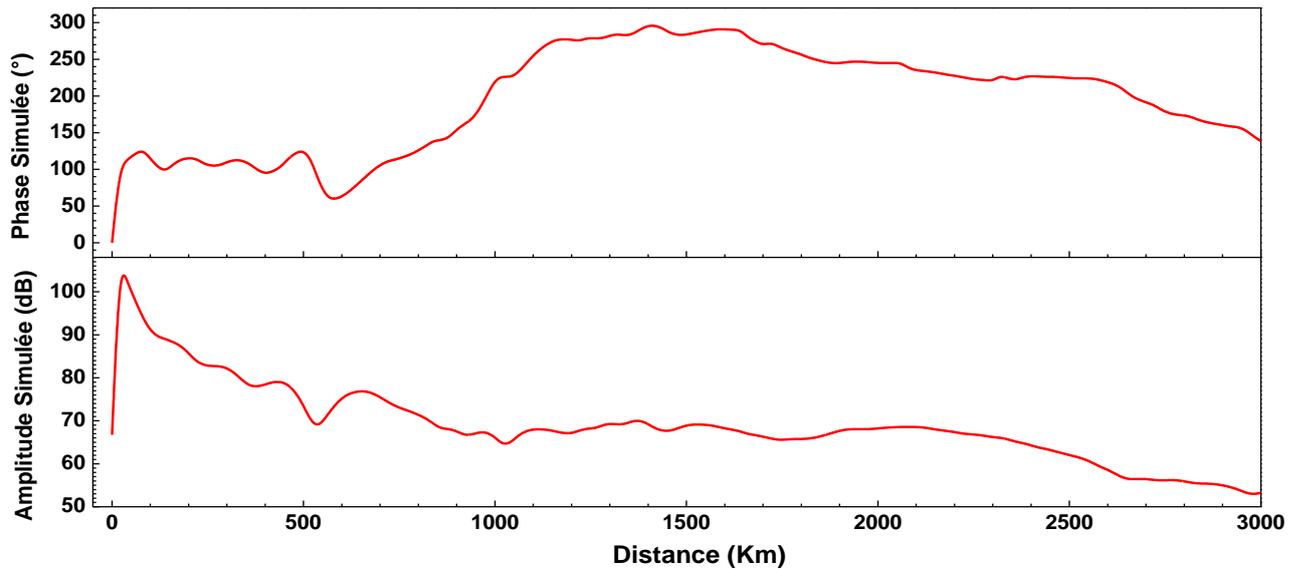


Figure 3.14 : La phase et l'amplitude du signal NRK en fonction de la distance simulée par le code LWPC pour le jour du 24 Mars 2015 à 23:30 UT.

Pour la simulation des événements LEP, nous avons d'abord supposé que la région perturbée a un profil Gaussien centré au-dessus de l'émetteur. Puis nous avons fait varier les paramètres Wait h' et β dans la région perturbée jusqu'à ce que les valeurs d'amplitude et de phase obtenues s'approchent de celles mesurées. Des exemples des profils gaussiens utilisés et des paramètres du signal (amplitude et phase) obtenus par la simulation LWPC seront présentés plus en détail dans la section des résultats.

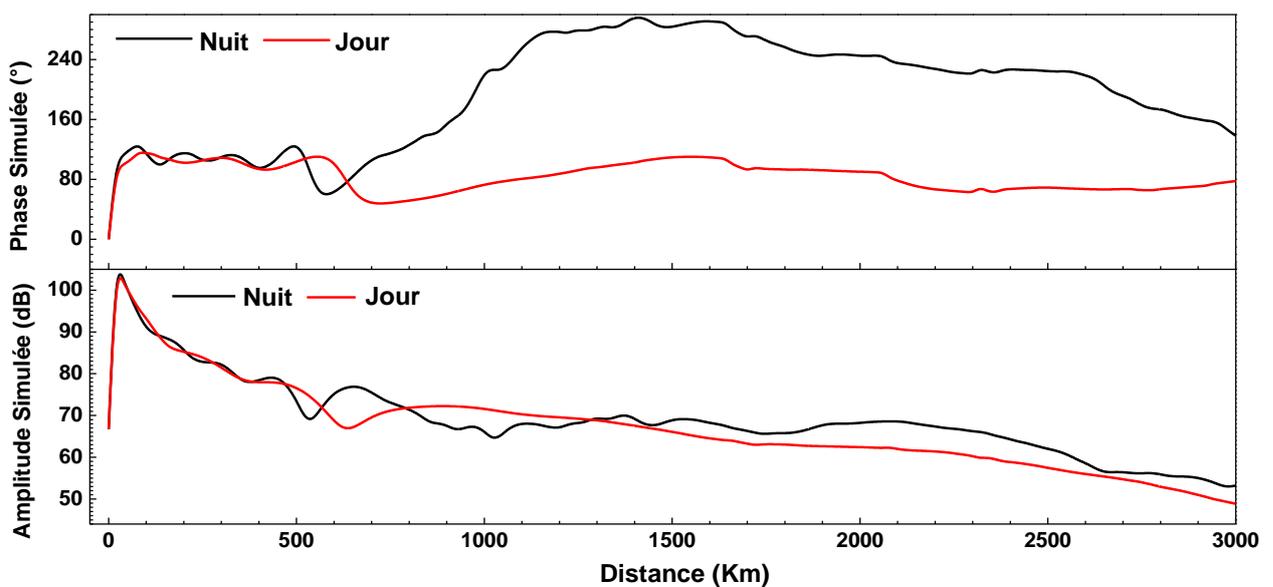


Figure 3.15 : Simulation de la phase et de l'amplitude en fonction de la distance pour l'émetteur NRK de jour et de nuit.

Chapitre 4 :

Analyse et interprétation du traitement des données

4 Analyse et interprétation du traitement des données

Ce chapitre présente les résultats de notre étude liés aux trois différentes activités géomagnétiques enregistrées en 2015. Il s'agit de la tempête du mois de Mars, la tempête du mois de Juin et finalement la tempête du mois de Décembre. Ces tempêtes sont à l'origine des anomalies observées dans les signaux VLF des émetteurs NRK, GQD et DHO. Les anomalies enregistrées sont séparées en deux types : directes et indirectes. Le premier type présenté dans ce chapitre, connu sous le nom de courants alignés au champ magnétique (FAC), concerne l'effet des particules du vent solaire qui précipitent directement à basses altitudes dans les régions de hautes latitudes. Ces précipitations sont à l'origine des aurores polaires. Le second type présenté dans le chapitre 5, en revanche, concerne la précipitation d'électrons énergétiques à basses altitudes après interaction avec une onde électromagnétique connue sous le nom de *whistler*.

4.1 L'effet direct des orages géomagnétiques sur la région D

Ce type d'événement se produit à la suite d'une reconnexion entre les lignes de champ magnétique du vent solaire (ou IMF) et la magnétosphère de la Terre. La reconnexion peut avoir lieu du côté du jour si la composante B_z du vent solaire est négative. Dans le cas contraire, et si B_z est positif, la reconnexion peut avoir lieu plus loin dans la queue de la magnétosphère où les lignes de champ magnétique se referment. Les événements sélectionnés ont été enregistrés pendant le maximum de l'activité solaire et ont donc produit de fortes perturbations géomagnétiques d'indice $Dst < -150$ nT.

4.1.1 La super tempête du 17-18 Mars 2015

Pendant le mois de Mars 2015, une région active nommée AR2297 a été la source de nombreuses éruptions solaires de classe X, M et C. Cette région a produit une éruption solaire de classe C9 de longue durée (t1 01:15:00, t2 2:13:00) et qui a été suivie par une éjection de masse coronale (CME) de type halo le 15 Mars 2015 observée par le satellite SOHO à (1:48:05) (<https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CMElist/>). Plusieurs travaux ont été réalisés pour caractériser et étudier l'effet de ce nuage magnétique sur la Terre (Pilipenko et al. ; 2018 ; Alberti et al., 2017 ; Verkhoglyadova et al., 2016). La composante B_z du champ magnétique interplanétaire (IMF) transporté par la CME a fluctué entre des valeurs positives et négatives, comme le présente la

Chapitre 4 : Analyse et interprétation du traitement des données

Figure 4.1. L'intensité minimale de B_z était de -24 nT enregistrée le 17 Mars à 14 h 30 UT. En raison de ces conditions, une forte diminution de l'indice Dst à la valeur de -222 nT a été enregistrée le même jour à 23 UT et une forte augmentation de l'indice AE à 2000 nT enregistrée à 02 UT (Figure 4.1). Cependant, cette tempête a été considérée comme la plus forte du cycle solaire 24.

Afin de voir l'effet de cette perturbation géomagnétique sur les signaux VLF, nous avons présenté dans la Figure 4.1.d les amplitudes normalisées des signaux entre le 15 et le 31 Mars 2015. D'après la Figure, l'amplitude était comprise entre $\pm 3\sigma$ pendant la période relativement calme avant le 17 Mars. Par la suite, les amplitudes des signaux ont commencé à présenter des anomalies pendant le développement de la phase principale de la perturbation et qui fluctuent entre des valeurs $>+3\sigma$ et $<-3\sigma$. Pour mieux présenter la réponse des amplitudes du signal VLF à cette tempête magnétosphérique, nous avons présenté dans la Figure 4.2 les amplitudes du signal pendant un jour calme (ici le 13 Mars) ainsi que la période de forte perturbation (du 18 au 21 Mars).

D'après les figures et pendant la journée calme, l'amplitude du signal était comprise entre $\pm 3\sigma$ valide pour tous les émetteurs. Par contre, et pendant les jours de fortes perturbations, les signaux ont montré des anomalies supérieures à $|3\sigma|$. En effet, dans le cas du signal NRK, en plus des périodes où les anomalies ont dépassé $|3\sigma|$, l'émetteur a été contraint de s'éteindre pendant la journée du 19 Mars pendant plusieurs heures. Une autre particularité du comportement du signal NRK ce jour-là était que la trace de la transition Jour/Nuit, ou coucher de soleil (SS), avait complètement disparu puisque l'amplitude était d'environ 12 dB soit une différence de 8 dB par rapport au jour calme. Le même phénomène a été observé dans l'amplitude des deux signaux GQD et DHO, même si le niveau de l'anomalie était inférieur à $|3\sigma|$.

Nous avons également observé que les anomalies ont persisté même pendant la phase de retour à l'équilibre caractérisée par des valeurs de Dst autour de -40 nT. Effectivement, dans la Figure 4.3 nous avons présenté les amplitudes des signaux de tous les émetteurs entre le 24 Mars et le 01 Avril à 00:00:00 UT ainsi que celles du jour ambiant. D'après les graphiques et à l'exception de l'émetteur NRK, le niveau de l'amplitude du signal diurne a remarquablement diminué à partir du 26 Mars, puis est revenu à son niveau normal après le 1^{er} Avril.

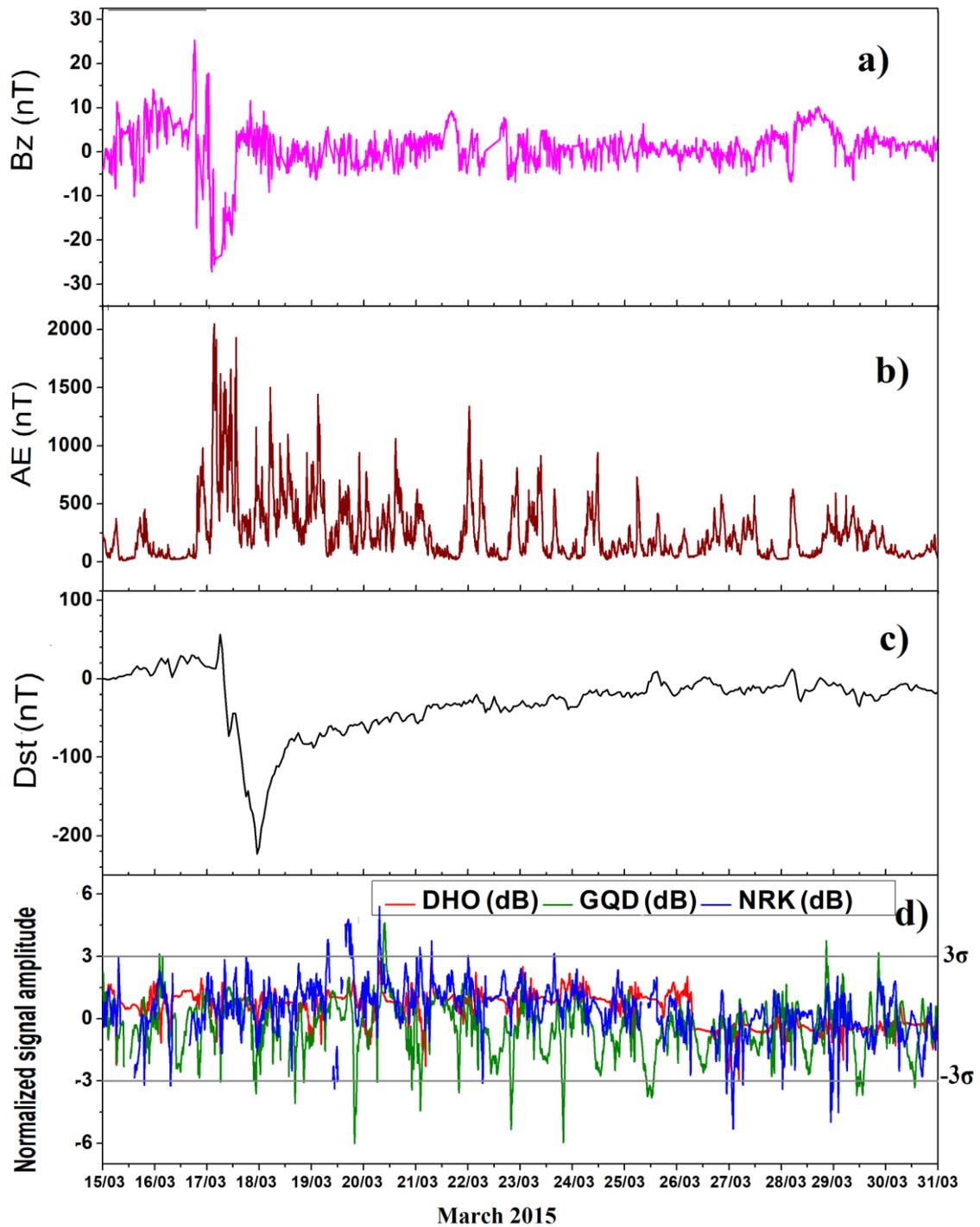


Figure 4.1 : Variation journalière a) : la composante Z du champ magnétique interplanétaire IMF B_z . b) : l'indice AE. c) : Indice Dst. d) : Amplitude normalisée du signal d'amplitude des trois émetteurs pendant la tempête de Mars 2015.

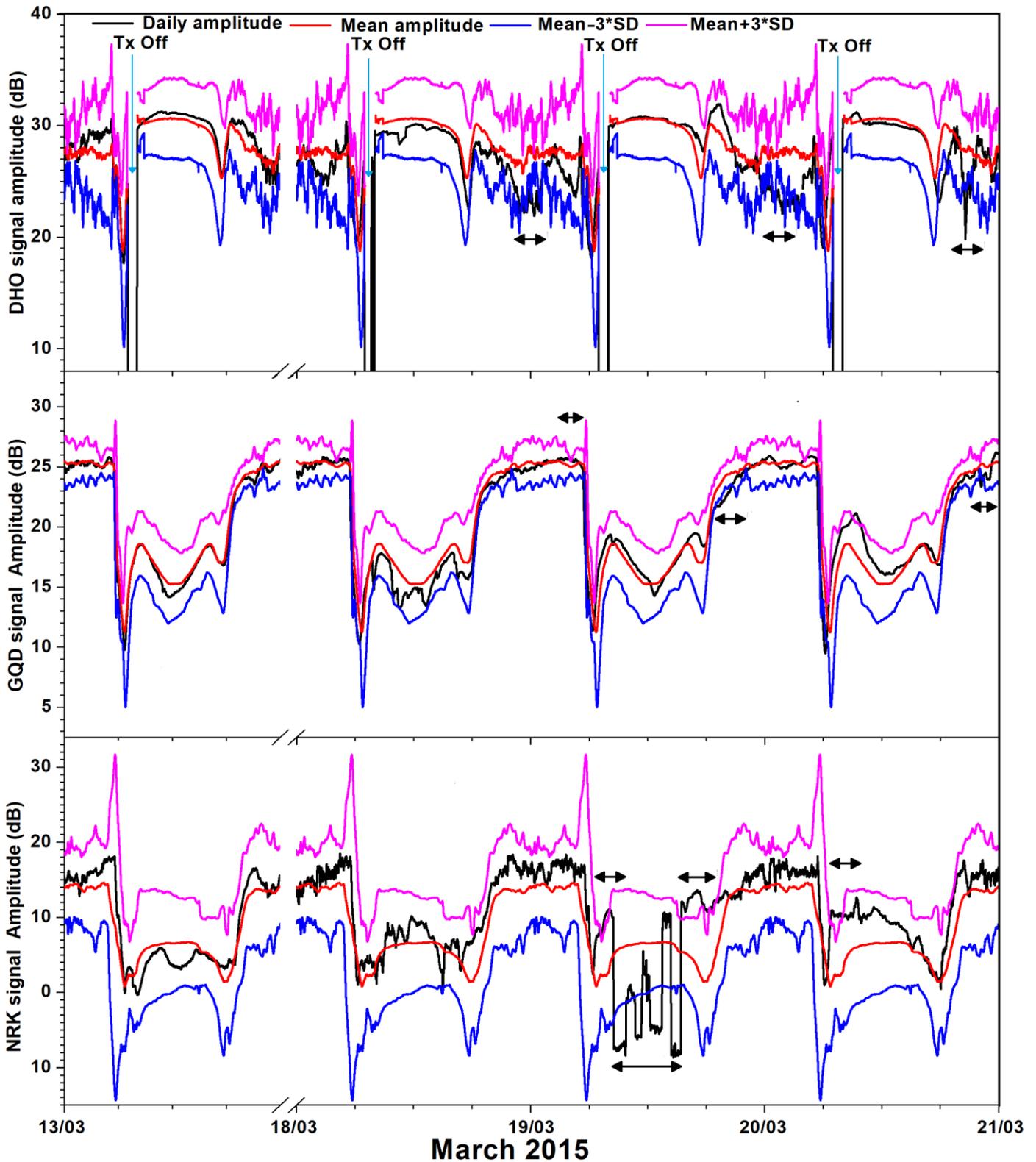


Figure 4.2 : Variation journalière des amplitudes des signaux des émetteurs (DHO, GQD et NRK) pendant la tempête de Mars 2015. Les doubles flèches noires montrent les périodes où des anomalies ont été enregistrées, les flèches bleues montrent les périodes où les émetteurs étaient éteints. (Crédit image : Kerrache et al., 2021).

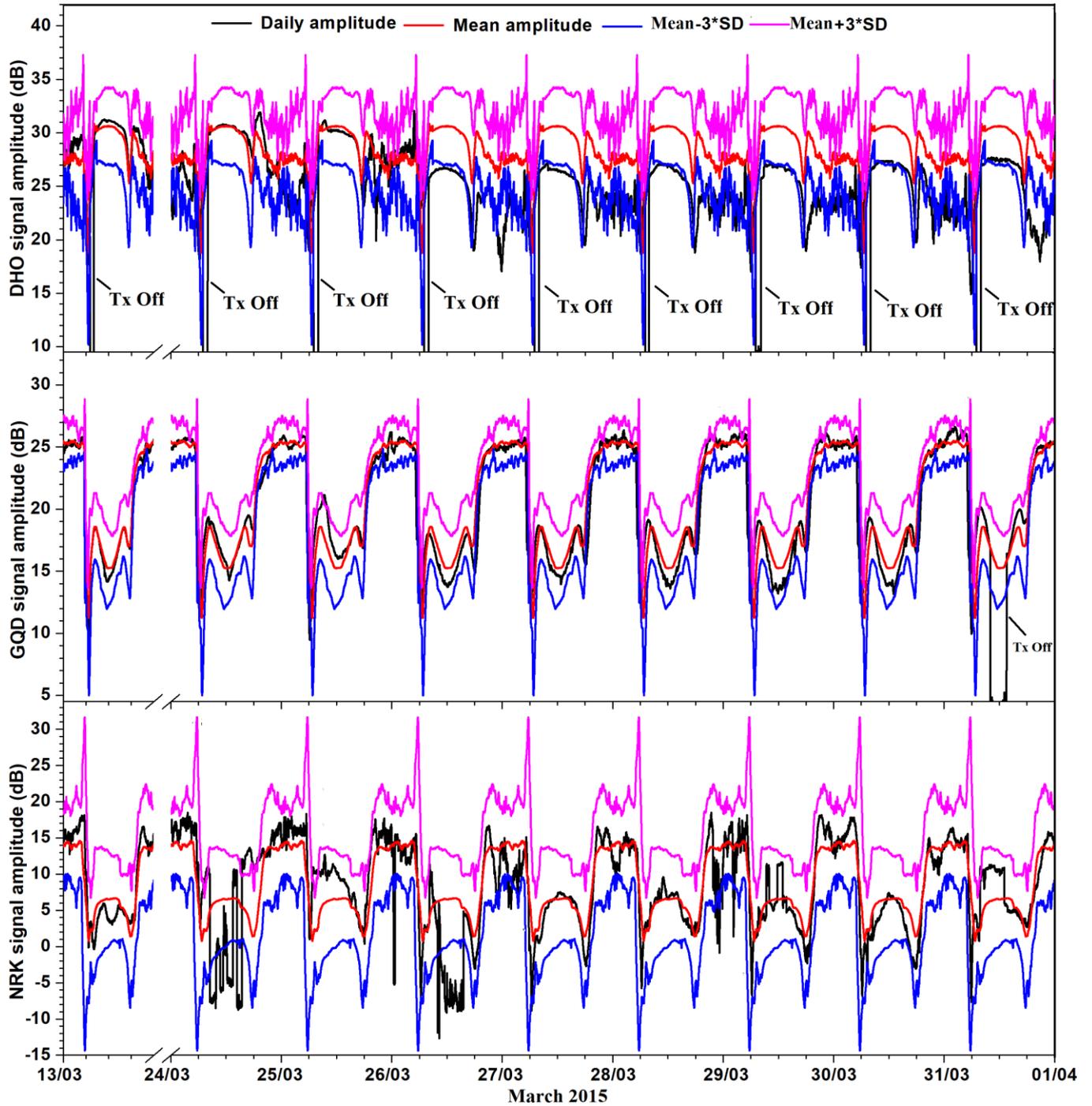


Figure 4.3 : Variation journalière des amplitudes des signaux des émetteurs DHO, GQD et NRK vers la fin du mois de Mars 2015. Les lignes noires montrent les périodes où les émetteurs étaient éteints. (Crédit image : Kerrache et al., 2021).

Chapitre 4 : Analyse et interprétation du traitement des données

Cela est dû à la persistance de la perturbation géomagnétique qui a continué à bombarder l'ionosphère avec des particules énergétiques. En conséquence, l'atténuation du signal dans la région *D* est restée à son niveau élevé. Ces effets de la tempête géomagnétique ont été attribués à une importante production d'oxyde nitrique (NO) causée par la précipitation de particules à basses altitudes (Dickinson et al., 1978) qui s'est propagée aux moyennes et basses latitudes (Torkar et al., 1980). Ce scénario a récemment été confirmé par des données satellitaires sur les mesures de densité de NO (Kirkwood et al., 2015).

L'observation de la précipitation des particules énergétiques de la magnétosphère externe, ou magnétopause, vers la magnétosphère interne et les ceintures de radiation a été mise en évidence au moyen de données satellitaires telles que les sondes RBSP A et B (Baker et al., 2021 ; Elena et al., 2016 et leurs références). En effet, la Figure 4.4 présente le flux d'électrons d'énergie 1.9 MeV enregistré entre le 1^{er} Mars et le 1^{er} Avril 2015. Selon les tracés et avant l'arrivée de la perturbation, les électrons relativistes étaient situés à des distances élevées entre $L=4$ et $L=6$ avec des flux variables. En revanche, à l'arrivée de la perturbation géomagnétique, deux phénomènes ont été observés par les deux sondes. Le premier est la croissance du flux d'électrons relativistes à des valeurs supérieures à $10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ MeV}^{-1}$.

La seconde observation concerne la région occupée par ces électrons relativistes qui est descendue jusqu'à la distance d'arrêt située à $L=2.8$ et qui a persisté jusqu'à la fin du mois de Mars. Ces mêmes observations ont été rapportées pour des électrons relativistes d'énergies supérieures à 1.9 MeV avec une seule différence sur l'intensité du flux qui diminue lorsque l'énergie augmente. Nous avons observé aussi que le flux des électrons relativistes à *L-shell* élevée décroît rapidement qu'à *L-shell* faible. Cela veut dire que les électrons relativistes ont une durée de vie plus importante à *L-shell* faible bien que le processus d'accélération soit supposé le même.

Chapitre 4 : Analyse et interprétation du traitement des données

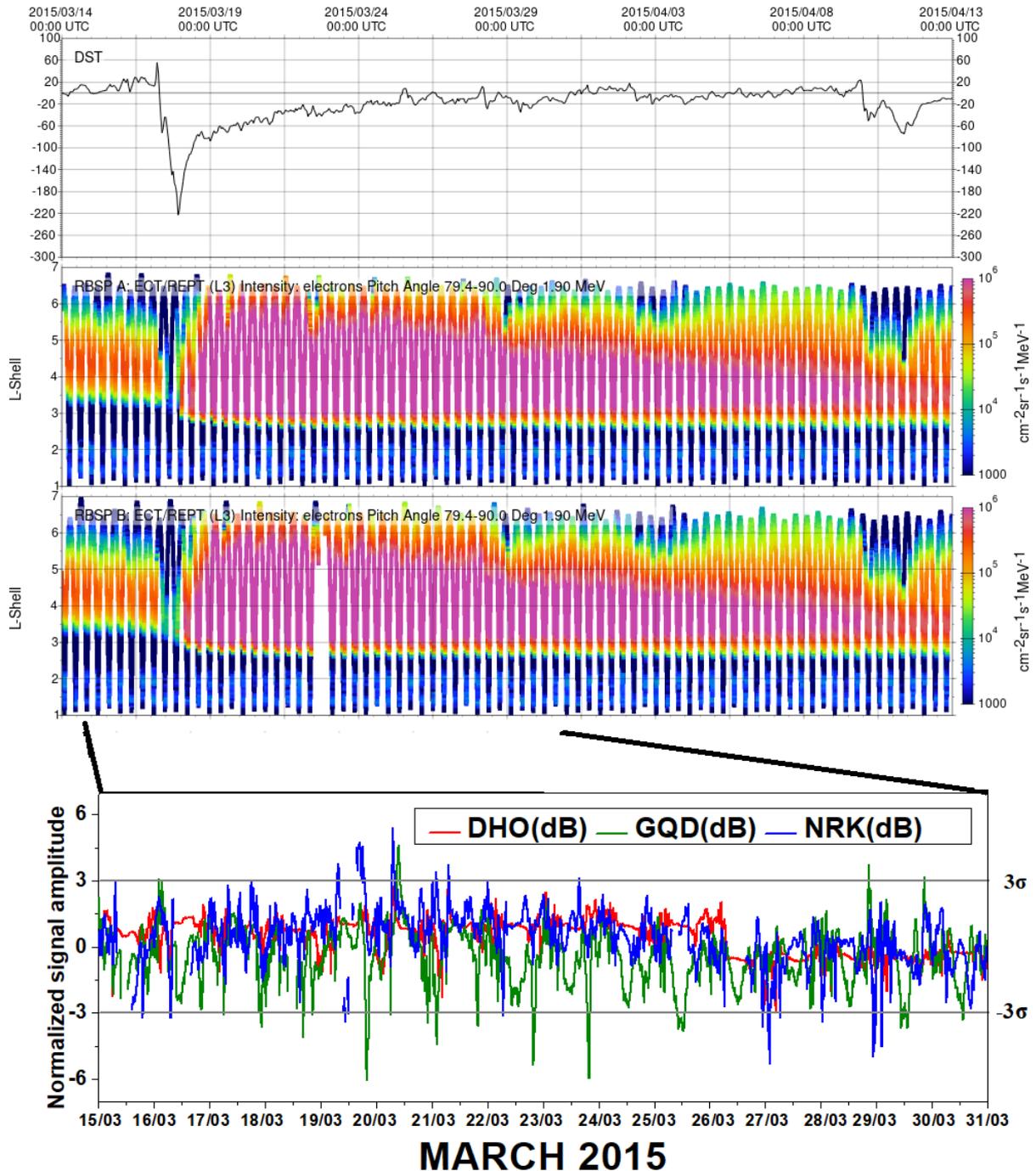


Figure 4.4 : Panneau supérieur variation quotidienne de l'indice Dst, les deux panneaux du milieu Flux mesuré par les sondes Van Allen (RBSP) A et B, panneau en bas le signal d'amplitude normalisé de tous les émetteurs pendant la tempête de Mars 2015.

4.1.2 Tempête intense du 22 au 24 Juin 2015

Cette tempête a été la deuxième plus grande tempête géomagnétique du cycle solaire 24 après celle des 17-18 Mars 2015. Elle était associée à deux CME qui ont eu un impact sur l'environnement terrestre le 22 Juin (S. Kumar & Kumar, 2019). La composante B_z du champ magnétique interplanétaire a fortement varié entre des valeurs positives (vers le nord) et négatives (vers le sud). La première CME a produit un orage géomagnétique mineur avec un indice Dst de -50 nT. A l'arrivée de la seconde CME, l'indice Dst est descendu à -195 nT et l'indice AE a augmenté jusqu'à 2250 nT le 23 Juin à 06 UT, comme le montre la Figure 4.5.b. Les variations des amplitudes normalisées des trois signaux VLF, présentées sur la Figure 4.5.d, étaient comprises entre $\pm 3\sigma$ jusqu'à la nuit du 21 Juin durant laquelle l'indice Dst a pris des valeurs très basses. Après l'arrivée des deux CME sur la Terre, de fortes anomalies dans les signaux VLF ont été enregistrées entre le 23 et le 25 Juin remarquablement observables dans les signaux GQD et NRK. Les anomalies étaient plus fréquentes pendant la nuit sur le signal GQD. Sur le signal NRK, comme lors de la tempête de Mars, les anomalies ont également été observées pendant la journée. Cette différence est due à l'emplacement géographique des émetteurs.

Comme nous l'avons expliqué précédemment, l'émetteur NRK est situé dans une région de haute latitude, de sorte que le segment de la trajectoire GCP du signal à proximité de l'émetteur est fortement affecté par les particules provenant de l'espace. En revanche, les émetteurs DHO et GQD sont situés dans des régions de latitude moyenne et sont donc affectés pendant la période la plus intense de la perturbation géomagnétique. Une autre raison de cette différence dans l'observation des anomalies diurnes est qu'aux moyennes et basses latitudes, la production d'électrons est principalement régie par l'absorption du rayonnement solaire. Cependant, il doit y avoir un flux de particules énergétiques très élevé à ces latitudes pour contribuer ou dépasser le taux de production d'électrons par absorption du rayonnement solaire.

La Figure 4.6 présente la variation d'amplitude des trois signaux VLF du 19 Juin à 00:00:00 UT au 25 Juin à 00:00:00 UT avec une pause entre le 20 Juin à 00:00:00 UT et le 23 Juin à 00:00:00 UT. Les variations journalières de l'amplitude des trois signaux VLF étaient inférieures à la tolérance de 3σ jusqu'à la nuit du 22 Juin. Pendant la période de forte décroissance de l'indice Dst, de fortes anomalies dans les signaux se sont produites du 23 au 25 Juin principalement dans les signaux GQD et NRK. Une particularité de cet événement est que le 24 Juin à 17:02:40 et 17:43:50 deux perturbations avec des amplitudes de 3.5 et 2.3 dB

respectivement ont été enregistrées, voir la région agrandie de la Figure 4.6, qui représentent une évidence claire de la pénétration de particules énergétiques dans l'atmosphère à basses altitudes. Les mêmes évènements ont également été enregistrés sur les signaux GQD et DHO mais les amplitudes correspondantes sont très faibles.

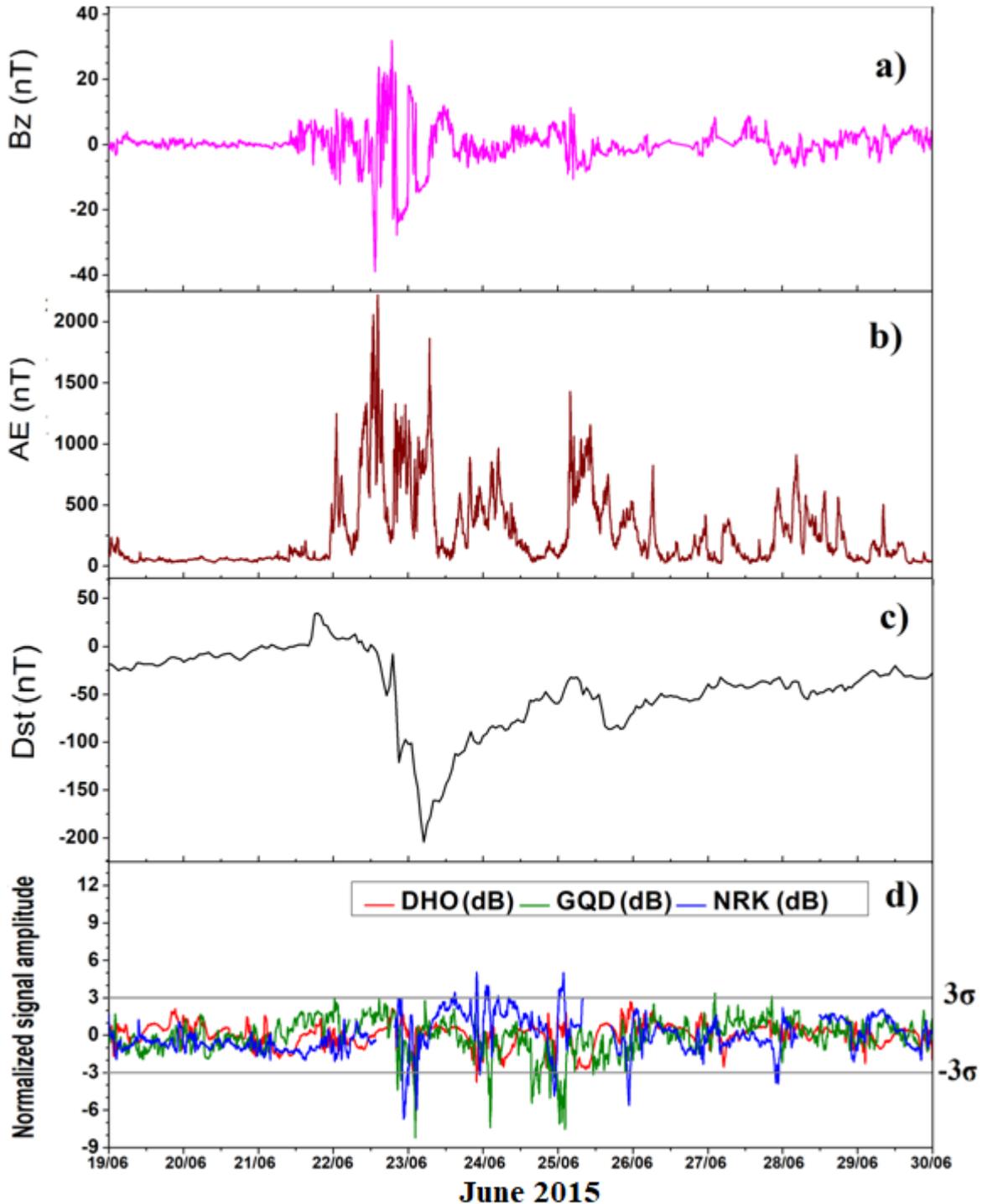


Figure 4.5 : Même présentation que la Figure 4.1 mais pour l'événement de Juin.

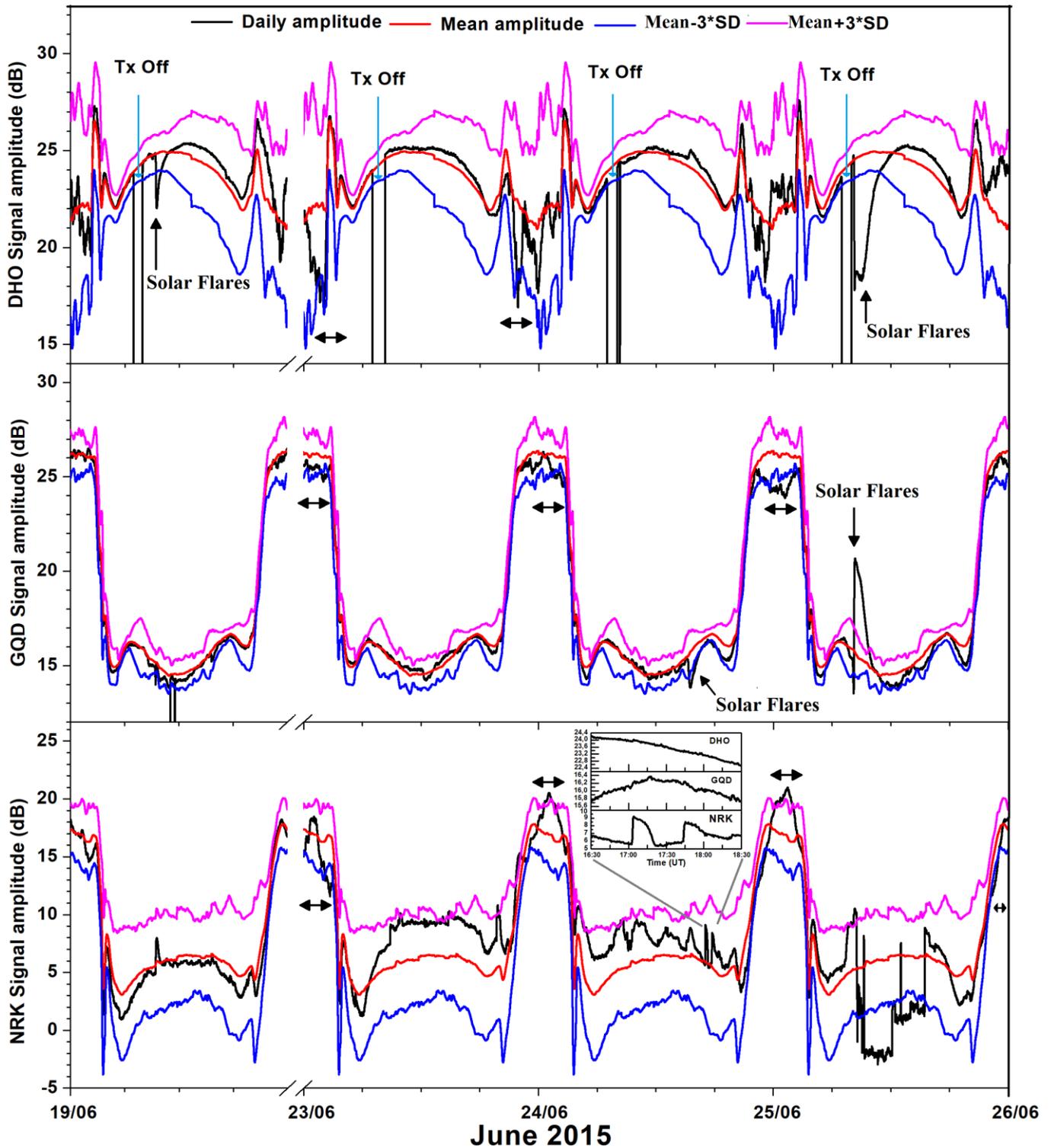


Figure 4.6 : Même présentation que la Figure 4.2 de Mars, mais pour l'événement de Juin. La région zoomée montre les perturbations du signal dues aux FAC entre 17:00:00 UT et 18:00:00 UT. FAC, courants alignés avec le champ magnétique.

(Crédit image : Kerrache et al., 2021).

Chapitre 4 : Analyse et interprétation du traitement des données

De la même façon que l'évènement du mois de Mars, nous avons présenté dans la Figure 4.7 le flux des électrons d'énergie de 1.9 MeV enregistré par les deux sondes RBSP A et B. Au cours de ce mois, une perturbation modérée d'indice Dst -73 nT a été enregistrée le 8 Juin et qui a été à l'origine de l'accélération et de la précipitation d'électrons relativistes autour de la *L-shell* égale à 4.2 quelques jours après l'arrivée de la perturbation. Dans le cas de la forte perturbation géomagnétique du 23 Juin, deux observations peuvent être tirées des enregistrements. La première est que la précipitation s'est répandue jusqu'aux faibles *L-Shell* et à des flux de l'ordre de $10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ MeV}^{-1}$. La seconde observation est que le temps entre le minimum Dst et le début des précipitations n'est que de quelques heures. Ceci est dû au fait que la ceinture de Van Allen était déjà peuplée d'électrons relativistes suite à la première perturbation géomagnétique et que l'évènement du 23 Juin n'a fait qu'intensifier le flux d'électrons.

Chapitre 4 : Analyse et interprétation du traitement des données

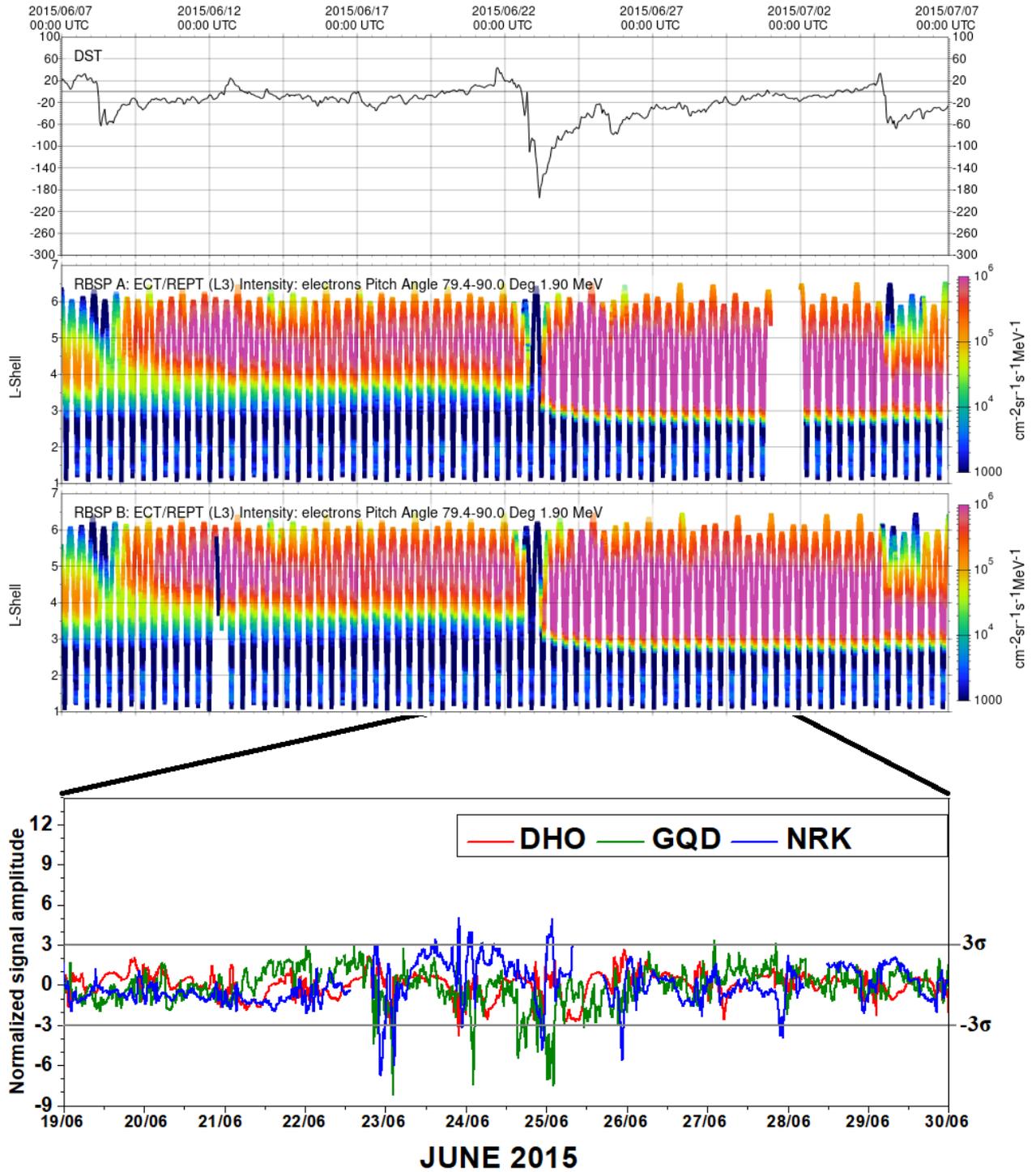


Figure 4.7 : Même présentation que la Figure 4.4 de Mars, mais pour l'événement de Juin.

4.1.3 Tempête intense du 20-21 Décembre 2015

Dans l'après-midi du 19 Décembre 2015, une CME a percuté la Terre et a produit une série de chocs magnétosphériques caractérisés par une valeur positive de la composante B_z et une augmentation de l'indice Dst jusqu'à +43 nT enregistrée à 23h. Quelques heures plus tard, les conditions du vent solaire ont changé où B_z a pris des valeurs négatives conduisant à une chute de l'indice Dst à une valeur de -155 nT le 20 Décembre à 23 h. Ces conditions sont regroupées sur la Figure 4.8 (a-c) ainsi que les amplitudes normalisées des trois émetteurs pendant la même période. D'après les tracés d'amplitude normalisée, des anomalies sont clairement observables dans les trois signaux, avec un changement abrupt dans l'amplitude normalisée du signal DHO de -12 enregistré pendant les nuits du 21 et 22 Décembre. À partir du 24 Décembre, les amplitudes des signaux sont revenues à leurs valeurs normales, sauf pour l'émetteur DHO qui était en état d'arrêt.

Pour mieux illustrer l'effet de cette activité géomagnétique sur le signal VLF, nous avons tracé sur la Figure 4.9 les amplitudes des trois émetteurs pendant une journée calme (le 04 Décembre), et deux journées perturbées qui coïncident avec le minimum de Dst. Il est observé que les perturbations sont enregistrées en mêmes temps dans les trois émetteurs avec des amplitudes variant d'un émetteur à l'autre. Il convient de mentionner ici que l'importance de l'effet de la perturbation géomagnétique sur la couche D de l'ionosphère et la propagation du signal VLF n'est pas liée à la magnitude de l'anomalie puisque l'amplitude enregistrée par le récepteur est fortement affectée par la composition modale de la propagation des ondes du Sol et du ciel qui arrivent au récepteur avec des phases différentes. Ainsi, le seul indicateur de l'ampleur de l'effet de la perturbation géomagnétique sur la couche D de l'ionosphère est la durée d'observation des changements dans le signal VLF.

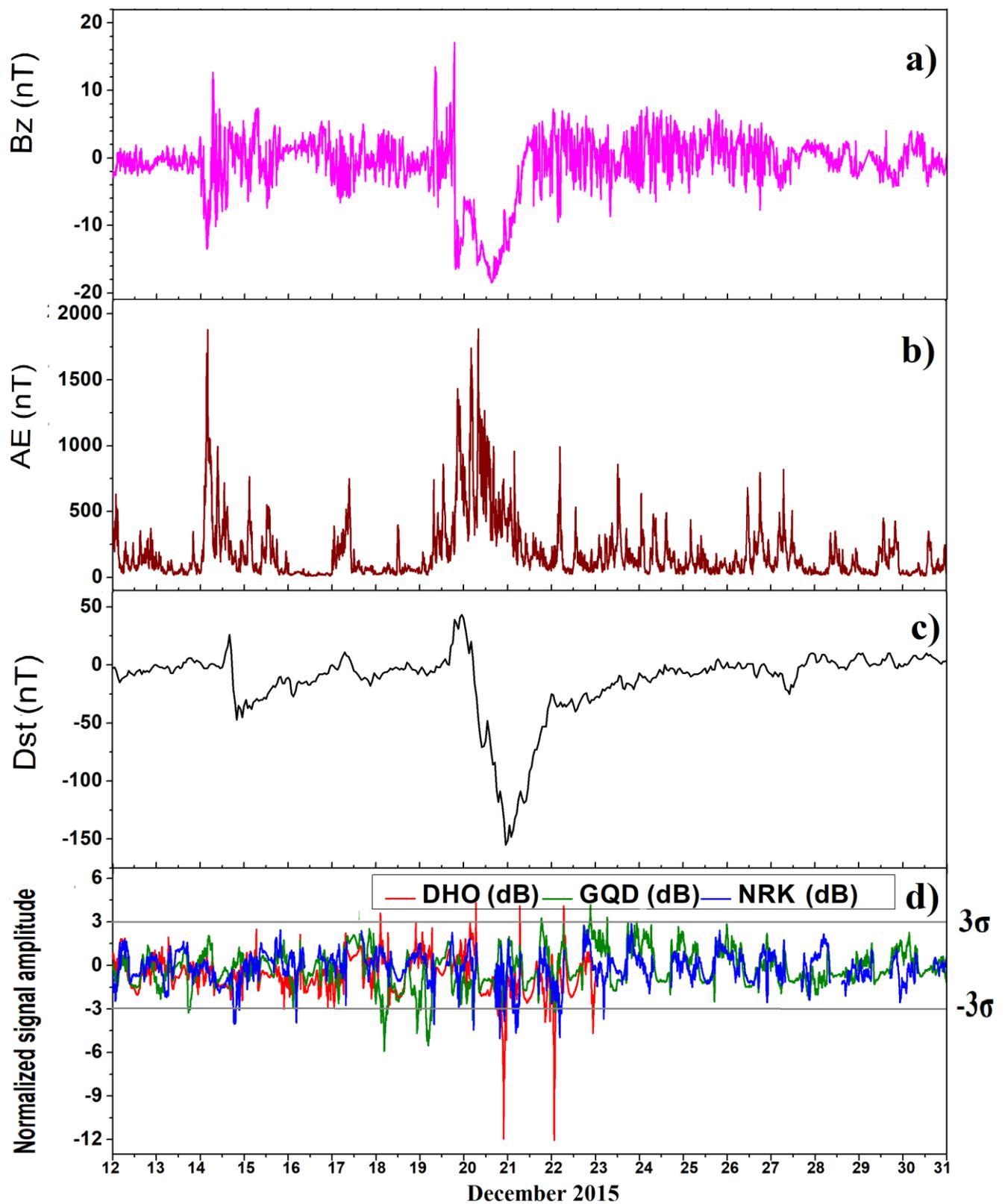


Figure 4.8 : Même présentation que la Figure 4.1 de Mars, mais pour l'événement de Décembre 2015.

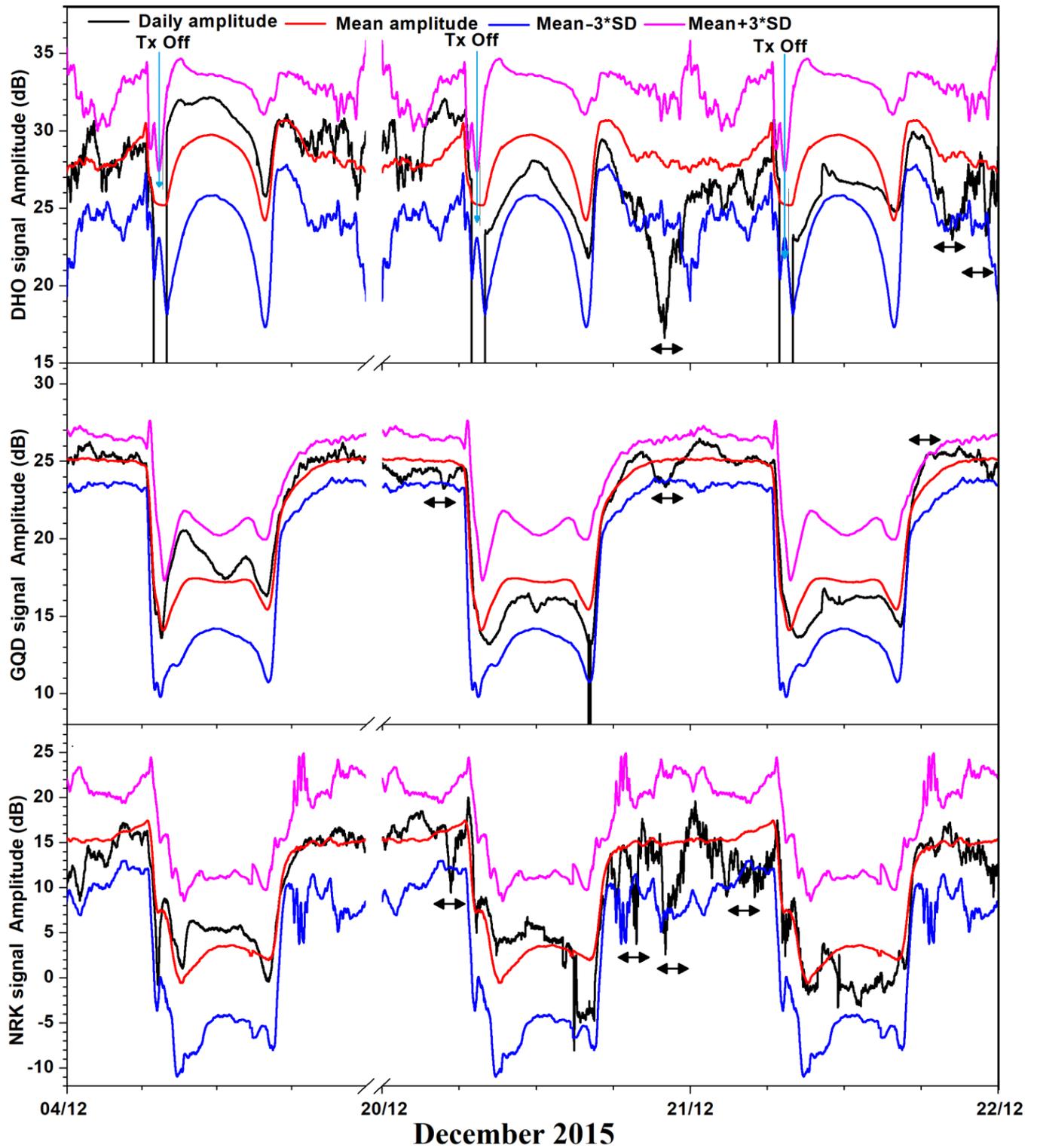


Figure 4.9 : Même présentation que la Figure 4.2 de Mars, mais pour l'événement de Décembre. (Crédit image : Kerrache et al. ; 2021).

Chapitre 4 : Analyse et interprétation du traitement des données

L'observation des enregistrements des deux sondes RBSP pendant l'activité géomagnétique est présentée sur la Figure 4.10. Identique au cas de Juin 2015, une activité géomagnétique modérée de Dst -47nT a été enregistrée le 14 Décembre et qui a été à l'origine de la précipitation d'électrons relativistes d'énergie de 1.9 MeV situés entre L-Shell 3.6 et 5.8. À l'arrivée de la perturbation géomagnétique le 20 Décembre 2015 à 23 UT, le flux d'électrons a augmenté significativement jusqu'à $10^6 \text{ cm}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{s}^{-1} \text{MeV}^{-1}$ observés au niveau de la L-shell de 3.1 jusqu'à 5.5 occupant ainsi la ceinture de radiation interne.

Les observations au Sol et par les satellites ont révélé que les perturbations géomagnétiques sont à l'origine des anomalies observées dans les signaux VLF dues à la modification du guide d'onde Terre-ionosphère. En plus de cet effet direct connu sous le nom de courants alignés au champ magnétique terrestre, l'important peuplement de la ceinture de Van Allen par des électrons relativistes génère également des perturbations locales du signal VLF et donc de la couche D de l'ionosphère sous l'effet d'un phénomène indirect connu sous le nom de Lightning Induced Electrons Precipitations (LEP) qui sera présenté dans la section suivante.

Chapitre 4 : Analyse et interprétation du traitement des données

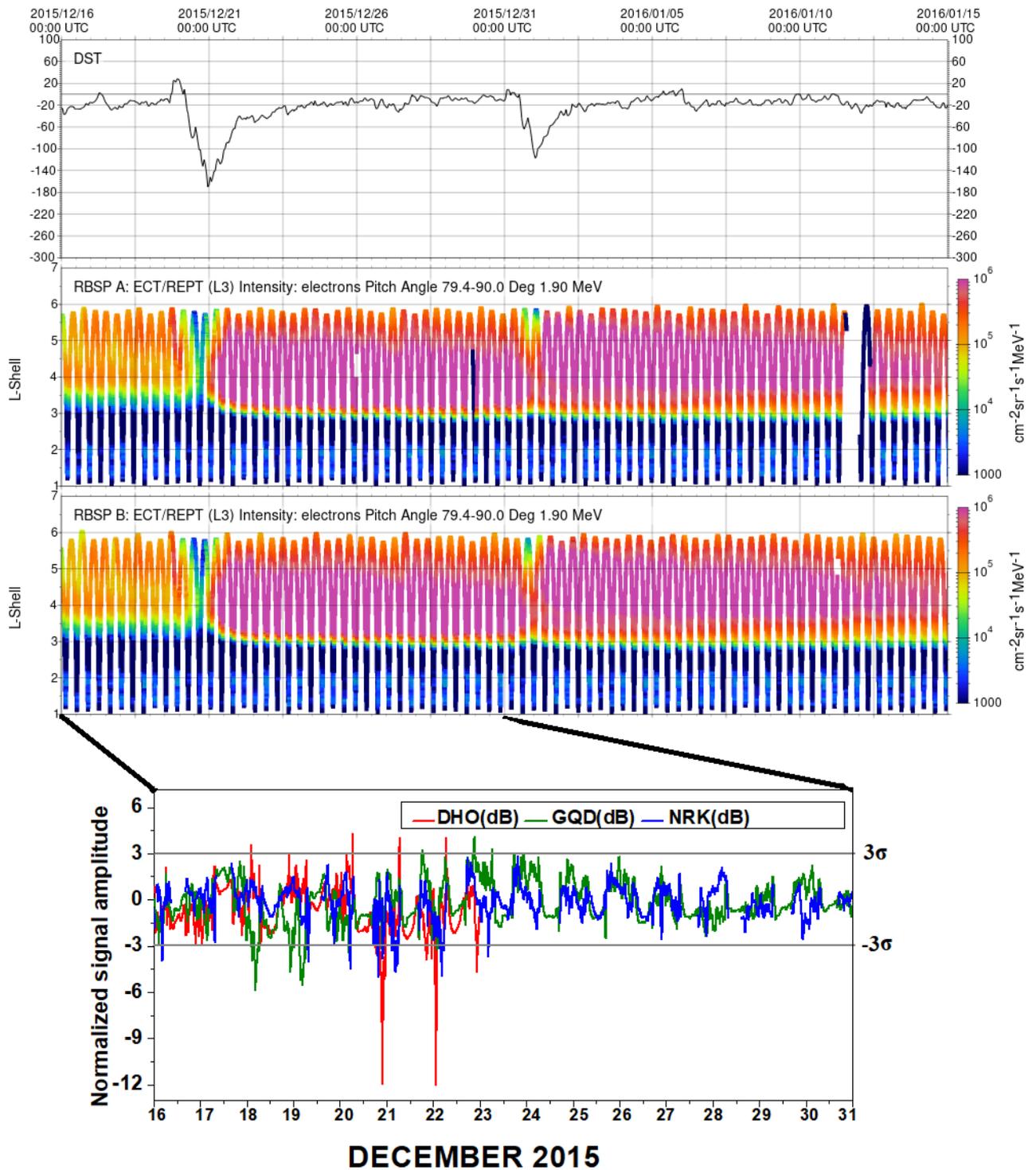


Figure 4.10 : Même présentation que la Figure 4.4 de Mars, mais pour l'événement de Décembre.

Chapitre 5 :

Résultats des évènements LEP et leur simulation

5 Résultats des évènements LEP et leur simulation

5.1 L'effet indirect des orages géomagnétiques sur la région D

5.1.1 Les évènements LEP

Le but de cette partie de l'analyse est de faire une étude statistique sur le deuxième type de perturbation des signaux VLF associés à l'activité géomagnétique. En effet, les électrons relativistes (appelés électrons primaires), piégés dans les ceintures de radiation suite à la pénétration de particules du CME dans la magnétosphère interne, peuvent précipiter dans l'ionosphère à basses altitudes et entrer en collision avec des espèces neutres produisant des électrons secondaires. Ces électrons secondaires sont les particules responsables de la perturbation du signal VLF. Le processus qui permet aux électrons primaires de traverser la barrière magnétique est l'interaction onde-particule chargée.

Comme ce processus de précipitation des électrons dépend fortement de l'énergie des électrons primaires, l'identification du type d'évènement LEP permet d'identifier la région dans laquelle ces électrons ont été piégés. Plusieurs travaux ont été réalisés pour caractériser les énergies des électrons précipitants, le type de mode d'interaction Onde-particules (Ducted, non-Ducted ou bien par réflexion magnétosphérique (MR)) et leur relation avec le courant de la foudre (*lightning peak current*) (Clilverd et al., 2004 ; Inan et al., 2010 ; Salut et al., 2013 et références ; Inan et al., 2007b ; Lauben et al., 1999 ; Peter et Inan, 2007).

Dans notre travail, nous avons utilisé les données de deux émetteurs VLF situés à la même latitude (GQD et DHO à 53.07°N) et un émetteur situé à une latitude élevée (NRK à 63.85°N). Cette étude nous permettra de voir l'étendue spatiale de la région de précipitation et donc de la zone perturbée de l'ionosphère. Les temps caractéristiques de chaque type d'évènement LEP sont donnés dans le Tableau 3.2 et une illustration sur la détermination de ces temps pour un évènement ducted est présentée dans la Figure 3.11. Le Δt désigne le temps entre la trace de l'éclair dans le signal VLF (*lightning sferic*) et le début de la perturbation de l'amplitude du signal. Ce temps correspond au temps de propagation de l'onde électromagnétique siffiante (*Whistler*) depuis la région de l'orage jusqu'à la ceinture de Van Allen puis son interaction avec l'électron au voisinage de l'équateur. Le second temps, t_d , est le temps nécessaire pour que la perturbation du signal atteigne son niveau maximal (ou minimal). Il correspond au temps nécessaire pour que les électrons énergétiques se précipitent

Chapitre 5 : Résultats des évènements LEP et leur simulation

plus bas dans l'atmosphère et produisent des électrons secondaires (Inan et al., 2010). La Figure 5.2 présente un exemple de perturbation LEP enregistrée dans le signal NRK.

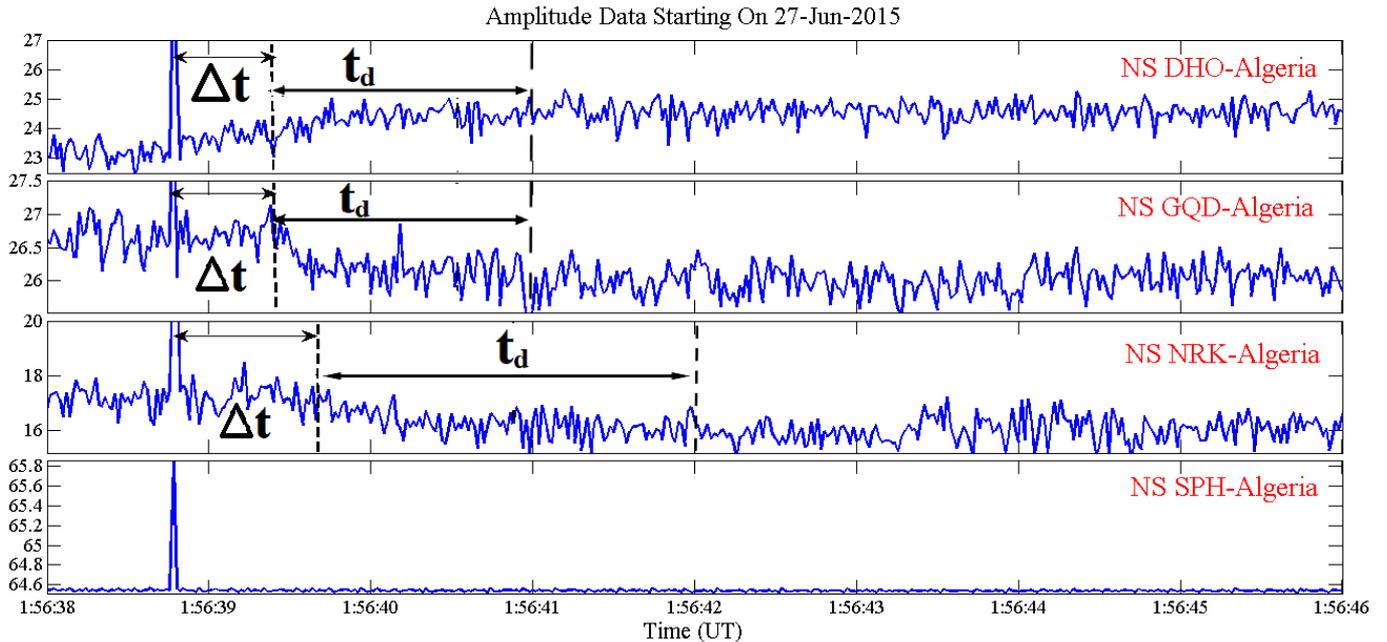


Figure 5.1 : Événement LEP observé le 27 Juin 2015 à 1:56:38.75 UT. Les quatre panneaux montrent l'amplitude du signal DHO, GQD, NRK et SPH respectivement.

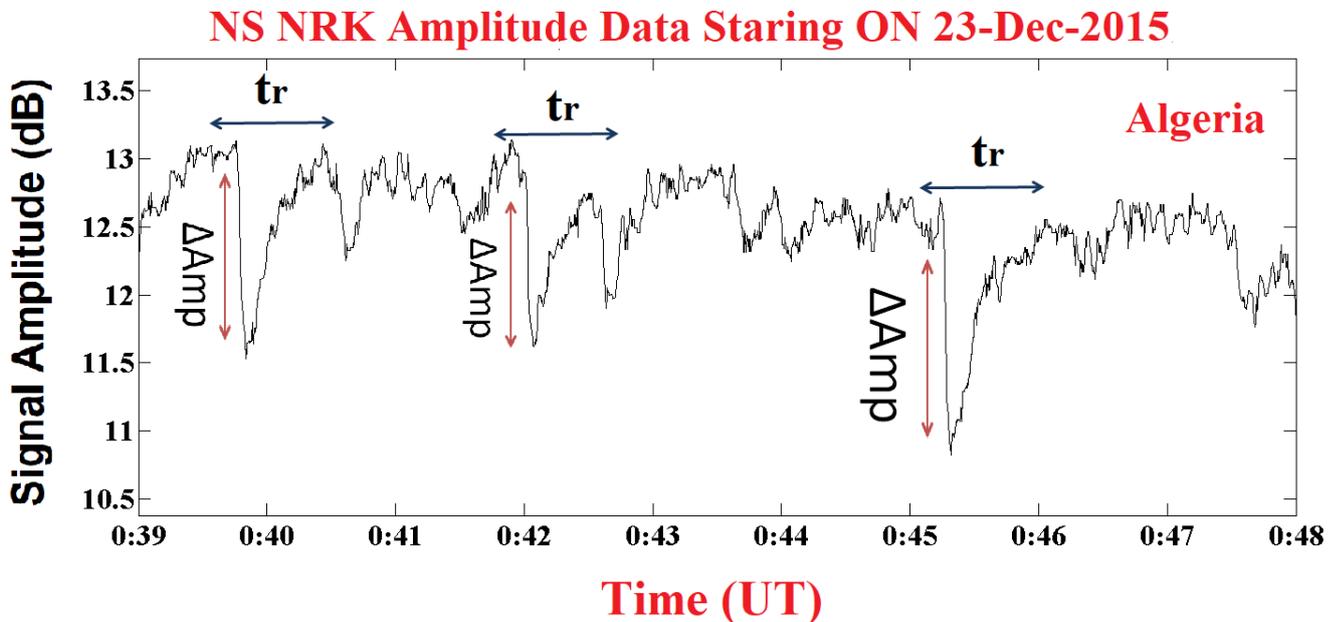


Figure 5.2 : Visualisation des perturbations de type LEP dans le signal de NRK le 22 Décembre 2015.

Chapitre 5 : Résultats des évènements LEP et leur simulation

Notre analyse a révélé qu'un total de 13 évènements LEP se sont produits sur chaque trajet VLF pendant la tempête de Mars, 7 évènements LEP pendant la tempête de Juin, et un total de 124 évènements LEP ont été observés sur le trajet NRK uniquement et associés à la tempête de Décembre. Le taux d'occurrence de chaque type d'évènement LEP est indiqué dans le Tableau 5.1. D'après ce Tableau, nous observons que les taux d'évènements LEP ducted et non-ducted sont les mêmes sur les chemins GQD et DHO. De plus, ces taux sont presque identiques pendant la forte tempête de Mars, alors que pendant la tempête de Juin les évènements LEP étaient principalement de type ducted. Pour la tempête géomagnétique de Décembre, aucun évènement LEP n'a été observé sur ces deux trajets VLF. Dans le cas du signal NRK, en plus des évènements ducted et non-ducted, une fraction des évènements MR ont également été observés en association avec les trois tempêtes et sont significatifs pendant la tempête de Mars. Les observations simultanées d'évènements LEP sur les signaux GQD et DHO impliquent que l'étendue spatiale de la zone perturbée de l'ionosphère était très grande puisque la distance entre les deux émetteurs est de 728 km, ce qui est en accord avec Clilverd et al. (2002).

Nous avons également observé que pour les trois tempêtes, les évènements LEP se sont produits après le jour du maximum de la perturbation géomagnétique, c'est-à-dire une semaine pour la tempête de Mars, quatre jours pour la tempête de Juin, tandis que pour la tempête de Décembre, ils n'ont été observés qu'un jour après la tempête. L'explication possible de ce retard est liée à l'activité orageuse à proximité du trajet VLF entre l'émetteur et le récepteur ou aux points conjugués. De même, l'observation des évènements LEP sur le trajet NRK-Alger uniquement pendant la tempête de Décembre peut s'expliquer par le fait que l'activité orageuse s'est produite au point conjugué du site NRK.

Chapitre 5 : Résultats des évènements LEP et leur simulation

Tableau 5.1: Taux d'occurrence des différents types d'évènements LEP sur les émetteurs NRK, DHO et GQD pour les trois tempêtes géomagnétiques : Mars, Juin et Décembre.

	NRK		
	DUCTED (%)	NON-DUCTED (%)	MAGNETOSPHERIC REFLEXION (MR) (%)
24-03-2015	0	100	0
27-06-2015	42.85	57.15	0
22-12-2015	0.81	6.45	0.81
23-12-2015	3.22	35.48	2.42
24-12-2015	/	43.55	7.26
Totale (Décembre)	4.03	85.48	10.49
	DHO		
	DUCTE (%)	NON-DUCTED (%)	MR (%)
24-03-2015	46.15	53.85	0
27-06-2015	85.71	14.29	0
22-12-2015	/	/	/
23-12-2015	/	/	/
24-12-2015	/	/	/
	GQD		
	DUCTE (%)	NON-DUCTED(%)	MR (%)
24-03-2015	46.15	53.85	0
27-06-2015	85.71	14.29	0
22-12-2015	/	/	/
23-12-2015	/	/	/
24-12-2015	/	/	/

5.1.2 Étude statistique des évènements LEP

Il est connu que le peuplement des ceintures de radiations est lié aux conditions dans le milieu interplanétaire et le vent solaire. Ces conditions sont fortement affectées par l'activité solaire, en particulier les CME, qui dépendent à leur tour de la présence de régions actives, ou taches solaires, sur le disque solaire. Cependant, les conditions dans le milieu interplanétaire sont donc liées au cycle d'activité solaire. À cette fin, nous avons réalisé une étude statistique sur le nombre d'évènements LEP observés depuis Janvier 2011 jusqu'en Décembre 2016. Les résultats de l'analyse ont révélé qu'un total de 436 évènements LEP se sont produits sur chaque chemin VLF (Tableau 5.2).

Ainsi, nous avons constaté que les précipitations électroniques présentent deux maximums : l'un en 2012 et l'autre en 2015. Dans les graphiques de la Figure 5.3 (a et b), nous avons présenté le nombre total d'évènements LEP et le nombre de taches solaires pendant la période comprise entre 2010 et 2016 (Figure 5.3-a), tandis que dans la Figure 5.3-b, nous avons représenté le même nombre d'évènements LEP avec la moyenne annuelle de l'indice Dst (en valeur absolue) pendant la même période. Le but de cette comparaison est de mieux clarifier la relation entre les événements LEP et l'activité solaire. Selon les graphiques de la Figure 5.3-a, les maximums des évènements LEP et des taches solaires ne coïncident pas où les maximums des évènements LEP sont décalés par rapport aux maximums des taches solaires.

Cette comparaison montre clairement que le nombre de taches solaires n'est pas un bon indicateur de l'importance ou non des perturbations géomagnétiques et donc de l'observation des LEP. Ceci s'explique par le fait que même si nous observons de fortes éruptions solaires lors du maximum d'activité et qui sont parfois accompagnées de CME, nous ne pouvons pas connaître avec précision l'orientation de la composante du champ magnétique B_z dans le nuage de plasma éjecté lors du CME. Dans le cas de la corrélation entre le nombre d'évènements LEP et l'indice Dst présentée à la Figure 5.3-b, il est clairement observable que les pics du maximum d'évènements LEP et du maximum de l'indice Dst coïncident. Cependant, la probabilité d'observer des évènements LEP est très élevée pendant les perturbations géomagnétiques caractérisées par une forte chute de l'indice Dst en dessous de -100 nT. Pour les perturbations géomagnétiques de Dst entre -100 nT et -50 nT peuvent produire des évènements LEP sauf que leur nombre est très faible.

Chapitre 5 : Résultats des évènements LEP et leur simulation

Tableau 5.2: Le nombre des différents types d'évènements LEP sur les émetteurs NRK, DHO et GQD de 2011 à 2016.

	NRK			GQD			DHO			Nombre totale des évènements
	Ducted	Non-Ducted	MR	Ducted	Non-Ducted	MR	Ducted	Non-Ducted	MR	
2011	2	0	0	6	0	0	1	0	0	7
2012	18	38	17	16	1	2	13	11	7	97
2013	2	1	0	0	1	0	5	9	2	20
2014	0	1	3	3	1	0	2	0	0	8
2015	28	162	13	37	9	0	31	22	3	274
2016	1	1	5	6	0	0	14	4	2	30

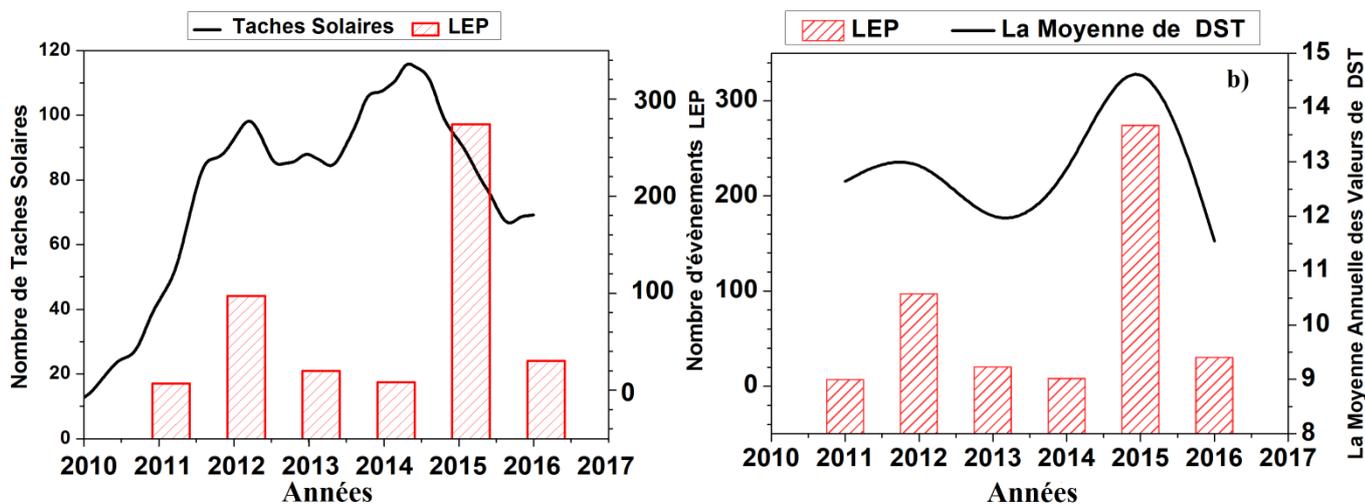


Figure 5.3 : a) Nombre total d'évènements LEP et nombre de taches solaires observées entre 2010 et 2016. b) Nombre total d'évènements LEP et moyenne annuelle de l'indice Dst observée pendant la même période.

5.1.3 Simulation d'évènement LEP au moyen du code LWPC

La détermination de la densité des électrons précipitant dans la région D de l'ionosphère est un défi majeur. En effet, l'estimation des taux d'ionisation à basses altitudes dues aux évènements LEP peut nous aider à comprendre le couplage entre la magnétosphère et l'ionosphère. Le VLF est l'une des nombreuses techniques de sondage de l'ionosphère utilisées pour la détermination de la densité électronique. La méthode d'analyse est basée sur l'utilisation du code LWPC pour simuler la propagation du signal VLF dans les guides d'ondes ambiants et perturbés en tenant compte de la géométrie de la région perturbée ainsi que de l'amplitude et de la phase de la perturbation. Dans les travaux précédents sur la simulation des évènements LEP, la forme et l'étendue spatiale de la région perturbée de l'ionosphère n'étaient pas clairement décrits. Dans notre cas, la forme et la taille de la perturbation ionosphérique sont considérées sur la base d'observations simultanées d'évènements LEP sur les trajets GQD et DHO vers Alger.

Le principe de la simulation avec le LWPC est de faire varier les paramètres de Wait (h' et β , voir chapitre 3) dans la région perturbée du trajet VLF jusqu'à ce que les valeurs simulées de l'amplitude et de la phase (ΔA_{sim} , ΔP_{sim}) se rapprochent de celles mesurées (ΔA_{mes} , ΔP_{mes}). Cependant, six évènements LEP (quatre ducted et deux non-ducted) ont été sélectionnés pour la simulation. Pour ce faire, nous avons supposé une perturbation de l'ionosphère de profile gaussien centré sur le lieu géographique de l'émetteur et revenant exponentiellement à son état ambiant dans la direction de propagation entre l'émetteur et le récepteur. Les résultats de la simulation de ces événements et les paramètres mesurés de la perturbation (amplitude et phase) sont présentés dans le Tableau 5.3.

Les profils de la densité électronique, de la hauteur de référence (h'), du facteur de forme (β), de l'amplitude et de la phase du signal en fonction de la distance obtenus par la simulation LWPC dans le cas d'évènements de type ducted sont présentés dans la Figure 5.4. D'après les graphiques, la hauteur de référence h' a diminué de sa valeur ambiante (87 km) à une altitude de 82.4 km. Comme h' , le facteur β a également diminué de sa valeur ambiante (0.43 km^{-1}) à environ 0.334 km^{-1} . Ces changements dans les paramètres de Wait ont entraîné des valeurs maximales de la densité électronique à 83 km de : 49.97 cm^{-3} pour l'évènement 1, 49.87 cm^{-3} pour l'évènement 2, 49.83 cm^{-3} pour l'évènement 3 et enfin 68.45 cm^{-3} pour l'évènement 4. Ces valeurs sont nettement supérieures à la densité critique nécessaire à la réflexion des ondes VLF (30.74 cm^{-3}), ce qui rend la hauteur de réflexion inférieure à 87 km. En s'éloignant de la

Chapitre 5 : Résultats des évènements LEP et leur simulation

région perturbée de l'ionosphère, la densité électronique et la hauteur de réflexion reviennent progressivement à leurs valeurs ambiantes. Il faut mentionner que ces simulations correspondent au temps du maximum de la perturbation.

Tableau 5.3: Les amplitudes et phases des perturbations mesurées et simulées du signal DHO dues aux évènements LEP.

Évènements	ΔA_{mes}	ΔA_{simu}	ΔP_{mes}	ΔP_{simu}	Time (UT)
Évènements ducted					
Évènement 1	1.11	1.24	2	1.91	2:57:52.95
Évènement 2	2.01	1.66	3.63	3.15	2:36:56.14
Évènement 3	1.23	1.55	4.9	4.63	3:25:39.82
Évènement 4	2.08	2.22	7.3	7.4	3:22:36.8
Évènements Non-ducted					
Évènement 1	1.21	1.74	2.3	2,9	2:45:25.27
Évènement 2	0.33	0.90	2.5	3.05	1:30:48.38

Dans les deux derniers graphiques de la Figure 5.4, nous avons présenté l'amplitude et la phase du signal obtenues par la simulation LWPC dans les cas ambiant et perturbé. Il est bien observé que la forme du signal mesuré par un récepteur situé à une distance R de l'émetteur change d'un endroit à l'autre. Effectivement, le signal perturbé est parfois supérieur au signal ambiant et parfois inférieur, ce qui conduit à une valeur positive ou négative de la perturbation respectivement. Cette situation a été expliquée par la structure modale du signal enregistré au niveau du récepteur qui est composé de parties passant par la zone perturbée et d'autres qui ne voient pas la perturbation comme c'est le cas pour l'onde directe. Une autre observation que nous pouvons tirer de la simulation est que la position du maximum d'interférence (Fading, F) se déplace vers l'émetteur et que ce déplacement est très important dans le cas d'une perturbation étendue dans l'espace.

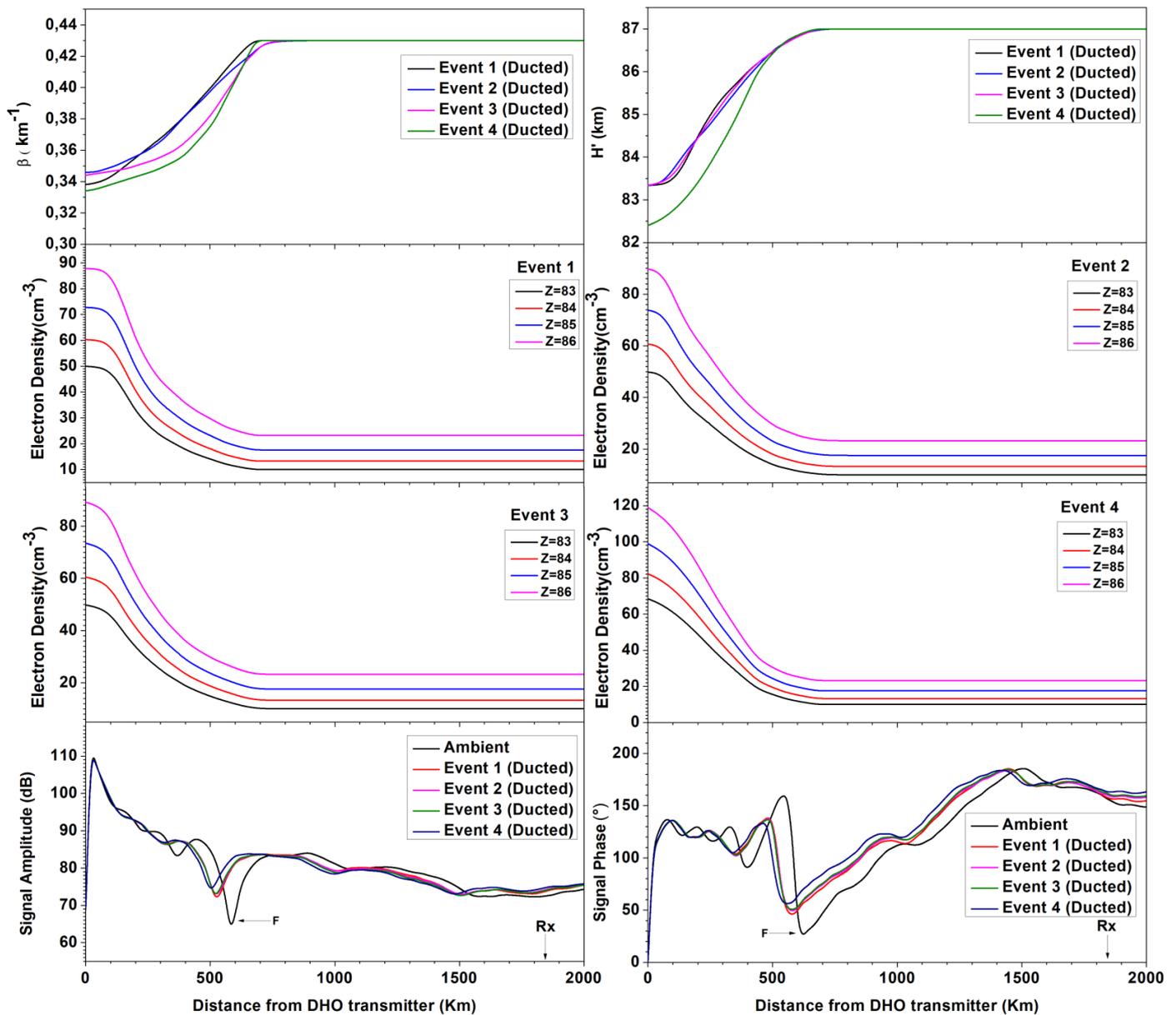


Figure 5.4 : Panneaux supérieurs : Les facteurs β (à gauche) et h' (à droite). Panneaux du milieu : La densité électronique des quatre évènements ducted à différentes altitudes. Panneaux inférieurs : L'amplitude du signal VLF simulé (à gauche) et la phase (à droite). L'axe des x indique la distance par rapport à l'émetteur. Ici, Rx et F font référence à l'emplacement du récepteur de Boumerdes et à la position du silence (Fading), respectivement.

Chapitre 5 : Résultats des évènements LEP et leur simulation

La même simulation a été effectuée pour les évènements non-ducted où les résultats obtenus sont présentés dans la Figure 5.5. D'après ces graphiques, nous avons observé que la hauteur de référence h' a diminué de sa valeur normale (87 km) à 80.26 km tandis que le facteur β a diminué de sa valeur normale (0.43 km^{-1}) à 0.307 km^{-1} . Ces changements dans le guide d'ondes ont induit une variation de la densité électronique de 129.80 cm^{-3} pour l'évènement 1 et de 90.60 cm^{-3} pour l'évènement 2 mesurées à 83 km. A cet effet, la réflexion du signal VLF s'est produite à basse altitude. En ce qui concerne l'amplitude et la phase du signal, le même comportement que pour les évènements ducted (Figure 5.4) est observé dans le cas d'évènements non-ducted.

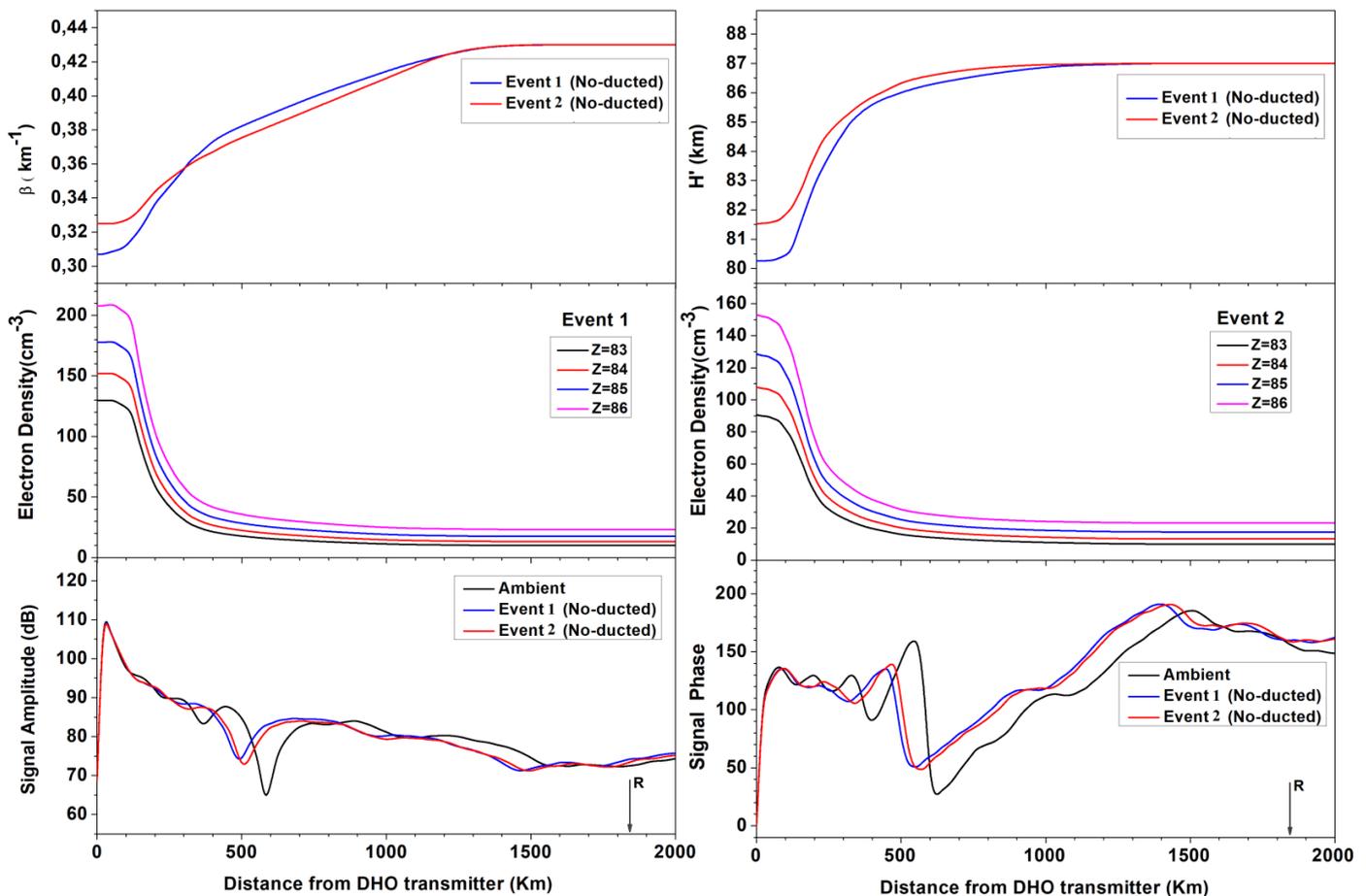


Figure 5.5 : Même légende que la figure 5.4 sauf qu'il s'agit ici d'évènements non-ducted.

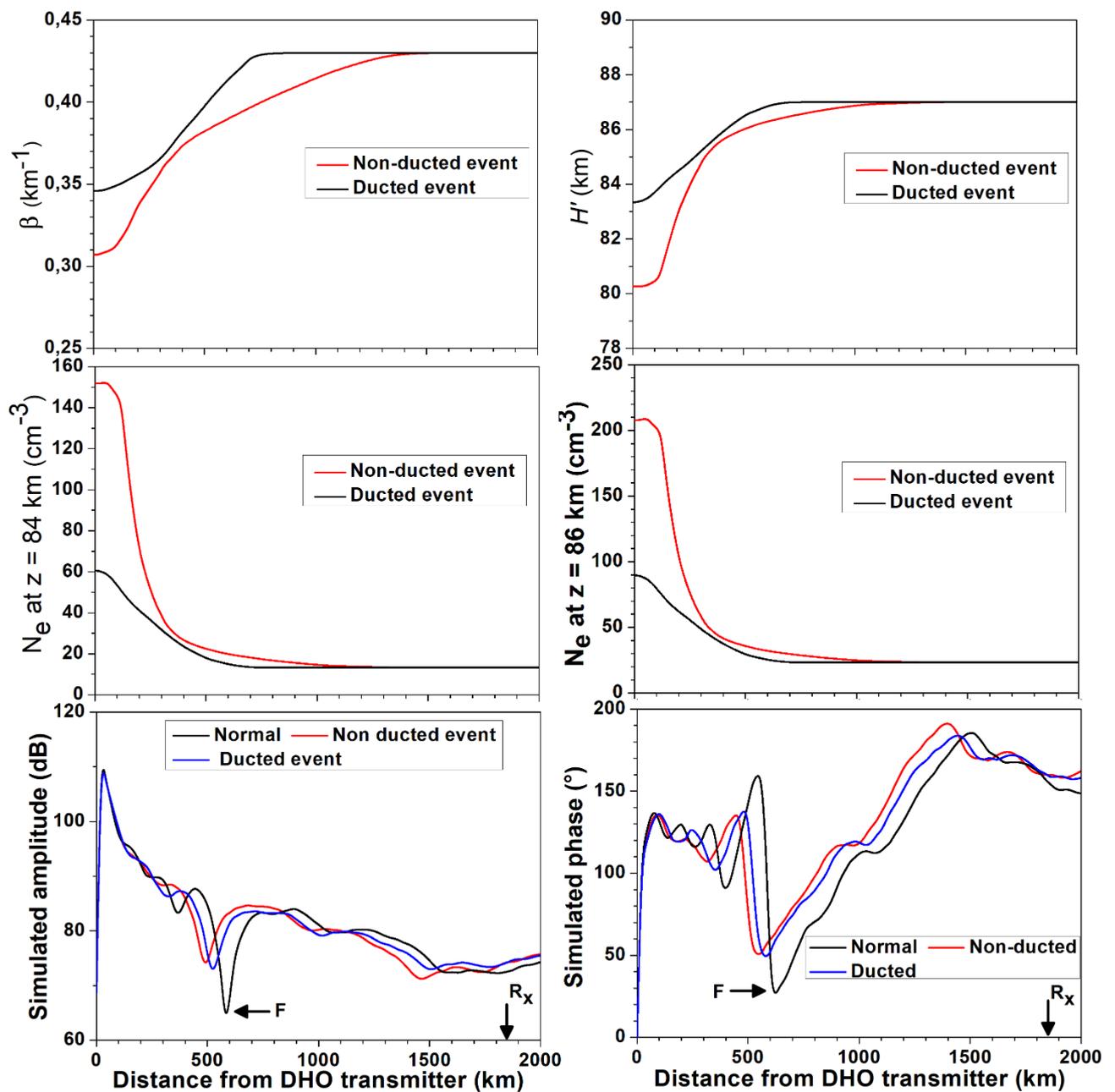


Figure 5.6 : Comparaison entre les résultats de la simulation d'un évènement ducted et un évènement non-ducted. La légende est la même que celle de la figure 5.4. (Crédit image : Kerrache et al., 2021).

Chapitre 5 : Résultats des évènements LEP et leur simulation

La Figure 5.6 présente les résultats de la simulation d'un évènement ducted et un évènement non-ducted. D'après ces graphiques, la perturbation de type non-ducted modifie l'ionosphère beaucoup plus que l'évènement ducted. La raison pour laquelle les évènements non-ducted perturbent une large zone de l'ionosphère est que l'onde de sifflement (*Whistler*) se propage obliquement et ne suit pas les lignes de champ magnétique de la Terre. Ces modes de propagation ne sont pas contraints de suivre le champ magnétique terrestre mais suivent une trajectoire déterminée par leur fréquence et l'indice de réfraction de la sphère plasma. Cependant, la réflexion de ce type d'onde ne peut avoir lieu que si la fréquence de l'onde *Whistler* est égale à la fréquence de résonance hybride inférieure comme illustré dans la figure 5.7 (Green and Inan., 2006). Ainsi, une grande région de la sphère plasma (*plasmaphere*) interagit avec l'onde *Whistler* permettant à une large population d'électrons relativistes de précipiter à basses altitudes. Figure 5.7.

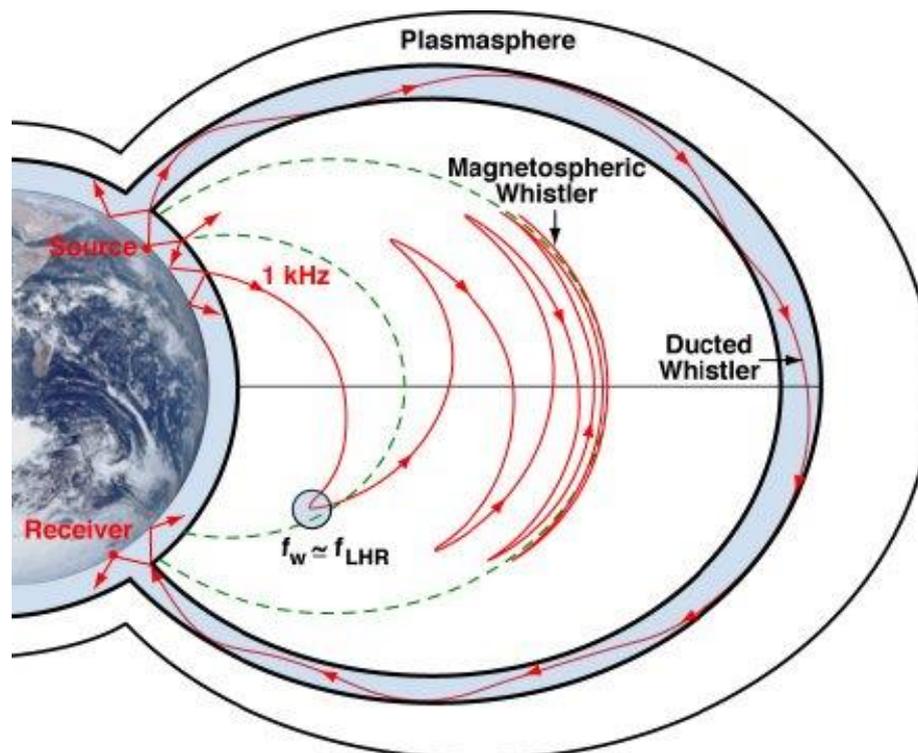


Figure 5.7 : Les chemins de propagation des ondes ducted et non ducted. Les ondes du mode siffleur (*whistler*) non ducted se réfléchissent lorsque la fréquence de l'onde, f_w , est approximativement égale à la fréquence de résonance hybride inférieure locale, f_{LHR} .

(Crédit image : Green and Inan., 2006).

Conclusion générale

Conclusion générale

Cette étude a regroupé quelques aspects sur l'effet des tempêtes géomagnétiques sur la Terre. En effet, dans le cas où la composante B_z du champ magnétique interplanétaire (IMF) est orientée vers le sud (négative), une reconnexion magnétique peut avoir lieu entre les lignes du champ interplanétaire IMF et les lignes du champ magnétique de la Terre. Cette configuration permet aux particules du vent solaire de pénétrer dans la magnétosphère et de se précipiter ensuite dans l'atmosphère terrestre. Après avoir sélectionné les événements géomagnétiques les plus intenses, nous avons traité les signaux VLF de trois émetteurs situés dans les régions de différentes latitudes (un émetteur en haute latitude et deux à moyenne latitude). La méthode de traitement est basée sur la détermination des amplitudes moyennes des jours calmes et de leur déviation standard à chaque instant, puis de soustraire l'amplitude moyenne de celle des jours perturbés. De cette manière, nous avons pu montrer l'effet des perturbations géomagnétiques sur les ondes VLF et l'ionosphère.

En premier lieu, nous avons analysé l'effet direct des courants alignés au champ magnétique de la Terre (*Field Aligned Current*, FAC). Les résultats montrent que l'effet des FAC se manifeste par des perturbations du signal VLF caractérisées par une augmentation de l'amplitude du signal au-dessus de $|3\sigma|$. Cet effet est plus apparent la nuit que le jour. De plus, lors de la tempête de Mars, l'effet était plus significatif pendant le coucher du soleil (ou *sunset*) du 24 Mars où, dans le cas du signal NRK, il a complètement disparu. En outre, après le 26 Mars, l'amplitude du signal de tous les émetteurs a montré un comportement anormal caractérisé par une nette atténuation du signal pendant la journée. Cela est dû au fait que la tempête du mois de Mars a été la plus forte parmi toutes les tempêtes considérées et qu'elle a affecté l'ionosphère de manière sévère pendant plusieurs jours (Kumar et Kumar, 2019).

Après la deuxième partie de l'analyse, nos résultats montrent que la précipitation d'électrons énergétiques (ou LEP) est très importante lors de fortes perturbations géomagnétiques. Selon la latitude, le type d'évènement LEP change : il est ducted et non-ducted pour les émetteurs des latitudes moyennes (DHO et GQD), tandis que dans le cas de l'émetteur des hautes latitudes, NRK, un autre type de précipitation électronique apparaît, appelé réflexion magnétosphérique (*magnetospheric reflection*, MR). Selon nos résultats, l'observation

Conclusion générale

simultanée d'évènements LEP dans les signaux de DHO et GQD montre que la région perturbée de l'ionosphère peut atteindre des distances supérieures à 728 km qui est la distance qui sépare l'émetteur DHO de l'émetteur GQD.

Dans une étude statistique sur le nombre d'évènements LEP enregistrés entre 2011 et 2016, nous avons également montré que la précipitation d'électrons énergétiques est mieux corrélée avec l'indice Dst qu'avec le nombre de taches solaires. Ceci est dû au fait que de fortes perturbations géomagnétiques peuvent se produire pendant la phase ascendante ou descendante du cycle d'activité solaire. En effet, les facteurs importants qui décident de la sévérité de la perturbation géomagnétique sont, (i) la localisation géographique de la région active sur le disque solaire, (ii) l'intensité du champ magnétique B_z et (iii) son orientation (positive ou négative). Ainsi, une région active regroupant ces trois paramètres peut probablement être à l'origine de fortes perturbations géomagnétiques même si elle apparaît pendant la période calme du Soleil.

La simulation de deux types d'évènements LEP (ducted, non-ducted) a montré que les paramètres de Wait (h' et β) changent en raison de l'augmentation de l'ionisation à basses altitudes suite aux collisions entre les électrons énergétiques et les espèces neutres de l'atmosphère. Ces changements provoquent une augmentation significative de la densité des électrons et la diminution de la hauteur de réflexion des signaux VLF. Les résultats de la simulation ont également révélé que la perturbation de type non-ducted modifie l'ionosphère beaucoup plus que l'évènement ducted. La raison pour laquelle les évènements non-ducted perturbent une large zone de l'ionosphère est que l'onde de Whistler se propage obliquement dans la magnétosphère et ne suit pas les lignes du champ magnétique terrestre (W. B. Peter et U. S. Inan, 2004). Dans cette situation, une grande région de la sphère plasma (plasma-sphere) interagit avec l'onde Whistler permettant à une grande population d'électrons énergétiques de précipiter à basse altitude.

Annexe : Publication

Ionospheric D Region Disturbances due to FAC and LEP Associated With Three Severe Geomagnetic Storms as Observed by VLF Signals

F. Kerrache¹ , S. Nait Amor² , and S. Kumar³ 

Key Points:

- Ionospheric disturbances due to geomagnetic storms observed on the very low frequency (VLF) signal
- The field aligned currents effect was clearly evident on the VLF signal amplitude
- Three kinds of lightning-induced electron precipitation events were observed. Their rates of observation depend on the storm intensity and possibly season

Correspondence to:

F. Kerrache,
fethia.kerrache@univ-dbkm.dz

Citation:

Kerrache, F., Nait Amor, S., & Kumar, S. (2021). Ionospheric D region disturbances due to FAC and LEP associated with three severe geomagnetic storms as observed by VLF signals. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 126, e2020JA027838. <https://doi.org/10.1029/2020JA027838>

Received 29 JAN 2020
Accepted 18 JAN 2021

¹Laboratory of Energy and Smart Systems, Faculty of Science and Technology, The University Djilali Bounaama of Khemis Miliana, AIN Defla, Algeria, ²Solar Division, Center for Research in Astronomy Astrophysics and Geophysics (CRAAG), Bouzareah, Algeria, ³School of Information Technology, Engineering, Mathematics and Physics, The University of the South Pacific, Suva, Fiji

Abstract The effects of one super and two intense storms on three European very low frequency (VLF) transmitter signals received at Algiers (Algeria) station, are presented. Two VLF transmitters (DHO and GQD) are located almost at the same mid-latitude and third transmitter (NRK) at a high latitude, allowing us to study the latitudinal dependence of the storm effect on the VLF propagation. Two kind of ionospheric disturbances were considered: Direct effect of the field aligned currents (FACs) and the second concerning with the lightning-induced electron precipitation (LEP) events. The FACs effect was clearly evident on the recorded signal amplitude during the daytime and nighttime. Our analysis of the short-duration VLF perturbations due to LEP events showed that the ducted and non-ducted LEPs are the majority of VLF perturbations and a small fraction of LEP events was associated with magnetospherically reflected waves on the high latitude transmitter path (NRK–Algiers). The coincident observation of LEP on the mid-latitude transmitters (DHO and GQD) signals implies that the disturbance was large as much as the distance between the two transmitters (728 km). The modeling using Long-Wave Propagation Capability (LWPC) code of LEP associated VLF perturbations considering Gaussian distribution of electron density enhancements, showed a decrease in the *D*-region reference height from its usual value 87 km to 83.3 km for ducted LEP and 80.3 km for non-ducted LEP event and that the non-ducted event exhibited a wider disturbed region.

Plain Language Summary Geomagnetic storms are associated with space weather due to a strong interaction between the solar wind and the earth's magnetic field. They can cause serious damages to the ground and satellite-based telecommunication, the positioning by GNSS, and other ground-based technological systems. Several types of sounding techniques are deployed to better understand the response of the Earth's environment to the geomagnetic storms. Among those, the very low frequency (VLF) radio waves technique is the most cost effecting to study the effect of magnetic storms on the *D*-region ionosphere on the largest temporal and spatial scales. The work performed here addresses the spatial variation of the effect of intense geomagnetic storms on the *D*-region ionosphere using data from VLF transmitters located at mid- and high-latitude locations. In addition, the work also allows making the link between the magnetic storms and the precipitation of energetic electrons of the Van Allen belt to lower altitudes and producing short-term VLF perturbations.

1. Introduction

Geomagnetic storms are a consequence of changes in the magnetospheric conditions due to solar wind and southward turning of interplanetary magnetic field (IMF) B_z component for a substantial length of time (longer than 3 h) (Gonzalez et al., 1994; Gonzalez & Tsurutani, 1987) which affect mainly the high-latitude ionosphere with their effects propagating toward the lower latitudes. Geomagnetic storms apart from affecting the ionosphere can severely affect ground power grids, satellite-based technological and high-frequency communications systems. Effectively, the variations in the upper ionosphere due to geomagnetic storms are determined by the total electron content (Kuai et al., 2016) and by the critical frequency of the F2 layer which is directly related to the maximum electron density of the F2-region (S. Kumar & Kumar, 2019; V. V. Kumar & Parkinson, 2017).

The very low frequency (VLF: 3–30 kHz) electromagnetic waves propagate within the naturally formed spherical waveguide between the Earth and the lower ionosphere (*D* region) known as Earth-ionosphere waveguide

(EIWG). VLF propagation from navigational transmitters in the EIWG between the transmitter-receiver great circle path (GCP) is very sensitive to the D -region conditions. Therefore, any variation in the D -region ionosphere appears as perturbation in the recorded VLF signal (amplitude and/or phase). Several sources of VLF signal perturbations include solar flares (A. Kumar & Kumar, 2014), solar eclipse (Cohen et al., 2018), earthquakes (Hayakawa et al., 2011), tsunami (Rozhnoi et al., 2012), sprites (e.g., NaitAmor et al., 2010; Salut et al., 2012, 2013).

The effects of geomagnetic storms on the amplitude and phase of VLF signals and the estimation of D -region disturbance have also been studied by some researchers (Choudhury et al., 2015; S. Kumar et al., 2015; Maurya et al., 2018; Nawanko et al., 2016). The most important signature of geomagnetic storm on the high and mid latitude ionosphere is the precipitation of energetic electrons (Clilverd et al., 2008). In this study, we present the effect of three major geomagnetic storms of solar cycle 24 on the VLF propagation from three European navigational transmitter signals (NRK, GQD, and DHO) to Algiers receiver (Algeria) that includes the direct effect of the FACs and lightning-induced electron precipitation (LEP) events and connect them with the geomagnetic storm intensity and season. In Section 2, we describe the data and methodology of our analysis. The Section 3 gives the results separated in five subsections according to the event date of which the last part presents the results of electron precipitation analysis by modeling of VLF perturbations using Long Wave Propagation Capability (LWPC) code. Finally, we summarize and conclude our results.

2. Data and Methodology

The locations of three European VLF transmitters with their call signs NRK (63.85°N, 22.46°W, 37.5 kHz), GQD (52.91°N, 3.28°W, 19.6 kHz) and DHO (53.07°N, 7.61°E, 23 kHz) and along with Algiers VLF receiver are shown in the top panel of Figure 1. More information about the receiver can be found in a paper by Cohen et al. (2010). Here we used high resolution (50 Hz) data to show the effect of the FAC disturbances and LEP events. The z -component of the interplanetary magnetic field IMF B_z , the Dst index and Aurora electrojet (AE) index values for each storm were obtained from Coordinated Data Analysis Web (<https://cdaweb.sci.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/eval2.cgi>). First, we identified the starting day of each geomagnetic storm and then selected the undisturbed day (or quiet day) before the storm when the Dst index was at low level (i.e., $Dst \geq -5$ nT and $AE \leq 300$ nT). Second, we have removed the signal data for the duration of solar flare associated perturbations, lightning sferics, early VLF events and duration when any transmitter was off the air. We have then determined the mean signal amplitude referred as A_{normal} and the standard deviation σ at each sampling. We define a signal perturbation when the perturbed signal amplitude exceeds $|3\sigma|$ from the mean signal level as described by (S. Kumar et al., 2017). Since the energetic particles population of the magnetosphere is higher during the geomagnetic storms, the LEP study allows us to identify each kind of LEP events associated geomagnetic storm, their spatial extent since two transmitters are located at the same latitude with a separating distance of 728 km. First, we found out the time delay between the lightning sferic and the onset time of the signal perturbations (known as onset delay) then we determined the time in which the perturbation reached its maximum (known as onset duration) to determine the L-shell origin of each LEP event. Based on these two observations, three kinds of LEP events were identified which are: ducted, non-ducted, and magnetospheric reflected (MR). In further work and by the use of the LWPC code, we simulated the perturbed VLF signal amplitude and phase to determine the modifications in the D -region electron density due to LEP events.

3. Results and Discussion

We present results of three signals (DHO, GQD, and NRK) amplitude perturbations due to three major geomagnetic storms observed in the year 2015 with $Dst \leq -150$ nT. These include the St. Patrick's day storm of March 17–18, June 23–24 storm, and the December 21–23 storm.

3.1. St Patrick's Day Super Storm: March 17–18, 2015

On March 15, 2015, a sunspot number 2297, which was a source of many moderate M-class and one X-class flares produced a long duration C9 solar flare class with maximum intensity at 01:48 Universal Time (UT). This flare was followed by a halo coronal mass ejection (CME) as reported in SOHO-LASCO catalog (<https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CMElist/>). Several researchers have studied the interplanetary parameters associated with this storm (Alberti et al., 2017; Verkhoglyadova et al., 2016). This storm was associated with the strong southward

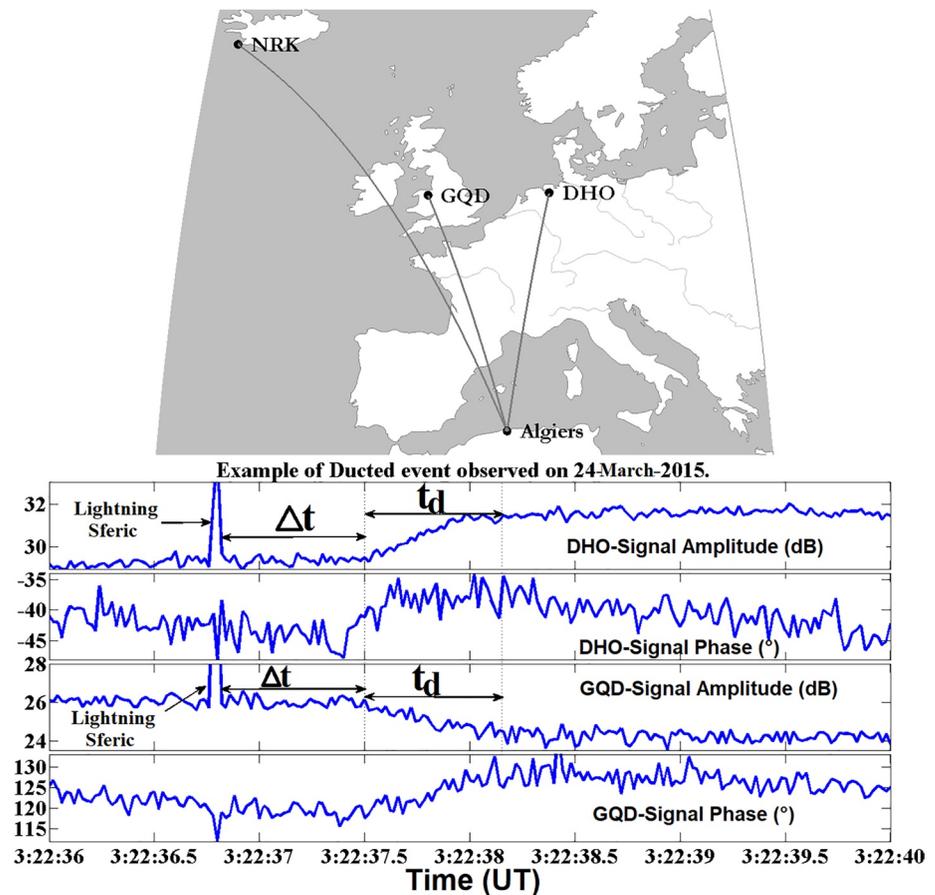


Figure 1. Top panel: Map showing the geographic locations of the transmitters (NRK, GQD, and DHO), Algiers receiver and transmitter-receiver Great Circle Paths (GCP) used for the data analysis. Bottom panel: Method of LEP kind identification, this case concerns ducted LEP event. GCP, Great Circle Paths; LEP, lightning-induced electron precipitation.

turning of the IMF B_z with intensity of -24 nT recorded on March 17 at 14:30 UT. These conditions produced this super storm with a minimum Dst index of -222 nT at 23 UT on March 17 and AE index of 2000 nT at 02 UT, which was the largest storm of solar cycle 24.

The response of the VLF signal amplitudes to this ionospheric storm is plotted in the Figure 2. During quiet day (here March 13), the only important signatures are those due to sunrise (SR), sunset (SS) transitions and period when the transmitter was off the air. Under disturbed conditions, due to FACs the VLF signals amplitude starts to show anomalies during daytime and nighttime. For example, on March 19 the signal amplitude showed anomalies above 3σ both during daytime and nighttime. Indeed, in the case of NRK signal in addition to the periods when the anomalies exceeded 3σ , the transmitter went low to a level of almost off the air several times. Another interesting observation is the shape of the signal amplitude during the sunset transition between March 19 and 20 for the three transmitters. Effectively, in the case of DHO signal amplitude at the SS time it was increased by 2.5 dB compared to the ambient SS transition. Additionally, a sharp increase of the signal amplitude by 1.5 dB was observed at 19:34 UT even if it was inside

$\pm 3\sigma$ followed by a decrease at the end of the day. In the case of GQD and NRK pattern of signal amplitudes variation during SS transition between March 19 and 20 got distorted and that the signal amplitude was below -3σ in the case of GQD transmitter and above 3σ in the case of NRK transmitter. During March 20, only nighttime anomalies were observed in the case of DHO and GQD transmitters but for the NRK transmitter the anomalies were observed in the daytime and that the signal variation was more apparent at the nighttime. This is a direct effect of the geomagnetic storm on the ionosphere since it appeared during the storm maximum. We also observed that the daytime signal amplitude between March 24 and 30 decreased compared to the ambient day

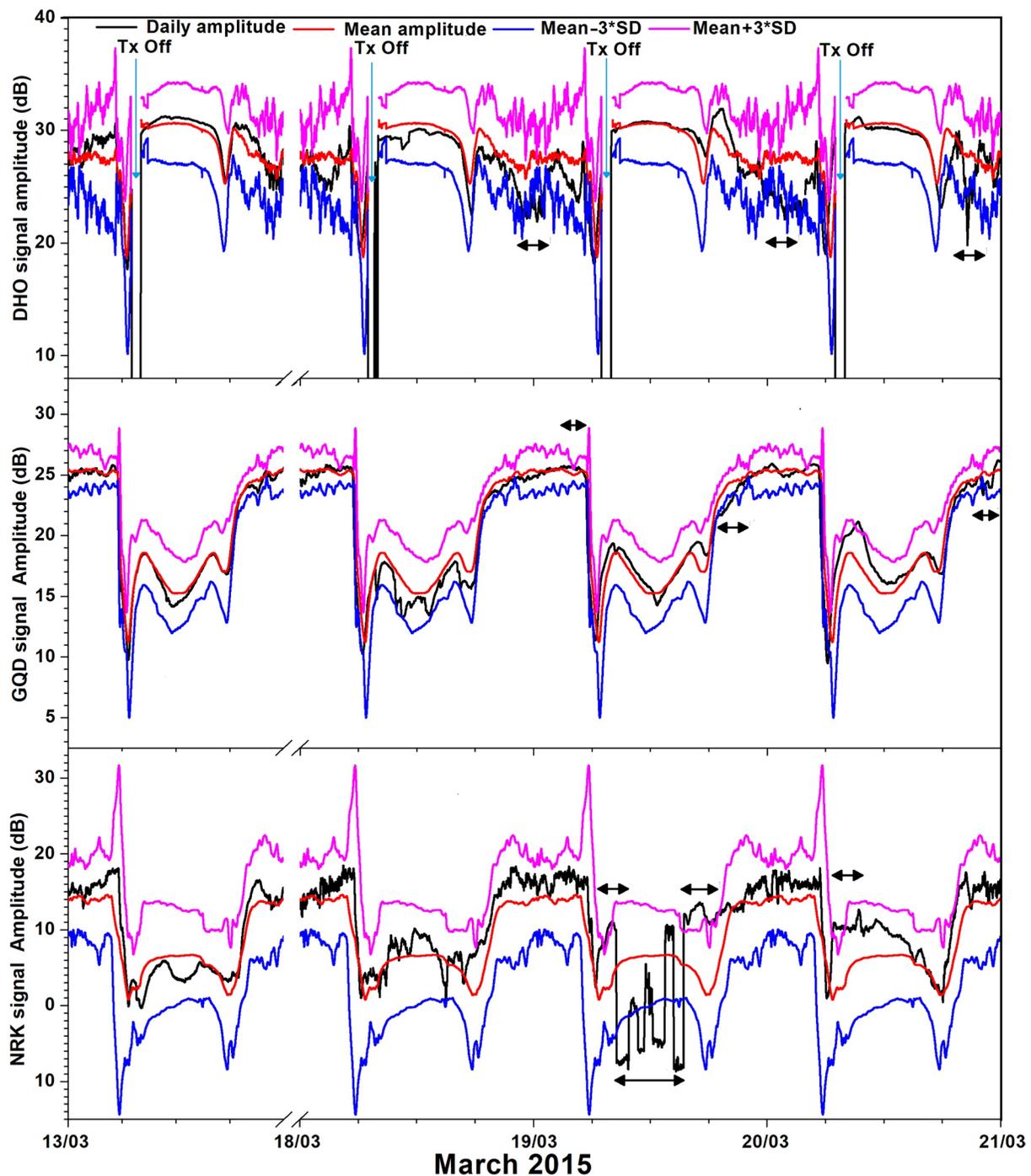


Figure 2. Daily variation of the signal amplitude of all transmitters (DHO, GQD, and NRK) during the March 2015 storm. Black double arrows show the periods when the anomalies were recorded, blue arrows show the periods when the transmitters were off.

even if the Dst index was above -40 nT. Indeed, in Figure 3 we present the signal amplitude of all transmitters between March 24 to April 01 at 00:00:00 UT against the ambient day. From the plot the daytime signal amplitude level decreased remarkably by March 26 and then recovered to normal level at the end of the month. This is due to the persistence of the disturbance which continued to buffer the ionosphere by energetic particles and as a consequence the *D*-region attenuation remained at its high level. Such storm after-effects have been attributed to enhanced production of nitric oxide (NO) caused by particle precipitation followed by downward transport (e.g.,

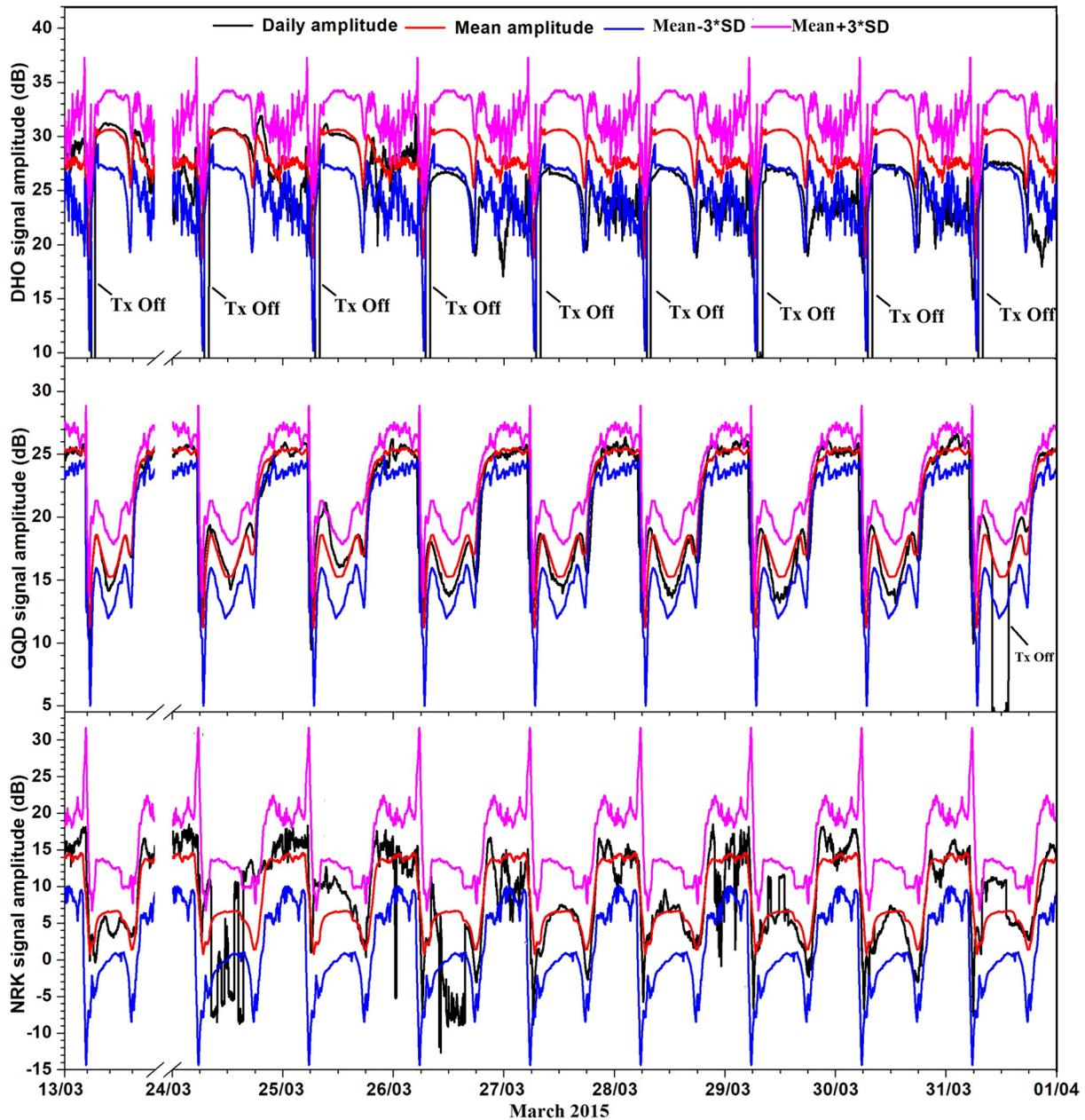


Figure 3. Daily variation of the signal amplitude of all transmitters (DHO, GQD, and NRK) during the end of March 2015. Black lines show the periods when the transmitters were off.

Dickinson et al., 1978) and spread to lower latitudes (Torkar et al., 1980). This scenario was recently confirmed by satellite-borne NO data Kirkwood et al. (2015).

3.2. Intense Storm of June 22–24, 2015

This storm was second largest geomagnetic storm of the solar cycle 24 after the March 17–18 storm in 2015. It was associated with two CMEs that hit the Earth environment on June 22 (S. Kumar & Kumar, 2019). The IMF B_z sharply varied between positive (northward) and negative (southward) values. The first CME encounter produced a minor geomagnetic storm with Dst index of -50 nT. At the arrival of the second CME, the IMF B_z component oscillated strongly between positive (northward) and negative (southward) values and produced this intense geomagnetic storm with minimum Dst value of -195 nT and AE index of 2250 nT at 06 UT on June 23.

The signal amplitude variation of the three VLF signals is presented in Figure 4 starting on June 19 at 00:00:00 UT to June 25 at 00:00:00 UT with a break between June 20 at 00:00:00 UT to June 23 at 00:00:00 UT. The daily variations of the normalized amplitude of three VLF signals were within 3σ till the nighttime of June 22. During the second step decrease in Dst index to a minimum value of -195 nT and maximum AE index of 2250 nT, the strong signals anomalies occurred during June 23–25 mainly on GQD and NRK signals. The anomalies were more frequent during nighttime on GQD transmitter signal. On NRK signal, similar to the March storm, the anomalies were also observed during the daytime. This difference may be due to the geographic location of the transmitters. As stated before, NRK is a high latitude transmitter so the segment of the GCP near to the transmitter is highly affected by particles from space unlike the mid-latitude DHO and GQD transmitters where only intense geomagnetic storm can affect the propagation path. In addition to the overall behavior of the signal amplitude at nighttime and daytime, the NRK signal amplitude showed considerable perturbations recorded on June 24 at 17:02:40 and 17:43:50 of 3.5 and 2.3 dB, respectively, see the zoomed region in Figure 4. The same events were also recorded on GQD and DHO signals but the corresponding amplitudes are less than the perturbation amplitude consideration limit (i.e., 0.2 dB).

3.3. Intense Storm of December 20–21, 2015

The storm of December 20–21, 2015 with a minimum Dst index of -150 nT and maximum AE index of 2250 nT occurred due to the passage of a coronal mass ejection on December 20 and was associated with a long period of southward IMF B_z . The quiet day reference of this storm is the December 4 where the Dst index ranged between -4 and 4 nT. In the plots of Figure 5 we show the daily variation of the signal amplitudes from December 4 to December 22 with a break between December 5 at 00:00:00 UT and December 20 at 00:00:00 UT.

From the plots, the first observation concerns the daytime signal amplitude where the amplitude level decreased during the storm development on December 20 at around 06:00:00 UT and continued till the recovery phase of the storm even if the amplitude was within $\pm 3\sigma$. During nighttime, the effect of this intense storm was clearly evident where a sharp decrease in the DHO signal amplitude of -12 dB was recorded during the storm main phase. For the other transmitters (GQD and NRK), the signal anomalies were also recorded at the same time as for DHO transmitter but with weaker intensity.

To summarize the direct effect of the geomagnetic storm on the D -region of the ionosphere under the FACs particle precipitations, our results revealed that the anomalies are recorded both daytime and nighttime and that the high latitude transmitter signal amplitude (NRK) is highly affected as compared to mid latitude transmitter signals. We also observed that the FACs effect is more important during nighttime than daytime due to the sunlight ionization and heating efficiencies which can overcome the ionization by FACs particles collisions with neutrals at low altitudes. This can be seen by comparing the perturbation of the signal amplitudes due to December storm with the June storm recorded on the NRK signal. Effectively, even if the June storm was stronger than the December storm, the FACs effect was more important during the December storm which is due to the seasonal effect on the ionospheric properties characterized by the ionization and heating mechanisms.

3.4. LEP Events

The goal of this part of the analysis is to characterize the second kind of particle precipitations to the ionosphere associated with the geomagnetic storms. Indeed, the Van Allen belts get populated by charged particles during geomagnetic storms depending on the storm intensity. Since electron precipitation is highly dependent on the processes of wave-particle interaction and particle energies, identifying the kind of LEP events allows us to understand the coupling between the whistler waves and trapped electrons. The physical mechanism of the energetic electrons from the Van Allen belts to precipitate down to the atmosphere is described by Inan et al. (2010). Several works have been carried out to characterize the precipitating electron energies, the type of whistler mode (ducted, non-ducted or magneto-spherically reflected (MR)) and their relation with lightning peak current (Clilverd et al., 2004; Inan et al., 2010; Salut et al., 2013 and references therein). Since we used data of two VLF transmitters located almost at the same mid-latitude and one transmitter located at a high latitude, we separate the LEP events according to their type as their occurrence is latitude dependent. The time scales of each type of events are given in the Table 1 (Johnson et al., 1999). An illustration of the determination of each time in the case of ducted LEP is given in Figure 1. The Δt refers to the time between the causative lightning spheric (the

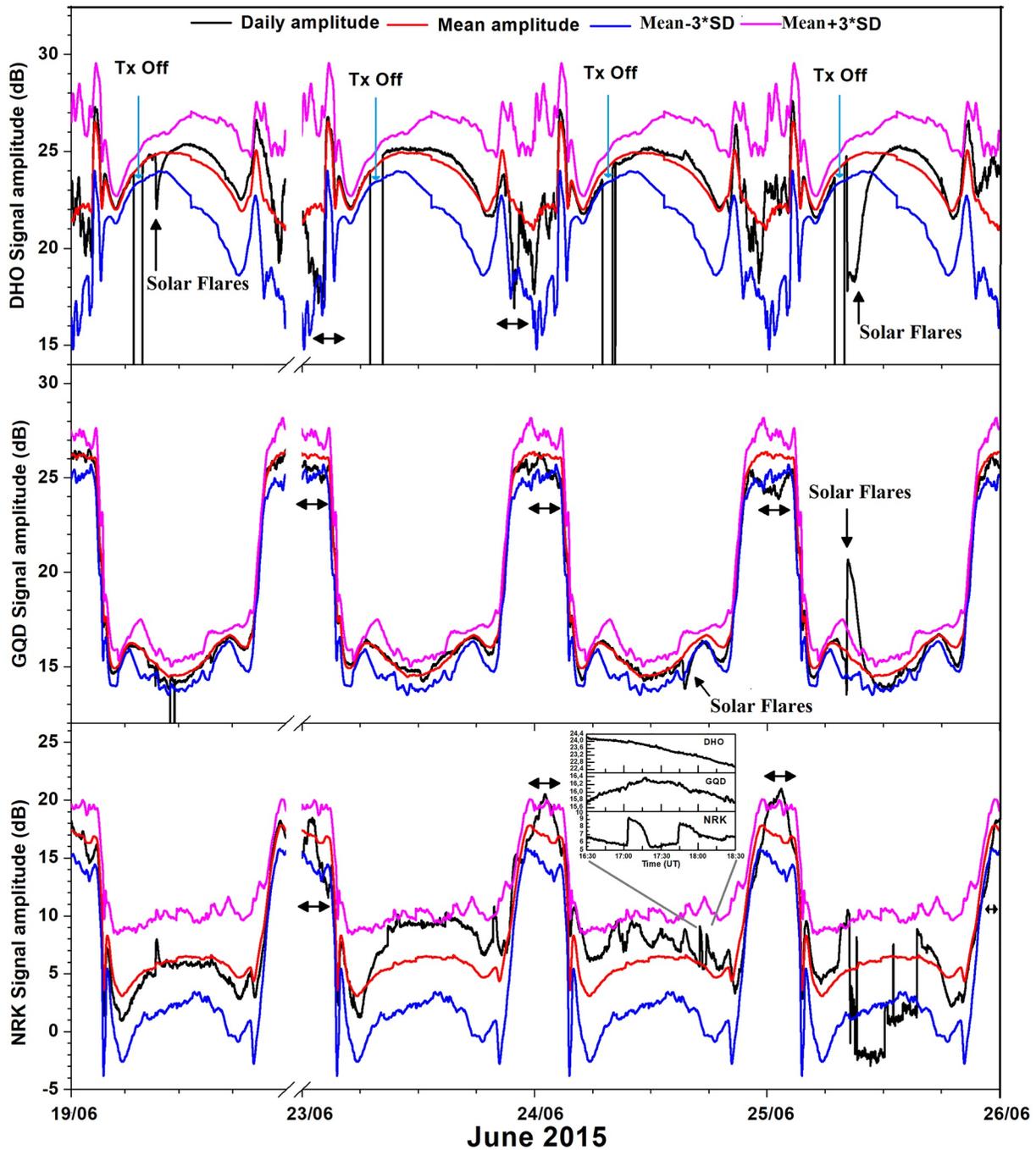


Figure 4. Daily variation of the signal amplitude of all transmitters (DHO, GQD, and NRK) during the June 2015 storm. Black double arrows show the periods when the anomalies were recorded, blue arrows show the periods when the transmitters were off. The zoomed region shows the signal perturbations due to FAC between 17:00:00 UT and 18:00:00 UT. FAC, field aligned current.

large peak in Figure 1) and the beginning of the LEP associated VLF amplitude perturbations. This time corresponds to the propagation time of the whistler electromagnetic wave from thunderstorm region to the Van Allen belt and wave-electron interaction. The second time, t_d , is the time that the signal perturbation takes to reach its maximum (or minimum) level which corresponds to the time that energetic electrons take to precipitate down to the atmosphere and produce secondary electrons (Inan et al., 2010). From the plots, a clear delay time of about 700 ms between lightning sferic and the beginning of the signal perturbation was simultaneously observed on both transmitter GCPs and that the perturbation took about 500 ms to reach its maximum level.

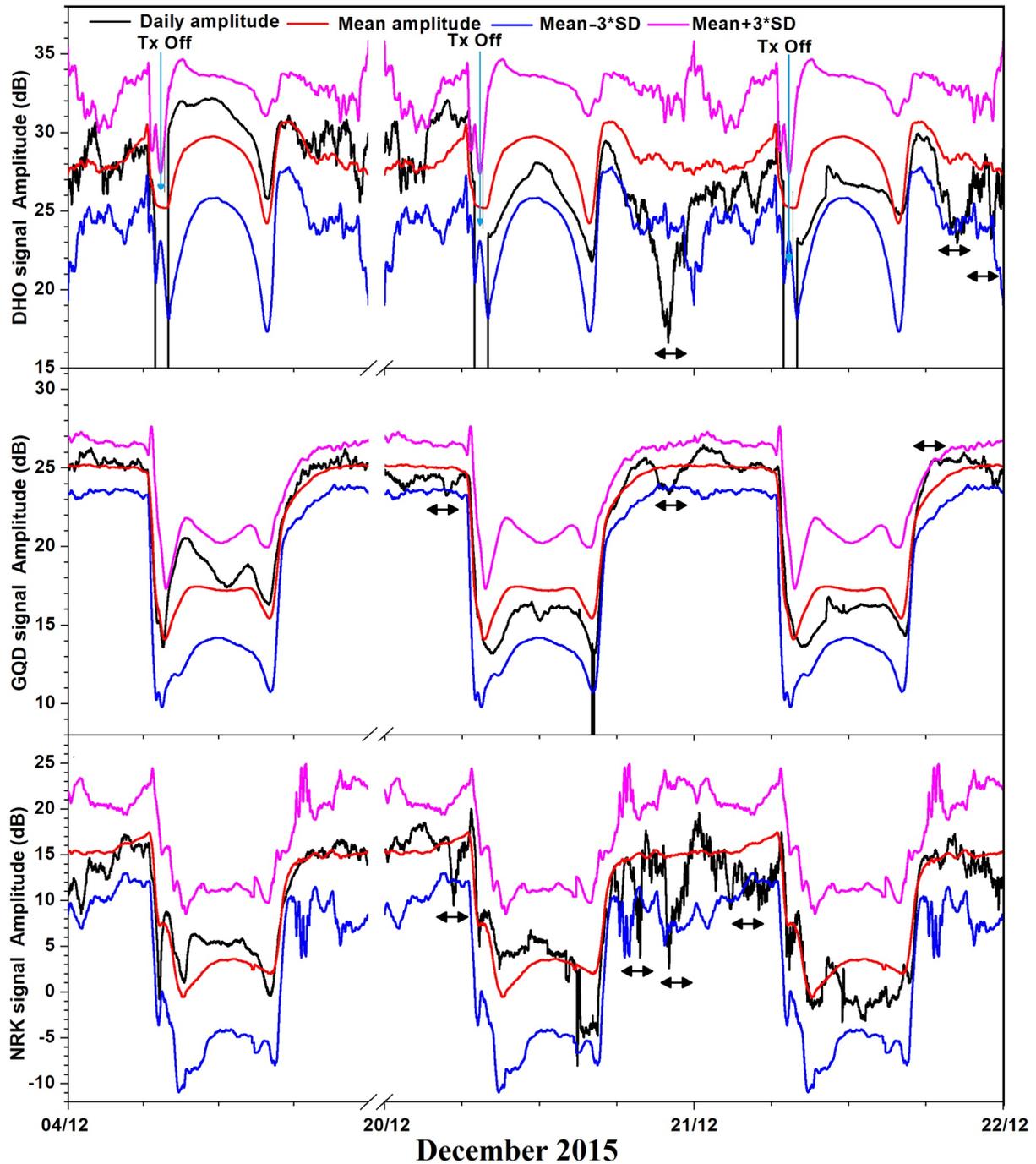


Figure 5. Daily variation of the signal amplitude of all transmitters (DHO, GQD, and NRK) during the December 2015 storm. Black double arrows show the periods when the anomalies were recorded, blue arrows show the periods when the transmitters were off.

Our analysis revealed that a total of 13 LEP events occurred on each VLF GCPs during March storm and 7 LEP events during the June storm. A total of 124 LEP events were observed on the NRK path associated with the December storm with no events on other two paths. The rate of occurrence of each type of LEP events is given in Table 2. From the Table 2, we observe that the rates of ducted and non-ducted LEP events are the same on GQD and DHO paths. Also, these rates are nearly the same during the St Patrick's super storm but during the June storm the LEP events were ducted in majority. For the December geomagnetic storm, no LEP events were observed. In the case of NRK signal in addition to the ducted and non-ducted events, a fraction of MR events were

Table 1
Characteristic Times of LEP events

	Onset delay (sec)	Onset duration (sec)	Recovery time (sec)
Ducted	0.6	1.7	10–100
Non-ducted	0.7–1.3	2	10–100
MR	4	2	30–45

Abbreviation: LEP, lightning-induced electron precipitation.

also observed in association with the three storms which are important during St Patrick’s super storm. The simultaneous observations of LEP events on GQD and DHO signals amplitude implies that the event size was very large since the separating distance between both transmitters is 728 km which is in agreement with Cliverd et al. (2002). We also observed that for all three storms, the LEP events occurred after the maximum strength of the geomagnetic disturbance day (strong minimum Dst) which for the March storm was one week, June storm four days and the December storm only one day and that the LEP events occurred only for 3 days. The possible explanation about delay is related to the lightning activity near the transmitter-receiver GCP or at conjugate points and also to the complex modal interference at the receiver

between direct signal from the transmitter and scattered signal from the LEP associated ionization enhancement. Also the observation of LEP events in the NRK-Algiers path only during the December storm can be explained by the fact that lightning activity happened at conjugate point of NRK location.

3.5. D-region Changes due to LEP Associated VLF Perturbations

The determination of the precipitating electron density in the D-region of the ionosphere constitutes a big challenge. Indeed, estimation of the ionization rates at low altitudes dues to each kind of LEP events can help to understand the coupling between the magnetosphere and the ionosphere. The only way to get the increases in the electron density at the D-region of the ionosphere is by means of VLF signal perturbations and the LWPC code. In the past works of LWPC simulation of LEP events, the shape and size of the ionospheric disturbance associated to LEP were not clearly explained. In our case, the shape and size of the ionospheric disturbance is considered based on the simultaneous observation of LEP events on the GQD and DHO paths to Algiers since they are at the same latitudes. The simulation of the VLF signal amplitude and phase using LWPC code (Ferguson, 1992; Ferguson & Snyder, 1989) during ambient and disturbed ionospheric conditions allows us to obtain the modified electron density. The code uses the classical Wait and Spies (1964) altitude profile of the D-region electron density

($N_e(z)$, in cm^{-3}) valid up to about 100 km, given by: $N_e = 1.43 \times 10^7 \times e^{-0.15 \times z} \times e^{\beta \times (z-h')}$ (Equation 1). In this model, the electron density varies exponentially with height and depends on the Wait’s parameters (h' and β) known as the reference height (h' in km) and the sharpness factor (β in km^{-1}), respectively (Wait & Spies, 1964).

In our case, we selected two important LEP events (one ducted and one non-ducted) and using LWPC code we simulated the perturbed signal amplitude and phase. To do that, we assumed a Gaussian profile of the disturbance centered at the transmitter location and decreasing exponentially to background level from transmitter location in the direction of the GCP to the receiver same as in NaitAmor et al. (2016). The measured and simulated perturbations in the signal amplitude and phase for the two events during the St Patrick’s storm (March 24) are given in Table 3. In the top panels of Figure 6, we present the simulation results using LWPC code for the ducted and non-ducted LEP events. From the plots and above the transmitter location, the reference height h' at the top of the transmitter location decreased from its normal value (87 km) to 80.3 km in the case of non-ducted event and 83.3 km in the case of ducted event. Similar to h' , the sharpness factor β decreased from its normal value $0.42 km^{-1}$ to $0.307 km^{-1}$ for non-ducted event and $0.346 km^{-1}$ for ducted event. In the middle panels of Figure 6, we present the electron density modification due to the simulated events at 84 km (left) and 86 km (right) as function of the distance away from DHO transmitter along TRGCP. The electron density values calculated using Equation 1 are found to vary from the ambient values to $151.9 cm^{-3}$ for non-ducted event and $60.7 cm^{-3}$ ducted one at 84 km of altitude. It is clearly seen that the electron density below 87 km increases much more than the ambient level and exceeds the critical value leading to reflection of the VLF

Table 2
Occurrence Rates of Different Types of LEP Events on NRK, DHO, and GQD Transmitters for Three Geomagnetic Storm: March, June, and December 2015

Date	Ducted %	Non-ducted %	Magnetospheric reflexion (MR)%
NRK			
24-03-2015	0	100	0
27-06-2015	42.85	57.15	0
22-12-2015	0.81	6.45	0.81
23-12-2015	3.22	35.48	2.42
24-12-2015	No event	43.55	7.26
Total December 2015	4.03	85.48	10.49
DHO			
24-03-2015	46.15	53.85	0
27-06-2015	85.71	14.29	0
December 2015	No event	No event	No event
GQD			
24-03-2015	46.15	53.85	0
27-06-2015	85.71	14.29	0
December 2015	No event	No event	No event

Abbreviation: LEP, lightning-induced electron precipitation.

Table 3
The Measured and Simulated DHO Signal Amplitude and Phase of the March 24, 2015 LEP Events

Events	$\Delta A_{\text{meas}}(\text{dB})$	$\Delta A_{\text{simu}}(\text{dB})$	$\Delta P_{\text{meas}}(^{\circ})$	$\Delta P_{\text{simu}}(^{\circ})$	Time (UT)
Ducted event	2.01	1.66	3.63	3.15	2:36:56.14
Non-Ducted event	1.21	1.74	2.3	2.9	2:45:25.27

Abbreviation: LEP, lightning-induced electron precipitation.

signal from the lower altitude. After that, the electron density gradually recovers to the ambient condition. We should mention that these results correspond to the time when the signal perturbation reached its maximum value. Additionally, the non-ducted case exhibits a wider disturbance zone than for the ducted event. In the bottom panels, we present the LWPC simulation of the signal amplitude and phase (ambient and disturbed) as a function of the distance between the transmitter and the receiver (marked R_x). We see from the plots that the perturbed signal is sometimes above the ambient level and sometimes below it depending on the distance away from the transmitter. Also, the fading position (marked F), that characterizes the maximum of modal interference, moved toward the transmitter location and that the fading displacement distance increases when the electron density increases. This behavior leads to the observation of positive signal perturbations at some locations and negative perturbations at others. The most probable reason of positive and negative signal perturbation is the complex modal interference between normal signal and scattered (disturbed) one as described by NaitAmor et al. (2016).

4. Summary and Conclusion

The results presented here give clear evidence about the geomagnetic storm effect on the D region of the ionosphere. The FACs effect appears as a decrease or increase in the daytime signal amplitude level. This effect is more apparent during the nighttime propagation conditions. Additionally, during the March super storm, the effect was more important during the SS transition on March 24 where in the case of NRK signal it disappeared. Another interesting observation of the FACs effect is that a pulse shape signal perturbations were recorded and were more clear on the NRK signal during the June storm. Furthermore, after March 26 the signal amplitude of all transmitters showed abnormal behavior where clear attenuation in the signal was observed during daytime. This is due to the fact that the March storm was the strongest (super) among all the considered storms and affected the global ionosphere severely and for longer duration (S. Kumar & Kumar, 2019). For the other two intense storms, the signal anomalies were observed during the period of strong negative Dst index in the case of DHO and GQD transmitters. For the high latitude path (NRK), the effect of the geomagnetic storm was also observed when Dst was above -50 nT and that during daytime the transmitter was forced to a very low level. The LEP associated VLF perturbations occurred couple of days after than the maximum of storm. This indicates that LEP events either didn't occur along the TRGCP or occurred such that complex modal interference of direct and scattered modes did not produce observable VLF perturbations. The LEP occurrence also depends upon the lightning occurrence in the conjugate area. From LEP events analysis, our results show that for the mid-latitudes transmitters (DHO and GQD) the LEP events are of ducted and non-ducted types only and for the high latitude transmitter (NRK) a fraction of magneto-spherically reflected (MR) events were also observed during all storms. The simultaneous observations of LEP events on GQD and DHO signals (amplitudes) implies that the events size was very large since distance between both transmitters is 728 km. We also observed that for the mid-latitude transmitters, the rate of occurrence of LEP events is different from storm to storm. Effectively, during the March super storm the occurrence rates of ducted and non-ducted events were nearly the same. But during the June storm most LEP events were ducted. During the December storm, no LEP events were recorded on both transmitter signals. This is possibly due to seasonal dependence of LEP events occurrence which requires a separate study for large number of storms to get more statistical data and conclude the seasonal occurrence of LEP events. The LWPC simulation of both the kinds (non-ducted and ducted) of LEP events showed that at the transmitter location the Wait parameters h' and β decreased due to ionization enhancement at lower altitude produced by

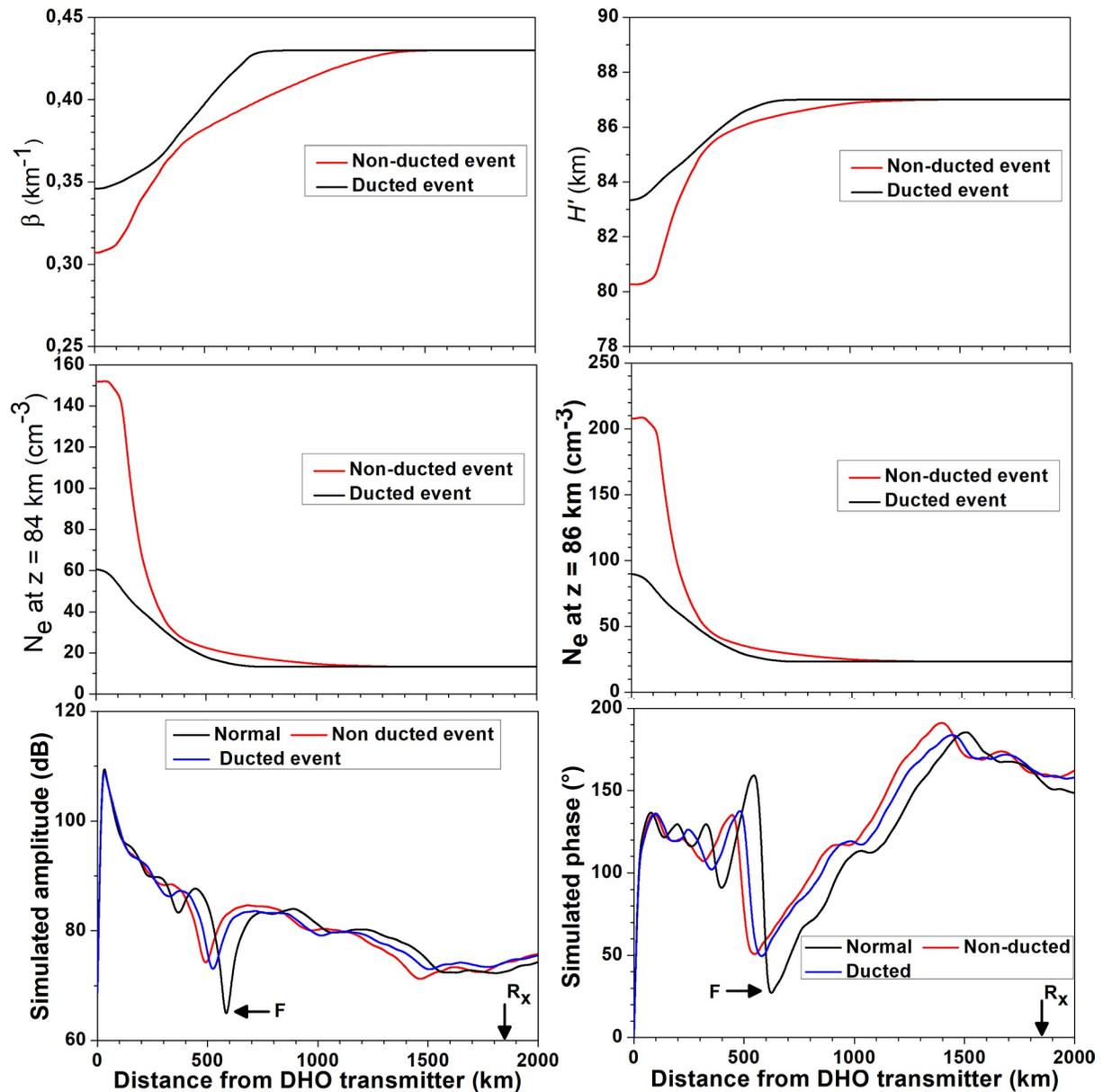


Figure 6. The top panels: Changes in the Wait parameters β (left) and h' (right). Middle panels: Variation in the electron density at 84 km (left) and 86 km (right). Bottom panels: The simulated VLF signal amplitude (left) and phase (right). The x axis shows the distance away from the transmitter. Here, R_x and F refer to receiver location and the fading position, respectively. VLF, very low frequency.

energetic electrons collision with neutral atmosphere leading to an increase in the electron density. The simulation also revealed that the disturbed region is wider for non-ducted event than for the ducted event.

Data Availability Statement

The authors acknowledge J. H. King, N. Papitashvili at ADNET, NASA GSFC, and CDAWEB for keeping available online the data of the storms. The VLF data used for this study are available at: <http://dx.doi.org/10.17632/82bmr5shtv.1>.

Acknowledgments

The author acknowledges ADNET, NASA GSFC, and CDAWEB teams for putting the storm data online. We also thank the editor and reviewers, whose comments and suggestions greatly improved our manuscript. The author appreciates all those who worked hard to complete this article, principally the co-authors of this manuscript. The author would like to thank the Research Center for Astronomy Astrophysics and Geophysics for the data availability and the Laboratory of energy and smart systems, faculty of science and technology of The University Djilali Bounaama of Khemis Miliana for their support.

References

- Alberti, T., Consolini, G., Lepreti, F., Laurenza, M., Vecchio, A., & Carbone, V. (2017). Timescale separation in the solar wind – magnetosphere coupling during St. Patrick's day storms in 2013 and 2015. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, *122*, 4266–4283. <https://doi.org/10.1002/2016JA023175>
- Choudhury, A., De, B. K., Guha, A., & Roy, R. (2015). Long-duration geomagnetic storm effects on the D-region of the ionosphere: Some case studies using VLF signal. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, *120*, 778–787. <https://doi.org/10.1002/2014JA020738>
- Cliilverd, M. A., Nunn, D., Lev-Tov, S. J., Inan, U. S., Dowden, R. L., Rodger, C. J., & Smith, A. J. (2002). Determining the size of lightning-induced electron precipitation patches. *Journal of Geophysical Research*, *107*(A8). <https://doi.org/10.1029/2001JA000301>
- Cliilverd, M. A., Rodger, C. J., Brundell, J., Bahr, J., Cobbett, N., Moffat-Griffin, T., et al. (2008). Energetic electron precipitation during substorm injection events: High-latitude fluxes and an unexpected midlatitude signature. *Journal of Geophysical Research*, *113*, A10311. <https://doi.org/10.1029/2008JA013220>
- Cliilverd, M. A., Rodger, C. J., & Nunn, D. (2004). Radiation belt electron precipitation fluxes associated with lightning. *Journal of Geophysical Research*, *109*, A12208. <https://doi.org/10.1029/2004JA010644>
- Cohen, M. B., Gross, N. C., Higginson-Rollins, M. A., Marshall, R. A., Golkowski, M., & Liles, W. (2018). The lower ionospheric VLF/LF response to the 2017 great American solar eclipse observed across the continent. *Geophysical Research Letters*, *45*, 3348–3355. <https://doi.org/10.1002/2018GL077351>
- Cohen, M. B., Inan, U. S., & Paschal, E. W. (2010). Sensitive broadband ELF/VLF radio reception with the AWESOME instrument. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *48*, 3–17. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2009.2028334>
- Dickinson, P. H. G., & Bennett, F. D. G. (1978). Diurnal variation in the D-region during a storm after-effect. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, *40*, 549–551. [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(78\)90092-2](https://doi.org/10.1016/0021-9169(78)90092-2)
- Ferguson, J. A. (1992). *A review of the ionospheric model for the long-wave prediction capability*, TD 2393 (Nov), naval command, control and ocean surveillance. San Diego, CA: Center RDT and E Division.
- Ferguson, J. A., & Snyder, F. P. (1989). *Long-wave propagation capability program description and User's guide*, TD 1449. San Diego, CA: Naval Ocean System Center. Available from Defense Technical Information Center (DTIC): ABD130808.
- Gonzalez, W. D., Joselyn, J. A., Kamide, Y., Kroehl, H. W., Rostoker, G., Tsurutani, B. T., & Vasylunas, V. M. (1994). What is a geomagnetic storm? *Journal of Geophysical Research*, *99*, 5771. <https://doi.org/10.1029/93JA02867>
- Gonzalez, W. D., & Tsurutani, B. T. (1987). Criteria of interplanetary parameters causing intense magnetic storms. *Planetary and Space Science*, *35*, 1101–1109. [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(87\)90015-8](https://doi.org/10.1016/0032-0633(87)90015-8)
- Hayakawa, M., Raulin, J. P., Kasahara, Y., Bertoni, F. C. P., Hobar, Y., & Guevara-Day, W. (2011). Ionospheric perturbations in possible association with the 2010 Haiti earthquake, as based on medium-distance subionospheric VLF propagation data. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, *11*, 513–518. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-513-2011>
- Inan, U. S., Cummer, S. A., & Marshall, R. A. (2010). A survey of ELF and VLF research on lightning-ionosphere interactions and causative discharges. *Journal of Geophysical Research*, *115*, A00E36. <https://doi.org/10.1029/2009JA014775>
- Johnson, M. P., Inan, U. S., & Lauben, D. S. (1999). Subionospheric VLF signatures of oblique (nonducted) whistler-induced precipitation, 26. *Geophysical Research Letters*, *26*, 3569–3572. <https://doi.org/10.1029/1999GL010706>
- Kirkwood, S., Osepian, A., Belova, E., Urban, J., Perot, K., & Sinha, A. K. (2015). Ionization and NO production in the polar mesosphere during high-speed solar wind streams: Model validation and comparison with no enhancements observed by odin-SMR. *Annals of Geophysics*, *33*, 561–572. <https://doi.org/10.5194/angeo-33-561-2015>
- Kuai, J., Liu, L., Liu, J., Sripathi, S., Zhao, B., & Chen, Y. (2016). Effects of disturbed electric fields in the low latitude and equatorial ionosphere during the 2015 St. Patrick's Day storm. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, *121*, 9111–9126. <https://doi.org/10.1002/2016JA022832>
- Kumar, A., & Kumar, S. (2014). Space weather effects on the low latitude D-region ionosphere during solar minimum. *Earth Planets and Space*, *66*, 76. <https://doi.org/10.1186/1880-5981-66-76>
- Kumar, S., & Kumar, V. V. (2019). Ionospheric response to the St. Patrick's day space weather events in March 2012, 2013, and 2015 at southern low and middle latitudes. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, *124*, 584–602. <https://doi.org/10.1029/2018JA025674>
- Kumar, S., Kumar, A., Menk, F., Maurya, A. K., Singh, R., & Veenadhari, B. (2015). Response of the low-latitude D-region ionosphere to extreme space weather event of 14–16 December 2006. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, *120*, 788–799. <https://doi.org/10.1002/2014JA020751>
- Kumar, S., NaitAmor, S., Chanrion, O., & Neubert, T. (2017). Perturbations to the lower ionosphere by tropical cyclone Evan in the South Pacific region. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, *122*, 8720–8732. <https://doi.org/10.1002/2017JA024023>
- Kumar, V. V., & Parkinson, M. L. (2017). A global scale picture of ionospheric peak electron density changes during geomagnetic storms. *Space Weather*, *15*, 637–652. <https://doi.org/10.1002/2016SW001573>
- Maurya, A. K., Venkatesham, K., Kumar, S., Singh, R., Tiwari, P., & Singh, A. K. (2018). Effects of St. Patrick's day geomagnetic storm of March 2015 and of June 2015 on low-equatorial D-region ionosphere. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, *123*, 6836–6850. <https://doi.org/10.1029/2018JA025536>
- Naitamor, S., Alabdoadaim, M. A., Cohen, M. B., Cotts, B. R. T., Soula, S., Chanrion, O., & Abdelatif, T. E. (2010). VLF observations of ionospheric disturbances in association with TLEs from the Eurosprite – 2007 campaign. *Journal of Geophysical Research*, *115*, A00E47. <https://doi.org/10.1029/2009JA015026>
- Naitamor, S., Ghalila, H., & Cohen, M. B. (2016). TLEs and early VLF events: Simulating the important impact of transmitter-disturbance-receiver geometry. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, *121*, 792–801. <https://doi.org/10.1002/2016JA022791>
- Nawanko, V. U. J., Chakrabarti, S. K., & Ogunmodimu, O. (2016). Probing geomagnetic storm-driven magnetosphere-ionosphere dynamics in D-region via propagation characteristics of very low frequency radio signals. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, *145*, 154–169. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2016.04.014>
- Rozhnoi, A., Shalimov, S., Solovieva, M., Levin, B., Hayakawa, M., & Walker (2012). Tsunami-induced phase and amplitude perturbations of subionospheric VLF signals. *Journal of Geophysical Research*, *117*, A09313. <https://doi.org/10.1029/2012JA017761>
- Salut, M. M., Abdullah, M., Graf, K. L., Cohen, M. B., Cotts, B. R. T., & Kumar, S. (2012). Long recovery VLF perturbations associated with lightning discharges. *Journal of Geophysical Research*, *117*, A08311. <https://doi.org/10.1029/2012JA017567>
- Salut, M. M., Cohen, M. B., Ali, M. A. M., Graf, K. L., Cotts, B. R. T., & Kumar, S. (2013). On the relationship between lightning peak current and early VLF perturbations. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, *118*. <https://doi.org/10.1002/2013JA019087>
- Torkar, K. M., Friedrich, M., & Stauning, P. (1980). Evidence of coupling between auroral zone activity and mid-latitude absorption, *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, *42*, 183–188. [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(80\)90079-3](https://doi.org/10.1016/0021-9169(80)90079-3)

- Verkhoglyadova, O. P., Wissing, J. M., Wang, S., Kallenrode, M. B. & Zank, G. P. (2016), Nighttime mesospheric hydroxyl enhancements during SEP events and accompanying geo-magnetic storms: Ionization rate modeling and Aura satellite observations. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, *121*, 6017–6030. <https://doi.org/10.1002/2015JA022217>
- Wait, J. R., & Spies, K. P. (1964). *Characteristics of the earth-ionosphere waveguide for VLF radio waves*. Gaithersburg, MD: National Bureau of Standards Technical Note 300.

Bibliographie

Bibliographies

A

Ahmed Ammar, Etude des perturbations ionosphériques par le biais des ondes VLF, November 2017, Faculté des Sciences de Tunis, Département de Physique, Laboratoire de Spectroscopie Atomique Moléculaire et Applications, DOI:10.13140/RG.2.2.28941.44004.

Alberti, T, Consolini, G, Lepreti, F, Laurenza, M, Vecchio, A, & Carbone, V. (2017). Timescale separation in the solar wind – magnetosphere coupling during St. Patrick's day storms in 2013 and 2015. *Journal Geophysical Research: Space Physics*, 122, 4266–4283. <https://doi.org/10.1002/2016JA023175>.

Anne-Marie. Poussard, Y. Corcuff, Numerical simulation of LEP Trimpis observed at Poitiers, France, on signals from VLF transmitters, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. volume 62 année (2000) pages 207-224.

B

Baker, D. N, Kanekal, S.G, Hoxie, V. et al. The Relativistic Electron-Proton Telescope (REPT) Investigation: Design, Operational Properties, and Science Highlights. *Space Sci Rev* 217, 68 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11214-021-00838-3>.

Barr, R, D.L, Jones, and C.J. Rodger (2000), ELF and VLF radio waves, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys*, 62, 1689–1718.

Born, M. and Wolf, E. (1965). *Principle of optics-electromagnetic theory and propagation. Interference and Diffraction of Light* (7th edition) (University Press, Cambridge, 1999).

Borovsky, J. E. and Denton, M. H. (2006). Differences between CME-driven storms and CIR-driven storms. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, 111 :7.).

Boteler, D. H.: A 21st Century View of the March 1989 Magnetic Storm, *Space Weather*, 17, 1427– 1441, <https://doi.org/10.1029/2019SW002278>, URL <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2019SW002278>, 2019.

Budden, K.G. F.R.S. (1988), *The propagation of radio waves: the theory of radio waves of low power in the ionosphere and magnetosphere*, Cambridge university press, Cambridge.

Bouderba, Y, S. Nait Amor, and M. Tribeche (2016), Study of the solar flares effect on VLF radio signal propagating along NRK-ALG path using LWPC code, *J. Geophys. Res*, 121, 6799–6807, doi:10.1002/2015JA022233.

Boeck, W. L, Vaughan, O. H, Blakeslee, R. J, Vonnegut, B, and Brook, M. (1998). The role of the space shuttle videotapes in the discovery of sprites, jets and elves. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, volume 60; issues 7-9; pages :669-677.

Bibliographie

C

- Carrington, R. C.: 1859, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 20, 13.
- Carrington, R. “Description of a singular appearance seen on the Sun on September 1, 1859”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 20:13-15 (1860).
- Chapman, S. (1931), The absorption and dissociative or ionizing effect of monochromatic radiation of an atmosphere on a rotating Earth, Proc. Phys. Soc.,43, 26-45.
- Choudhury, A, De, B. K, Guha, A, & Roy, R. (2015), Long-duration geomagnetic storm effects on the D-region of the ionosphere: Some case studies using VLF signal. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 120, 778–787. <https://doi.org/10.1002/2014JA020738>.
- Clilverd, M. A, Rodger, C. J, & Nunn, D. (2004). Radiation belt electron precipitation fluxes associated with lightning. Journal of Geophysical Research, 109, A12208. <https://doi.org/10.1029/2004JA010644>.
- Clilverd, M. A, Nunn, D, Lev-Tov, S. J, Inan, U. S, Dowden, R. L, Rodger, C. J, & Smith, A. J. (2002). Determining the size of lightning-induced electron precipitation patches. Journal of Geophysical Research, 107(A8). <https://doi.org/10.1029/2001JA00003>.
- Cohen, M. B, Gross, N. C, Higginson-Rollins, M. A, Marshall, R. A, Golkowski, M, & Liles, W. (2018). The lower ionospheric VLF/LF response to the 2017 great American solar eclipse observed across the continent. Geophysical Research Letters, 45, 3348–3355. <https://doi.org/10.1002/2018GL077351>.
- Cohen, M. B, Inan, U. S, & Paschal, E. W. (2010). Sensitive broadband ELF/VLF radio reception with the AWESOME instrument. IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing, 48, 3–17. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2009.2028334>.

D

- Damien HERRERA, Prise en compte du temps local dans la modélisation des ceintures de radiation terrestres, lundi 9 octobre 2017, école doctorale et discipline ou spécialité ED SDU2E : Astrophysique, sciences de l'espace, planétologie, Toulouse.
- Daniel N. Baker · Shrikanth G. Kanekal · Vaughn Hoxie · Xinlin Li · Allison N. Jaynes · Hong Zhao · Scot R. Elkington · John C. Foster · Richard Selesnick · Binbin Ni · Harlan Spence · Rachel Filwett, The Relativistic Electron-Proton Telescope (REPT) Investigation: Design, Operational Properties, and Science Highlights, Space Science Reviews (2021) 217:68 <https://doi.org/10.1007/s11214-021-00838-3>.
- Deborah Scherrera, Morris Cohen, Todd Hoeksema, Umran Inan, Ray Mitchell, Philip Scherrer, Distributing space weather monitoring instruments and educational materials worldwide for IHY 2007: The AWESOME and SID project (2008), Advances in Space Research, Volume 42, Issue 11, 1 December 2008, Pages 1777-1785, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2007.12.013>.

Bibliographie

Dickinson, P. H. G, & Bennett, F. D. G. (1978). Diurnal variation in the D-region during a storm after-effect. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 40, 549–551. [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(78\)90092-2](https://doi.org/10.1016/0021-9169(78)90092-2).

E

Elena Y. Adams, Kristin A. Fretz, Aleksandr Y. Ukhorskiy, Nicola J. Fox et al., « Van Allen Probes Mission Overview and Discoveries to Date », *Johns Hopkins APL Technical Digest, Applied Physics Laboratory (université Johns-Hopkins)*, vol. 33, no 3, 2016, p. 173-182, www.jhuapl.edu/techdigest.

F

Fares Saba, M. M, W. D. Gonzalez, A. L. CluÂa de Gonzalez, Relationships between the AE, ap and Dst indices near solar minimum (1974) and at solar maximum (1979), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Av. dos Astronautas, 1758 ± Cx. Postal 515, 12227-010 ± SaÃo JoseÂ dos Campos, SP, Brazil/ *Ann. Geophysicae* 15, 1265±1270 (1997) Ó EGS ± Springer-Verlag 1997.

Ferguson, J. A. (1998), Computer programs for assessment of longwavelength radio communications, version 2.0, Tech. Docum. 3030, Space and Naval Warfare Systems Center, San Diego, California.

Ferguson, J. (1992). A review of the ionospheric model for the long wave prediction capability. Technical report, DTIC Document.

Ferguson, J. A, & Snyder, F. P. (1989). Long-wave propagation capability program description and User's guide, TD 1449. San Diego, CA: Naval Ocean System Center. Available from Defense Technical Information Center (DTIC): ABD130808.

G

Gautier Nguyen. Solar wind / magnetosphere coupling inferred from machine-learning methods. *Earth and Planetary Astrophysics [astro-ph.EP]*. Université Paris-Saclay, 2021. English. ffNNT : 2021UPASP012ff. fftel-0319843).

Green, J. L., & Inan, U. (2006). Chapter 4: Lightning effects on space plasmas and applications. In C. Grabbe (Ed.), *Plasma physics applied* (pp. 59–72). Scarborough, Ontario, Canada: Transworld Research Network.

H

Haldoupis, C, T. Neubert, U. S. Inan, A. Mika, T. H. Allin, and R. A. Marshall, Subionospheric early VLF signal perturbations observed in one-to-one association with sprites, *J. Geophys. Res.* (109), A10303, doi:10.1029/2004JA010651, 2004.

Hayakawa, M, Raulin, J. P, Kasahara, Y, Bertoni, F. C. P, Hobara, Y, & Guevara-Day, W. (2011), Ionospheric perturbations in possible association with the 2010 Haiti earthquake, as

Bibliographie

based on medium-distance subionospheric VLF propagation data. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11, 513–518. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-513-2011>.

Hundhausen, A, A. Stanger et S. Serbicki, “Mass and energy contents of coronal mass ejections: SMM results from 1980 and 1984-1988”, In Hunt J. (Editor), *Solar Dynamic Phenomena and Solar Wind Consequences*, the third SOHO Workshop, volume 373 of ESA Special Publication, page 409 (1994).

Hodgson, R. “On a curious appearance seen in the Sun”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 20:15 (1860).

I

Inan, U. S, Cummer, S. A, & Marshall, R. A. (2010). A survey of ELF and VLF research on lightning-ionosphere interactions and causative discharges. *Journal of Geophysical Research*, 115, A00E36. <https://doi.org/10.1029/2009JA014775>.

Inan, U. S, Piddyachiy, D, Peter, W. B, Sauvaud, J, and Parrot, M. (2007b). Demeter satellite observations of lightning-induced electron precipitation. *Geo-physical research letters*, 34(7) doi:10.1029/2006GL029238,2007.

J

Jean Lilensten et Pierre-Louis BLELLY, 2000, *Du Soleil à La Terre Aéronomie et Météorologie de L'espace*, édition 2000, édités par EDP Sciences, ISBN 2.86883.467.1, chapitre 3 formation de la magnétosphère pages 118-125, 7 avenue du Hoggar Parc d'Activité de Courtaboeuf, BP 112 91944 Les Ulis Cedex A, France.

K

Kerrache, F, Nait Amor, S, & Kumar, S. (2021). Ionospheric d region disturbances due to fac and lep associated with three severe geomagnetic storms as observed by vlf signals.. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 126, e2020JA027838. <https://doi.org/10.1029/2020JA027838>.

Kirkwood, S, Osepian, A, Belova, E, Urban, J, Perot, K, & Sinha, A. K. (2015). Ionization and NO production in the polar mesosphere during high-speed solar wind streams: Model validation and comparison with no enhancements observed by odin-SMR. *Annals of Geophysics*, 33, 561–572. <https://doi.org/10.5194/angeo-33-561-2015>.

Kretzschmar, M. , T. Dudok de Wit, W. Schmutz, S. Mekaoui, J.F. Hochedez, S. Dewitte. « The effect of flares on total solar irradiance *Nature Physics*, 6 , 690-692, 2010. <https://doi.org/10.1038/nphys1741>.

Kumar, S, & Kumar, V. V. (2019). Ionospheric response to the St. Patrick's day space weather events in March 2012, 2013, and 2015 at southern low and middle latitudes. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 124, 584–602, <https://doi.org/10.1029/2018JA025674>.

Kumar et al., 2017 ; Kumar, S, Nait Amor, S, Chanrion, O, & Neubert, T. (2017), Perturbations to the lower ionosphere by tropical cyclone Evan in the South Pacific region. *Journal of*

Bibliographie

Geophysical Research: Space Physics, 122, 8720–8732.
<https://doi.org/10.1002/2017JA024023>.

Kumar, S, Kumar, A, Menk, F, Maurya, A. K, Singh, R, & Veenadhari, B. (2015), Response of the low-latitude D-region ionosphere to extreme space weather event of 14–16 December 2006. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 120, 788–799.
<https://doi.org/10.1002/2014JA020751>.

Kumar, A, & Kumar, S. (2014). Space weather effects on the low latitude D-region ionosphere during solar minimum. *Earth Planets and Space*, 66, 76. <https://doi.org/10.1186/1880-5981-66-76>.

L

Lauben, D. S, Inan, U. S, and Bell, T. F. (1999). Poleward-displaced electron precipitation from lightning-generated oblique whistlers. *Geophysical Research Letters*, 26(16):2633–2636.

M

Marshall, R. A, and J. B. Snively (2014), Very low frequency subionospheric remote sensing of thunderstorm-driven acoustic waves in the lower ionosphere, *J. Geophys. Res. Atmos*, 119, 5037–5045, doi:10.1002/2014JD021594.

Maurya, A. K, Venkatesham, K, Kumar, S, Singh, R, Tiwari, P, & Singh, A. K. (2018). Effects of St. Patrick's day geomagnetic storm of March 2015 and of June 2015 on low-equatorial D-region ionosphere. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 123, 6836–6850.
<https://doi.org/10.1029/2018JA025536>.

McComas, D. J, R. W. Ebert, H. A. Elliott, B. E. Goldstein, J. T. Gosling, N. A. Schwadron, and R. M. Skoug, “Weaker solar wind from the polar coronal holes and the whole Sun,” *Geophys. Res. Lett.* 35, L18103 (2008). DOI: 10.1029/2008GL034896.

McComas, D. J, H. A. Elliott, N. A. Schowadron, J. T. Gosling, R. M. Skoug, B. E. Goldstein, “The three-dimensional solar wind around solar maximum,” *Geophys. Res. Lett.* 30(10):1517 (2003).

Michael Paul Johnson, (September 2001). VLF imaging of lightning-induced ionospheric disturbances; Ph.D. Thesis, Stanford University. [mikejthesis.dvi\(ku.edu.tr\)](http://mikejthesis.dvi.ku.edu.tr).

N

Nait Amor, S, Cohen, M. B, Kumar, S, Chanrion, O, & Neubert, T. (2018). VLF Signal Anomalies During Cyclone Activity in the Atlantic Ocean. *Geophysical Research Letters*, 45(19), 10,185-10,192. <https://doi.org/10.1029/2018GL078988>.

Naitamor, S, Ghalila, H, & Cohen, M. B. (2016). TLEs and early VLF events: Simulating the important impact of transmitter-disturbance-receiver geometry. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 121, 792–801. <https://doi.org/10.1002/2016JA022791>.

Bibliographie

Naitamor, S, Alabdoadain, M. A, Cohen, M. B, Cotts, B. R. T, Soula, S, Chanrion, O, & Abdelatif, T. E. (2010). VLF observations of ionospheric disturbances in association with TLEs from the Eurosprite – 2007 campaign. *Journal of Geophysical Research*, 115, A00E47. <https://doi.org/10.1029/2009JA015026>.

Nawanko, V. U. J, Chakrabarti, S. K, & Ogunmodimu, O. (2016), Probing geomagnetic storm-driven magnetosphere-ionosphere dynamics in D-region via propagation characteristics of very low frequency radio signals, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 145, 154–169, <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2016.04.014>.

O

Ohyama, M. et K. Shibata, “X-Ray Plasma Ejection Associated with an Impulsive Flare on 1992 October 5: Physical Conditions of X-Ray Plasma Ejection”, *The Astrophysical Journal*, 499-934-947 (1998).

P

Parker, E, *Dynamics of the Interplanetary Gas and Magnetic Fields* (1985). *ApJ* 128: 664.[doi:10.1086/146579](https://doi.org/10.1086/146579). 1958.

Peter, W. B. and Inan, U. S. (2007). A quantitative comparison of lightning-induced electron precipitation and vlf signal perturbations. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 112(A12).

Pilipenko, V. A, Bravo, M. Romanova, N. V, Kozyreva, O. V, Samsonov, S. N, and Sakharov, Y. A. (2018), Geomagnetic and Ionospheric Responses to the Interplanetary Shock Wave of March 17, 2015. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. Sep2018, Vol. 54 Issue 5, p721-740. 20p.

Poulsen, W. L. (1991), Modeling of very low frequency wave propagation and scattering within the Earth-ionosphere waveguide in the presence of lower ionospheric disturbances, Ph.D. Thesis, Stanford University.

Q

Quentin Brissaud, Roland Martin, Raphaël F. Garcia, Dimitri Komatitsch, Finite-difference numerical modelling of gravito-acoustic wave propagation in a windy and attenuating atmosphere, *Geophysical Journal International Advance Access published April 4, 2016*.

R

Raulin, J.-P., Pacini, A. A., Kaufmann, P., Correia, E., & Martinez, M. A. G. (2006). On the detectability of solar X-ray flares using very low frequency sudden phase anomalies. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 68(9), 1029– 1035. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2005.11.004>.

Raulin, J. P, G. Trottet, M. Kretzschmar, E. L. Macotela, A. Pacini, F. C. P. Bertoni, and I. E. Dammasch (2013), Response of the low ionosphere to Xray and Lyman-a solar flare emissions, *J. Geophys. Res*, 118, 570–575, [doi:10.1029/2012JA017916](https://doi.org/10.1029/2012JA017916).

Bibliographie

Rémi BENACQUISTA Impact des structures du vent solaire sur les ceintures de radiation Terrestres, école doctorale et discipline ou spécialité ED SDU2E : Astrophysique, sciences de l'espace, planétologie, Toulouse/ ,jeudi 23 novembre 2017.

Robert Andrew Marshall, VERY LOW FREQUENCY RADIO SIGNATURES OF TRANSIENT LUMINOUS EVENTS ABOVE THUNDERSTORMS (2009), department of electrical engineering and the committee on graduate studies of stanford university in partial fulfillment of the requirements for the degree of doctor of philosophy, may22. 2008.

Roussev, Ilia I, Sokolov, Igor V.: 2006, in: Solar Eruptions and Energetic Particles, (eds.) Gopalswamy, N, Mewaldt, R, Torsti, AGU, Geophysical Monograph Series, 165, 89.

Rozhnoi, A, Shalimov, S, Solovieva, M, Levin, B, Hayakawa, M, & Walker (2012). Tsunami-induced phase and amplitude perturbations of subionospheric VLF signals. Journal of Geophysical Research, 117, A09313. <https://doi.org/10.1029/2012JA017761>.

Russell, C. T., The Solar Wind Interaction with the Earth's Magnetosphere: A Tutorial, IEEE Transactions on plasma Science, vol. 28, n°6, 1818-1830. 2000.

S

Salut, M. M, Abdullah, M, Graf, K. L, Cohen, M. B, Cotts, B. R. T, & Kumar, S. (2012), Long recovery VLF perturbations associated with lightning discharges, Journal of Geophysical Research, 117, A08311. <https://doi.org/10.1029/2012JA017567>.

Salut, M. M, Cohen, M. B, Ali, M. A. M, Graf, K. L, Cotts, B. R. T, & Kumar, S. (2013). On the relationship between lightning peak current and early VLF perturbations. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 118. <https://doi.org/10.1002/2013JA019087>.

Solène Le Bourdieu. Méthodes déterministes de résolution des équations de Vlasov-Maxwell relativistes en vue du calcul de la dynamique des ceintures de Van Allen. Modélisation et simulation. Ecole Centrale Paris, 2007. Français. [fftel-00146258/](https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00146258/).

Sonny Lion. Analyse multi-satellite et multi-échelle de la turbulence dans le vent solaire. Astrophysique [astro-ph]. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2016. Français. NNT :2016PA066353. [tel-01478328](https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01478328/).

T

Thomas Neil Davis T. Neil Davis, Masahisa Sugiura 1966, Auroral electrojet activity index AE and its universal time variations. Vol 71 N° 3 F FEBRUARY 1, 1966, <https://doi.org/10.1029/JZ071i003p00785>.

Todoroki, Y, S. Maekawa, T. Yamauchi, T. Horie, and M. Hayakawa, Solar flare induced D region perturbation in the ionosphere, as revealed from a short-distance VLF propagation path (2007), GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, VOL. 34, L03103, [doi:10.1029/2006GL028087](https://doi.org/10.1029/2006GL028087), 2007.

Bibliographie

Torkar, K. M, Friedrich, M, & Stauning, P. (1980), Evidence of coupling between auroral zone activity and mid-latitude absorption, *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics* 42, 183–188. [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(80\)90079-3](https://doi.org/10.1016/0021-9169(80)90079-3).

V

Verkhoglyadova, O. P, Wissing, J. M, Wang, S, Kallenrode, M. B. & Zank, G. P. (2016), Nighttime mesospheric hydroxyl enhancements during SEP events and accompanying geomagnetic storms: Ionization rate modeling and Aura satellite observations, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 121, 6017–6030. <https://doi.org/10.1002/2015JA022217>.

Voss, H. D, W. L. Imhof, M. Walt, J. Mobilia, E. E. Gaines, J. B. Reagan, U. S. Inan, R. A. Helliwell, D. L. Carpenter, J. P. Katsufakis and H. C. Chang, 1984, Lightning-induced electron precipitation, *Nature* vol.312 20/27 december 1984.

Voss, H. D, M. Walt, W. L. Imhof, J. Mobilia, and U.S. Inan, Satellite observations of lightning-induced electron precipitation. *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, VOL. 103, NO. A6, PAGES 11,725-11,744, JUNE 1, 1998.

W

Wait, J. R, and K. P. Spies (1964), *Characteristics of the Earth-Ionosphere Waveguide for VLF Radio Waves*, National Bureau of Standards, Tech. Note 300, Boulder, Colorado.

Y

Yeh, K. C, and C.H. Liu (1972), *Theory of Ionospheric Waves*, International Geophysics Series, Vol. 17, Academic Press. Editor J. Van Mieghem Royal Belgian Meteorological Institute, Uccle, Belgium.