



Université d'Oran 2
Faculté des Sciences de la Terre et de l'Univers
THESE

Pour l'obtention du diplôme de Doctorat en Sciences
En Sciences de la Terre

Analyse spectrale des données géodésiques (GPS) pour l'identification et l'interprétation des mouvements de terrain - Application aux précurseurs sismiques du littoral Oranais

Présentée et soutenue publiquement par :
M. TACHEMA Abdennasser

Devant le jury composé de :

SEDDIKI Abdelmadjid	Professeur	Université d'Oran 2	Président
NADJI Abdelmansour	Professeur	Université d'Oran 2	Rapporteur
BEZZEGHOUD Mourad	Professeur	Univ. Evora (Portugal)	Co-Rapporteur
MAHI Habib	Maître de Recherche	CTS-Arzew	Examineur
ZEROUAL Ibrahim	Maître-Conférence A	Centre Univ. Tindouf	Examineur
DEKKICHE Hicham	Maître de Recherche	CTS-Arzew	Examineur

Année 2020

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

﴿إِذَا زُلْزِلَتِ الْأَرْضُ زِلْزَالَهَا ۖ وَأَخْرَجَتِ الْأَرْضُ أَثْقَالَهَا ۖ﴾

سورة الزلزلة، الآية : ١-٢

“When the Earth is shaken with its earthquakes, and the Earth discharges its burdens”.

Surate: The Earthquake, verses: 1-2

﴿وَالسَّمَاءِ ذَاتِ الرَّجْعِ ۙ وَالْأَرْضِ ذَاتِ الصَّدْعِ ۙ﴾

سورة الطارق، الآية : ١١-١٢

“By the reflecting sky (atmosphere), reflects and transmits electromagnetic radiation of Earth, and faulting Earth (reach on crustal and cover Earth)”.

Surate: The Morning Star, verses: 11-12

صَدَقَ اللَّهُ الْعَلِيِّ الْعَظِيمِ

Je dédie ce travail à tous ceux qui me sont chers, surtout à :

*Mon très cher **Père** qui m'a aidé à devenir ce que je suis aujourd'hui. Vous êtes et vous resterez pour moi ma référence, la lumière qui illumine mon chemin.*

*Ma très chère **Mère** qui m'a entouré d'amour et d'affection. Vos sacrifices innombrables et votre dévouement firent pour moi un encouragement. Votre prière et votre bénédiction m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études.*

Mes parents : vous avez tout fait pour mon bonheur et sans vous rien n'aurait pu être fait. « Je vous serai reconnaissant toute ma vie. J'implore Allah, tout puissant, de vous accorder une bonne santé, bonheur et une longue vie ».

*Mon très cher frère **Yacine** et Mes très chères **Sœurs**. Je ne pourrais jamais imaginer la vie sans vous. Vous comptez énormément pour moi. Je prie Allah le tout puissant pour qu'il vous donne de bonheur, de prospérité et de réussites.*

*Ma très chère adorable **épouse**, merci infiniment d'être toujours à mes côtés. Merci aussi pour vos encouragements et votre patience; que Dieu nous accorde un avenir meilleur.*

*Ma perle, ma fille **Zahra Nesrine**. Ta venue au monde m'avait immensément comblée de bonheur et de joie. Ton sourire a été pour moi le meilleur encouragement que je puisse avoir. Qu'Allah te garde et te protège.*

À tous les membres de ma belle-famille sans aucune exception.

Mes chers collègues de l'Université d'Oran 2 et de l'Université de Tlemcen.

Et à tous mes camarades de prés et de loin.

Abdennasser TACHEMA

يُعالج موضوع بحثنا دراسة الاضطرابات الأيونوسفيرية التي تسبق النشاط الزلزالي و المُسجلة بواسطة المُحتوى الإلكتروني الكلي للطبقة الأيونوسفيرية. وعليه يهدف هذا العمل الى انشاء خرائط الغشاء الأيونوسفيري و محاكاة التنبؤ الزلزالي، استنادا على البيانات الجيوديسية/الجيوفيزيائية و على مبدأ الإقتران بين غلاف الأرض الصخري (ليثوسفير) والأغشية المؤينة للغلاف الجوي العلوي (الطبقة الأيونوسفيرية المتأينة F2). يُؤكد هذا البحث أن المساحة المشغولة بين هذين الغلافين تتكون من بنية متسقة، مُشعبة بالجزيئات النشطة (الإلكترونات بشكل أساسي) المسؤولة عن إرسال الموجات الكهرومغناطيسية بطريقة مُتسرعة و مُندفعة، الناتجة عن تكسر الصخور في باطن الأرض (المصدر الزلزالي)، عبوراً بالغلاف الجوي السفلي و طبقة الأيونوسفير. ونتيجة لذلك، يُصبح تتبع قياسات إشارة GPS-TEC مهمة حتى نتمكن من اكتشاف الحالات الشاذة الزلزالية-الأيونوسفيرية المُسجلة أثناء أي نشاط زلزالي (درجة 5 أو أكثر على سلم ريشر).

تستند طريقة بحثنا إلى دراسة البيانات الجيوديسية التي تم الحصول عليها مسبقاً من محطات GNSS و التي تغطي منطقة تتناسب مع مجال انتشار الموجات الزلزالية. بالنظر إلى أن عدد محطات GPS الدائمة الإرسال لا يزال يُمثل عائقاً لضمن المراقبة الإقليمية و بالنظر إلى التوزيع الغير متجانس لهذه المحطات على أقاليم دول غرب البحر المتوسط؛ لا تزال تغطية منطقة الغرب الجزائري (ناحية وهران) غير كافية من حيث البيانات الجيوديسية (البيانات و الرسائل الملاحة: Rinex). و بالتالي اضطررنا إلى فتح مجال بحثنا العلمي (التنبؤ الزلزالي) نحو عدة أحداث زلزالية في أقاليم مختلفة من العالم. فيما يتعلق بتطبيق هذا النهج على النطاق الإقليمي لشمالي غرب الجزائر، فمنا باستخدام عدة شبكات جيوديسية و جيوفيزيائية (IGS CRAAG, IGN, USGS) لإستغلال البيانات اللازمة مما سمح بإجراء دراسة تفصيلية للعديد من الهزات الأرضية ذات درجات متباينة: زلزالي الشريط الساحلي للغرب الجزائري: وهران 2008 و عين تموشنت 1999، البوران 2016، نيبال 2015 والعديد من الهزات التي ضربت شبه الجزيرة الإيطالية سنة 2016. تجدر الإشارة أن التحليل العلمي الدقيق لهذه الأحداث الزلزالية المُسجلة خلال الفترة الممتدة من 1999 إلى 2016، أتاح الحصول على نتائج تتوافق مع التنبؤ الزلزالي حيث حُددت المدة الزمنية التي سبقت الحدث الرئيسي ببضعة أيام إلى بضعة أسابيع. و علاوة على ذلك، فإن نتائج أخرى مُرتبطة بتمدج الهزات الإرتدادية تُؤكد وجود إرتباط و توافق جيد بين عدد هذه الهزات و عدد السلايف الزلزالية-الأيونوسفيرية. أخيراً، تُؤكد هذه الدراسة فرضية الإقتران بين غلاف الأرض الصخري و الطبقة الأيونوسفيرية والتي تسمح بالتنبؤ الزلزالي.

كلمات مفتاحية :

الشريط الساحلي للغرب الجزائري؛ سلايف الزلازل الأيونوسفيرية؛ إقتران: غلاف الأرض الصخري-الأيونوسفير؛ البيانات و الرسائل الملاحة لنظام التموضع العالمي؛ خرائط المحتوى الإلكتروني الكلي؛ قياسات الإشارة الجيوديسية.

Notre travail s'oriente particulièrement à l'étude des anomalies ionosphériques produites lors d'activité sismique enregistrées à la faveur du contenu électronique 'TEC' de la couche ionosphérique. L'objectif de la présente recherche est focalisé sur deux principaux axes : étudier les données géodésiques et géophysiques permettant de modéliser la membrane ionosphérique F2 'TEC-Mapping', et de développer une approche géodésique prédictive du risque sismique basée sur le couplage séismo-ionosphérique (lithosphère-ionosphère). Ce travail confirme que l'espace occupé entre ces deux enveloppes est formé par une consistante structure, saturée en électron-photons, assurant la transmission des ondes électromagnétiques générées lors de la nucléation sismique des roches en profondeur. De ce fait, le tracé du signal mesuré 'GPS_TEC' devient nécessaire pour détecter précisément le temps d'arrivée des anomalies ionosphériques pré-séismiques (précurseurs) engendrées lors d'une activité tellurique notable ($M_w \geq 5$) couvrant ainsi une aire déterminée selon l'ampleur du choc principal étudié. Le constat envisagé concernera l'efficacité de cette approche géodésique qui repose a priori sur des tests itératifs des données géodésiques obtenus des stations intégrant une superficie proportionnelle au champ de la propagation tellurique envisagée. Vu que le nombre des stations GNSS permanentes reste problématique pour assurer la surveillance territoriale selon la dimension des provinces géographiques étudiées et vu la non homogénéité de la répartition de ces stations sur la Méditerranée occidentale ; la couverture de l'Oranais reste insuffisante en matière de données GPS/GNSS (fichiers Rinex). Ces contraintes ont permis d'ouvrir le champ d'investigation, en termes de prévision sismique, sur plusieurs événements à l'échelle eurasiatique. Quant à l'application de cette approche à l'échelle régionale (Algérie Nord occidentale) nous soulignons l'intérêt d'utilisation de plusieurs métriques de réseaux : IGS, IGN, USGS et CRAAG pour l'acquisition de données des magnitudes séismiques et de données GPS qui ont permis l'étude détaillée de plusieurs événements de magnitudes modérées à majeures : événement affectant la marge littorale d'Oran 2008, Ain Témouchent 1999, Alboran 2016, Népal 2015 et les tremblements dévastateurs ayant affectés la péninsule Italienne en 2016. L'analyse minutieuse de ces séismes, enregistrés durant la période 1999-2016, a permis d'obtenir des résultats conséquents à la prévision sismique où le délai de temps (prévisionnel) est de l'ordre de quelques jours à quelques semaines précédant le choc principal. Par ailleurs, d'autres résultats basés sur la modélisation d'occurrence des répliques séismiques ont révélé l'existence d'une forte corrélation entre les précurseurs séismo-ionosphériques et les répliques. Ce fait s'adapte mieux avec la ponctualité éventuelle de la réponse ionosphérique aux variations spectrales. Enfin, cette étude confirme l'hypothèse du couplage entre l'enveloppe lithosphérique et ionosphérique permettant de prédire les tremblements de terre imminents au-dessus des régions séismogènes.

Mots clés

Marge littorale de l'Ouest algérien; Précurseurs séismo-ionosphériques; Couplage séismo-ionosphérique; Fichiers Rinex; GPS/GNSS; Contenu électronique total; Signal GPS_TEC; TEC-Mapping.

This work is particularly aimed for studying the ionospheric anomalies produced during seismic activity recorded through the ionospheric total electron content 'TEC'. The purpose of this research is focused on two axes : investigate both geodetic and geophysical data that allows modeling the F2 ionospheric membrane 'TEC-Mapping', and develop a predictive geodetic approach to seismic hazard based on the seismo-ionospheric coupling (lithosphere-ionosphere). This study confirms that the occupied space between these two elements consists of a coherent structure, saturated with electron-photons, ensuring the transmission of electromagnetic waves generated during the seismic nucleation of rocks at depth. Therefore, the analysis of the measured GPS_TEC signal becomes necessary to accurately detect the arrival time of pre-earthquake ionospheric anomalies (precursors) generated during a notable seismic activity ($M_w \geq 5$). The intended finding will concern the effectiveness of this geodetic approach which is based a priori on iterative tests of geodetic data derived from permanent ground-based GNSS stations ; with an area proportional to the field of the seismic wave propagation. Given that the GPS network density remains problematic for providing territorial monitoring and given the non-homogeneous distribution of these stations over the southwest Mediterranean ; the nationwide coverage of GPS/GNSS data (RINEX files), including the Oran region, remains lacking. These constraints have allowed extending the field of our investigation, in terms of seismic prediction, into several earthquakes on a Eurasian area. Regarding the application of this approach to the northwestern region of Algeria, we underline the interest of using several networks : IGS, IGN, USGS and CRAAG to obtain metadata which enabled to study several events ; such as the 2008 Oran earthquake, 1999 Ain Témouchent, 2016 Alboran, 2015 Nepal and several devastating tremors that affected the Italian peninsula in 2016. Thorough analysis of these moderate to major earthquakes, recorded during 1999-2016, highlighted significant results in terms of seismic prediction where the time-span (forecast) ranges from a few days to a few weeks preceding the main event. Furthermore, other results based on the modeling of seismic aftershocks occurrence have revealed a strong correlation between seismo-ionospheric precursors and aftershocks. Finally, this work can be considered a useful approach to predict the impending earthquakes through the ionospheric status above seismogenic regions.

Keywords

Coastal margin of Western Algeria; Seismo-ionospheric precursors; Seismo-ionospheric Coupling; Rinex files; GPS/GNSS; Total electron content; GPS_TEC signatures; TEC-Mapping.

« *Celui qui ne remercie pas Allah ne remercie pas les gens* »
Le Prophète Mohammed (que Dieu le bénisse et le salue)

*Je tiens tout d'abord à remercier **Allah exalté soit-Il** pour Sa faveur, Sa grâce et de m'avoir donné le courage et la patience pour mener à bien ce modeste travail, qu'il soit béni et glorifié.*

*Au terme de ce travail, je pense tout naturellement à remercier mon Directeur de thèse, Monsieur **Abdelmansour Nadji**, Professeur à l'Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed, de son professionnalisme et ses encouragements qui m'ont donné envie d'aller jusqu'au bout. Je le remercie aussi pour ses conseils constructifs qui m'ont permis de m'élever scientifiquement. Il a toujours fait le maximum pour m'offrir les meilleures conditions possibles pour effectuer ce travail et m'intégrer avec les autres chercheurs au sein du laboratoire de Recherche 'Géoressources, Environnement & Risques Naturels (Georen-Univ. Oran2), dont je suis membre.*

*Je tiens également à remercier mon co-rapporteur M. **Bezzeghoud M.**, Sismologue à l'université d'Évora-Portugal et M. **Sebane A.** le Doyen de la Faculté des Sciences de la Terre et de l'Univers ainsi que tous les membres du laboratoire 'Georen'.*

*Je souhaite exprimer ma gratitude aux membres du jury, pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail. Je tiens à remercier tout particulièrement M. **Seddiki A.**, Professeur à l'Université d'Oran2, d'avoir accepté et fait l'honneur de présider ce jury.*

*Mes remerciements s'adressent aussi à MM., **Mahi H.**, **Zeroual I.** et **Dekkiche H.** d'avoir accepté d'examiner et de juger ce travail.*

*Je voudrais remercier également les chercheurs de renommée internationale dans le domaine des sciences géodésiques/géophysiques, spécialement MM. **Ouzounov D.** (Chapman University, USA), **Maggert D.** (IGS Network Coordinator), **Garmond T.** (IGN Paris), **Freund F.** (NASA Ames Research Center), **Boudjada M.Y.** (Austrian Academy of Sciences), **Pulinets S.A.** (Russian Space Research Institute), **Zolotov O.V.** (Murmansk Arctic State University, Russie), **Namgaladze A.** (Murmansk State Technical University, Russie), **Denisenko V.V.** et Mme. **Zakharenkova I.** (Russian Academy of Sciences) et **Parrot M.** (LPC2E/CNRS, France) pour la documentation mise à ma disposition et pour le temps qu'ils ont consacré à répondre à mes messages.*

*Je remercie aussi M. **Carreño H.E.**, Directeur de la Red Sismica Nacional de m'avoir accueilli à l'Instituto Geográfico Nacional (IGN-Madrid), la sismologue Mme. **Gaite B.C.**, le Géodésien M. **Puente V.** et M. **Herraiz M.** professeur à Complutense University of Madrid.*

De même, le soutien et l'affection de ma famille permet de galvaniser la motivation et ainsi d'avancer toujours plus loin. Mes parents, mon frère, mes sœurs et ma femme, qui n'ont jamais cessé de croire en moi et m'ont toujours encouragé. Je leur exprime pour cela tout mon amour et ma profonde gratitude.

Je n'oublie évidemment pas tous mes collègues de ma promotion de Doctorat et de Magister.

Abdennasser Tachema

<i>Dédicaces</i>	<i>i</i>
<i>ملخص</i>	<i>ii</i>
<i>Résumé</i>	<i>iii</i>
<i>Abstract</i>	<i>iv</i>
<i>Remerciements</i>	<i>v</i>
<i>Table des matières</i>	<i>vi</i>
<i>Liste des figures</i>	<i>x</i>
<i>Liste des tableaux</i>	<i>xiv</i>
<i>Acronymes</i>	<i>xv</i>
<i>Notations & Symboles</i>	<i>xvii</i>
<i>Introduction Générale</i>	<i>1</i>

Chapitre I : Effets ionosphériques sur les signaux GNSS

Introduction	4
I.1 Les signaux GNSS	5
I.1.1 Le système américain, GPS.....	5
I.1.2 Le système russe, GLONASS	6
I.1.3 Le système européen, Galileo	7
I.1.4 Le système chinois, Beidou.....	8
I.2 Modélisation des observations GPS	9
I.2.1 Mesure de code (pseudo-distance)	9
I.2.2 Mesure de phase.....	10
I.2.3 Formation de différences.....	11
I.3 Stratégies d'analyse des observations GPS	14
I.3.1 La combinaison Ionosphere-Free L_3	14
I.3.2 La combinaison Geometry-Free L_4	15
I.3.3 La combinaison Wide-Laning L_5	15
I.3.4 La combinaison Melbourne-Wübbena L_6	16
I.4 Description physique du spectre ionosphérique	17
I.4.1 Concept de la formation ionosphérique.....	18
I.4.2 Les strates ionosphériques.....	19
I.4.2.1 La région D	20
I.4.2.2 La région E.....	20
I.4.2.3 La région F	21
I.4.3 Champ magnétique terrestre.....	22
I.5 Variabilités du taux ionosphérique	24
I.5.1 Variation diurne	24
I.5.2 Variation latitudinale.....	24
I.5.3 Activité undécennale solaire	25

I.6 Techniques de contrôle de l'activité ionosphérique	27
I.6.1 Les sondages ionosphériques	28
I.6.1.1 Les ionosondes.....	28
I.6.1.2 Le sondeur Doppler.....	30
I.6.2 Le Riomètre	31
I.6.3 Le Radar.....	31
I.6.4 Global Positioning System, GPS.....	32
I.6.5 DEMETER.....	32
I.7 Réfraction ionosphérique du signal GPS.....	35
I.7.1 Vitesse de groupe et vitesse de phase	35
I.7.2 Le retard ionosphérique.....	36
I.8 Effets ionosphériques sur les signaux GNSS	39
I.8.1 Effet de l'orage ionosphérique	39
I.8.2 Effet de l'orage magnétique	40
I.8.3 Effet de la scintillation	40
Conclusion	41
Chapitre II : Principe du couplage séismo-ionosphérique	
Introduction	42
II.1 Avènement séismique et structure de la Terre	43
II.1.1 Les plaques tectoniques	44
II.1.2 Les ondes sismiques	44
II.1.3 Concepts de la nucléation séismique.....	46
II.2 Peut-on prédire un séisme ?	47
II.2.1 Introduction de la prévision des précurseurs séismiques.....	48
II.2.1.1 Surveillance et évaluation des sources sismiques	49
II.2.1.2 Perspectives de la déformation du milieu et la mesure instrumentale	49
II.2.2 Observations naturelles des phénomènes précurseurs	51
II.2.2.1 Secousses prémonitoires.....	51
II.2.2.2 Anisotropie	51
II.2.2.3 Hydrogéochimie, émission de gaz et surveillance de la nappe phréatique.....	52
II.2.2.4 Comportement anormal d'animaux.....	56
II.3 Indices des précurseurs séismo-ionosphériques	58
II.4 Mécanisme des modèles de couplages dynamiques	61
II.4.1 Couplage Lithosphère-Atmosphère-Ionosphère (CLAI)	61
II.4.2 Couplage Terre solide-Atmosphère	63
Conclusion	65

Chapitre III : Prévion de l'activité séismique par l'analyse et interprétation des données 'TEC'*Partie I : Modélisation Ionosphérique*

Introduction	66
III.1 Détermination du délai ionosphérique	67
III.2 Approche méthodologique de la configuration cartographique du TEC	71
III.2.1 Prétraitement des données GPS	71
III.2.2 Organigramme de calcul du paramètre TEC.....	73
III.2.3 Extraction du TEC sous l'environnement MATLAB®	74
III.2.3.1 Types de données et programmes utilisés.....	75
III.2.3.2 Interpolation de l'information ionosphérique	75
III.2.3.3 Cartes thématiques de l'ionosphère à l'échelle locale	77

*Partie II : Détection des précurseurs séismo-ionosphériques par GPS**Étude des évènements séismiques de l'Italie (octobre 2016, $M_w \geq 6.1$)*

Introduction	79
III.3 Problème de données liées à la couverture géodésique locale	80
III.4 Présentation de la région d'étude et du TEC-Mapping	82
III.4.1 Situation géographique des évènements séismiques étudiés	82
III.4.2 Procédé envisagé à la cartographie ionosphérique (TEC-Mapping)	83
III.5 Résultats d'analyse spectrale de la membrane ionosphérique	88
III.6 Interprétation des résultats obtenus	91
III.6.1 Mécanismes physiques de pointée des précurseurs séismo-ionosphériques.....	91
III.6.2 Variations des paramètres de l'atmosphère terrestre.....	92
III.6.3 Réponse du TEC aux activités solaire et géomagnétique.....	94
Conclusion	96

Chapitre IV : Etude des évènements séismiques de différentes tailles et validation des résultats

Introduction	97
IV.1 Zonage sismogénique	97
IV.1.1 Zone I (Oran-Beni Chougrane-Ain Témouchent).....	97
IV.1.2 Zone II (Bassin de Cheliff).....	98
IV.2 Séisme d'Ain Témouchent, 22 décembre 1999 ($M_w = 5.7$)	99
IV.3 Précurseurs séismo-ionosphériques liés à l'évènement tellurique d'Ain Témouchent	101

IV.3.1 Rapport de la réponse du signal trans-ionosphérique et interprétation séismo-ionosphérique ..	104
Conclusion	109
IV.4 Activité séismique de l'Oranais, 06 juin 2008 ($M_w = 5.5$)	110
IV.4.1 Mécanismes focaux de l'évènement d'Oran.....	112
IV.4.2 TEC-Mapping	113
IV.5 Résultats d'analyse spectrale de la membrane ionosphérique.....	116
Conclusion	122
Conclusion Générale et Perspectives	124
Références Bibliographiques	127
Annexes.....	148

Chapitre I : Effets ionosphériques sur les signaux GNSS

Figure I-1 Principe de la simple différence.....	11
Figure I-2 Principe de la double différence	12
Figure I-3 Principe de la triple différence.....	13
Figure I-4 Domaines du spectre électromagnétique.....	17
Figure I-5 Cas d'ionisation d'une molécule d'oxygène due au rayonnement solaire	18
Figure I-6 Profil altimétrique de densité électronique et gamme d'altitude des couches ionosphériques	19
Figure I-7 Profils ionosphériques diurne et nocturne.....	22
Figure I-8 Principales régions géographiques de l'ionosphère	25
Figure I-9 Progression du nombre de taches solaires des 23, 24 et 25 ^{ème} cycles solaires. Données observées jusqu'en juin 2020	26
Figure I-10 Principe de calcul du contenu électronique total ionosphérique	27
Figure I-11 Principe de l'ionosonde	28
Figure I-12 Réseau universel des stations ionosphériques.....	30
Figure I-13 Principe du sondeur Doppler	30
Figure I-14 DEMETER (110Kg, H < 710Km, Orbite presque polaire)	33
Figure I-15 Eruption solaire intense	39
Figure I-16 Niveaux-G (mineure à extrême activité) des tempêtes géomagnétiques. G0 (activité très basse) correspond à Kp=[0-4].....	40

Chapitre II : Principe du couplage séismo-ionosphérique

Figure II-1 Juxtaposition des couches à l'intérieur du globe terrestre	43
Figure II-2 Représentation schématique des différents types de failles	44
Figure II-3 Déplacement des particules d'un milieu à travers lequel se propagent les ondes sismiques : P, S, L et R	45
Figure II-4 Processus de libération du gaz Radon dans l'air.....	53
Figure II-5 Évolution de la teneur en radon dans l'eau minérale thermique du bassin hydrographique de Tachkent dans la zone de l'épicentre du séisme le 26 avril 1966	53
Figure II-6 Données de concentration de radon au puits (17m de profondeur) dans la partie sud de la ville de Nishinomiya, préfecture de Hyogo, Japon.....	54
Figure II-7 Taux de radon observé par la station de Coppito (AQ) du 3 avril au 6 avril 2009	55
Figure II-8 Dispositif de mesure GPS	59
Figure II-9 Présentation schématique du concept du mécanisme dynamique pré-séismique : Couplage Lithosphère-Atmosphère-Ionosphère et Couplage Terre solide-Atmosphère	64

Chapitre III : Prévision de l'activité séismique par les dérivées de la variante 'TEC'

Figure III-1	Approximation sphérique du modèle ionosphérique monocouche avec définition des points ionosphériques (IP) et sub-ionosphériques (SIP)	67
Figure III-2	Triangle sphérique formé par le Pôle Nord N, le récepteur Rc et le point IP	69
Figure III-3	Organigramme d'estimation du TEC et d'identification des précurseurs séismo-ionosphériques	73
Figure III-4	Grille d'interpolation utilisant les plus proches valeurs du TEC, $TEC_{i,j}$	76
Figure III-5	Variation diurne et nocturne du TEC ionosphérique au-dessus de l'Algérie, 16 Oct. 2016	78
Figure III-6	Manque accru des références stationnaires (IGS) en continent africain, y compris le territoire algérien. La zone d'investigation est indiquée par le rectangle rouge	80
Figure III-7	Carte épicentrale séismique des Apennins centraux (Italie) : Norcia, 30 octobre 2016 ($M_w = 6.6$) ; Ussita, 26 octobre 2016 ($M_w = 6.1$) et Amatrice 24 août 2016 ($M_w = 6.2$). Le foyer principal est indiqué en rouge.....	82
Figure III-8	Distribution géographique des stations IGS (▲) et la position de l'épicentre du séisme (★).....	84
Figure III-9	Modèle local d'évolution journalière de la cartographie chromatique des valeurs TEC (� 12H), représentative de la période (01-09-13-16-21-26-29-30 octobre 2016) de la péninsule italienne à 350 km d'altitude au-dessus de la terre. Le triangle rouge représente la position des stations IGS et l'étoile rouge représente la position de l'épicentre du séisme.	86
Figure III-10	Trace des enregistrements physiques (TEC) des précurseurs séismiques (26 sept. 2016 – 10 nov. 2016). Le cercle rouge représente les variations anormales du TEC; le moment du séisme est désigné par une ligne verticale rouge	88
Figure III-11	Interprétation de la coda du signal ionosphérique relative au séisme de Norcia ($M_w = 6.6$, 30 octobre 2016). Le cercle rouge représente les variations anormales du TEC et le moment du séisme est désigné par une ligne verticale rouge	89
Figure III-12	Variations de la série chronologique du TEC au-dessus de l'Italie centrale (Norcia : 42,84� N, 13,11� E) sous une activité sismique calme et une activité géomagnétique agitée.	94
Figure III-13	Cycle actuel de 11 ans des tâches solaires, de janvier 2000 à janvier 2019.....	95

Chapitre IV : Etude des évènements sismiques de différentes tailles et validation des résultats

Figure IV-1 Zonage sismique du Nord–Occidental de l’Algérie (Oranie). Les ballons de plage représentent les solutions des mécanismes focaux des principaux séismes qui ont secoué le littoral 98

Figure IV-2 Carte épacentrale sismique du séisme d’Ain Témouchent 22 décembre 1999 ($M_w = 5.7$, 17h:57mn:13s UTC / TL : +1H) et sa principale réplique ($M_w = 4.6$) 99

Figure IV-3 Trace d’enregistrement chronique du TEC (15 sep. 1999 – 01 fév. 2000) relative aux précurseurs sismiques de l’évènement tellurique d’Ain Témouchent ($M_{5.7}$, 22.12.1999). La ligne verticale bleue désigne l’instant t_0 du séisme 102

Figure IV-4 Taux de variation du contenu en électrons libres : Avant, Pendant et Après le séisme d’Ain Témouchent 22 Déc. 1999 ($M_{5.7}$). Les marques elliptiques et les limites en verts, représentent respectivement les variations anormales du TEC (pics) et la polarisation du signal GPS_TEC 105

Figure IV-5 Corrélation entre (a) les mesures terrestres (sismogrammes), et (b) les mesures de la géodésie spatiale (satellites GPS) 106

Figure IV-6 Distribution spatiale des répliques sismiques liées au tremblement de terre d’Ain Témouchent (22.12.1999, $M_w = 5.7$). Le cercle rouge indique l’évènement principal 108

Figure IV-7 Localisation et distribution des répliques, environ 60 km de long, relatives à l’évènement d’Oran (06.06.2008, $M_w = 5.5$) 111

Figure IV-8 Trace du signal sismique relatif à l’évènement principal $M_w = 5.5$, temps origine : 20h 02mn 56,0s 112

Figure IV-9 Carte épacentrale sismique et mécanismes focaux relatifs à l’évènement d’Oran 2008, le foyer principal est en rouge 113

Figure IV-10 Localisation des stations GNSS méditerranéennes permanentes, près de l’épicentre.... 114

Figure IV-11 Cartographie régionale du TEC ionosphérique (couche F2) au-dessus de l’Algérie Nord Occidentale, représentative des périodes Pré-, Co et Post sismique de l’évènement d’Oran 06.06.2008, $M_w = 5.5$. (a): Comportement ionosphérique normal à 14H. (b): Augmentation anormale du TEC à 06H et 08H (16j avant le choc principal). Le triangle et l’étoile rouge représentent respectivement la position des stations IGS et la position de l’épicentre du séisme. 115

Figure IV-12 Variations de la série chronologique du TEC au-dessus de la ville d’Oran (Séisme d’Oran: 35.883° N, 0.658° W) sous (a) une activité sismique calme et (b) une activité géomagnétique agitée..... 117

Figure IV-13 Les taches solaires et le cycle d’activité solaire durant la période 2000-2010 (sidc.oma.be/silso/home). La ligne rouge en pointillée indique le jour de l’évènement sismique étudié 118

Figure IV-14 (a) Diagramme de variation de la série chronologique du TEC de l’évènement d’Oran (35.883° N, 0.658° W). (b) Activité géomagnétique extrêmement faible (Phase minimale solaire).... 120

Annexes

Figure A.1 Fenêtre principale de RTKGET.....	149
Figure A.2 Téléchargement de données par RTKGET.....	149
Figure A.3 Distribution géographiques des stations IGS & IGN exploitées.....	150
Figure C.1 Valeurs tri-horaires de l'indice Kp, 20 mai 2008, calme activité magnétique.....	156
Figure C.2 Valeurs tri-horaires de l'indice Kp, 15 mai 2005, forte activité magnétique.....	156
Figure D.1 Extrait d'un fichier d'observation RINEX version 2.0.....	159
Figure D.2 Extrait d'un message de navigation RINEX version 2.0.....	160
Figure E.1 Paramètres de l'orbite d'un satellite (éléments Képlériens).....	161
Figure F.1 Le réseau IGS.....	164
Figure F.2 La répartition des sites DORIS, SLR et VLBI et leurs co-localisations avec GNSS.....	165
Figure G.1 Sismicité historique et instrumentale de la région Algérie Nord-occidentale, période: 1790-2019 (source: catalogues du CRAAG, IGN et USGS). Traitement: Logiciel ArcGIS 10.2.2.....	167
Figure G.2 Schéma sismotectonique et distribution des évènements séismiques selon la profondeur hypocentrale de la région Algérie Nord-occidentale (Plaque africo-ibérique), période: 1941-2019. (Catalogues du CRAAG, IGN et USGS). Les flèches indiquent le régime de contraintes de surfaces. TLM: Tlemcen, ATM: Ain Témouchent, SBA: Sidi Belabès, ORN: Oran, MOS: Mostaganem, CHF: Chlef.....	168

Chapitre I : Effets ionosphériques sur les signaux GNSS

Tableau I-1 Signaux du système GPS	6
Tableau I-2 Caractéristiques des principaux systèmes globaux de navigation.....	8
Tableau I-3 Caractéristiques des combinaisons linéaires des phases porteuses	16

Chapitre III : Prévision de l'activité sismique par les dérivées de la variante 'TEC'

Tableau III-1 Séismes étudiés pour l'analyse des précurseurs séismo-ionosphériques par la variante TEC.....	82
---	----

Chapitre IV : Etude des évènements sismiques de différentes tailles et validation des résultats

Tableau IV-1 Informations relatives à l'évènement d'Ain Témouchent (M5.7) recueillies par différentes institutions	100
Tableau IV-2 Inventaire des principales répliques sismiques (évènement d'Ain Témouchent, M5.7, 22.12.1999)	107
Tableau IV-3 Sismicité de l'évènement d'Oran avec ses principales répliques	111

Annexes

Tableau A.1 Description et localisation géographique des stations GNSS (IGS & IGN) permanentes exploitées pour modéliser le TEC ionosphérique	151
Tableau B.1 Liste détaillé des répliques sismiques de l'évènement principal d'Oran 06 juin 2008, $M_w = 5.5$	154
Tableau C.1 Valeurs définitives de l'indicateur des perturbations du champ géomagnétique, Kp	157
Tableau D.1 Fichier de navigation : section de données	160
Tableau E.1 Paramètre du système géodésique mondial WGS84.....	162
Tableau E.2 Ephémérides diffusées par un satellite GPS	162
Tableau E.3 Etapes de calcul des coordonnées d'un satellite GPS dans le système WGS84	163
Tableau G.1 Évènements sismiques affectant la région occidentale de l'Algérie (du XVIIIe au XXIe siècle), donnée par différentes institutions sismologiques	169

- ADSN.** Algerian Digital Seismic Network
- AGW.** Acoustic/Atmospheric Gravity Wave
- AIUB.** Astronomical Institute of the University of Berne, Suisse
- ASCII.** American Standard Code for Information Interchange
- BDS.** BeiDou Navigation Satellite System
- BGS.** British Geological Survey
- CGCS.** China Geodetic Coordinate System
- CLAI.** Couplage Lithosphère-Atmosphère-Ionosphère
- CME.** Coronal Mass Ejections
- CNES.** Centre National d'Etudes Spatiales
- Code C/A.** Coarse Acquisition code
- Code M.** Military code
- Code P.** Precise code
- COE.** Classical Orbital Elements
- CORS.** Continuously Operating Reference Stations
- CRAAG.** Centre de Recherche en Astronomie Astrophysique et Géophysique, Algérie
- DC.** Direct Current
- DCB.** Differential Code Biases
- DEMETER.** Detection of Electro-Magnetic Emissions Transmitted from Earthquake Regions
- DORIS.** Doppler Orbitography and Radio Positioning Integrated by Satellite
- DOY.** Day Of Year
- Dst.** Disturbance Storm Time
- ECEF.** Earth-centered, Earth-fixed
- EIA.** Equatorial Ionization Anomaly
- ELF.** Extremely Low Frequency
- EMSC.** European-Mediterranean Seismological Centre
- EOF.** Empirical Orthogonal Functions
- ERGNSS.** Estaciones de Referencia GNSS
- ESA.** European Space Agency
- ETHZ.** Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Suisse
- EUV.** Extrême ultraviolet
- FM.** Frequency Modulation
- FTP.** File Transfer Protocol
- GAMIT/GLOBK.** GNSS at MIT/Global Kalman filter
- GEC.** Global Electric Circuit
- GFZ.** GeoForschungsZentrum, Allemagne
- GLONASS.** GLOBal'naya NAVigatsionnaya Sputnikovaya Sistema
- GNSS.** Global Navigation Satellite System
- GPS.** Global Positioning System
- GRS80.** Geodetic Reference System 1980
- GTRF.** Galileo Terrestrial Reference Frame
- HARV-CMT.** Harvard, Centroid Moment Tensor
- HAS.** High Accuracy Service
- HF.** High Frequency
- HSSWS.** High Speed Solar Wind Stream
- HTTP.** Hypertext Transfer Protocol
- IGN.** Instituto Geográfico Nacional, Espagne
- IGS.** International GNSS Service
- IGSO.** Inclined Geosynchronous Orbits
- INCT.** Institut National de Cartographie et de Télédétection, Algérie
- INGV.** Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Italie
- InSAR.** Interferometric Synthetic Aperture Radar
- IP.** Ionospheric point
- IPGP.** Institut de Physique du Globe de Paris, France
- IRIS.** Incorporated Research Institutions for Seismology

IRNSS. Indian Regional Navigation Satellite System	SBAS. Satellite-Based Augmentation System
ISC. International Seismological Centre	SED. Service Sismologique, Suisse
ITRF. International Terrestrial Reference Frame	SFU. Solar Flux Units
ITRS. International Terrestrial Reference System	SHF. Spherical Harmonics Functions
LEO. Low Earth Orbit	SIP. Sub-Ionospheric Point
LLR. Lunar Laser Ranging	SLM. Single Layer Model
LT. Local Time	SLR. Satellite Laser Ranging
MATLAB. MATrix LABoratory	SOHO. Solar and Heliospheric Observatory
MEO. Medium Earth Orbit	SOPAC. Scripps Orbit and Permanent Array Center
MIT. Massachusetts Institute of Technology, États-Unis	SSN. Sunspot Number
NOAA. National Oceanic and Atmospheric Administration, États-Unis	STEC. Slant Total Electron Content
ORB. Observatoire Royal de Belgique	TEC. Total Electron Content
PRARE. Precise Range and Range-rate Equipment	TECU. TEC Unit
PRS. Public Regulated Service	UCSD. Université de California San Diego, États-Unis
PZ-90. Parametry Zemli 1990	UNAVCO. The University NAVSTAR Consortium, États-Unis
QZSS. Quasi Zenith Satellite System	ULF. Ultra Low frequency
REALSAS. Réseau Algérien de Surveillance et d'Alerte Sismique	USGS. United States Geological Survey
RINEX. Receiver INdependent EXchange Format	UTC. Universel Temps Coordonné
	VHF. Very High Frequency
	VLBI. Very Long Baseline Interferometry
	VLF. Very Low Frequency
	VTEC. Vertical Total Electron Content
	WGS84. World Geodetic System 1984

- c : vitesse de lumière dans le vide, 299792458.0 m/s
- λ , ϕ : longitude et la latitude géographique
- f_0 : fréquence fondamentale du signal GPS, $f_0 = 10.23$ MHz
- $L1$, $L2$: mesure de phase de la porteuse en mètre, Link 1 et Link 2, respectivement
- $L5$: Link 5, est modulée par les deux codes I et Q en mètre
- M , $L2C$: code militaire et le code civil, respectivement
- f_{L1} , f_{L2} : fréquence de signal porteuse L1 et L2, (1575.42 MHz et 1227.60 MHz)
- λ_{L1} : longueur d'onde de la porteuse L1, ≈ 19 cm
- λ_{L2} : longueur d'onde de la porteuse L2, ≈ 24.4 cm
- λ_{L5} : longueur d'onde de la porteuse L5, ≈ 25.48 cm
- λ_{L3} : longueur d'onde de la Combinaison Linéaire (CL) ionosphere-free, ≈ 10.7 cm
- λ_{L4} : longueur d'onde de la CL geometry-free, ≈ 5.4 cm
- λ_{L5} : longueur d'onde de la CL wide-lane, ≈ 86.6 cm
- ϵ_0 : permittivité du vide, $= 8.85418782 \times 10^{-12}$ farad/m
- e : charge d'un électron, $= 1.6021 \times 10^{-19}$ Coulomb
- m_e : masse d'un électron, $= 9.1083 \times 10^{-28}$ g
- ϵ : excentricité numérique, $= 0.006694379990197$
- ω : vitesse angulaire de rotation de la Terre, $= 7.292115147 \times 10^{-5}$ rad/s
- R : rayon moyen de la terre, ≈ 6378 Km
- a : rayon équatorial de la Terre ou demi-grand axe= 6 378 137 m
- f : aplatissement de la Terre, $= 1/298.257223563$
- e : 1^{ère} excentricité, $= 8.1819190842622 \times 10^{-2}$
- e' : 2^{ème} excentricité, $= 8.2094437949696 \times 10^{-2}$
- **TECU** : unité du contenu électronique total, $1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ e}^-/\text{m}^2$
- N_e : densité électronique en e^-/m^3
- N : ambiguïté entière en cycle
- I : paramètre du retard ionosphérique en mètre
- f_p ou f_c : fréquence plasma en MHz
- E_s : couche E sporadique

Introduction Générale

En domaine de la sismologie, tout évènement sismique débute généralement par une déformation crustale (profonde) qui se propage vers la surface terrestre (déplacement brusque du sol) à la faveur de propagation des ondes sismiques primaires et secondaires. Ces dernières génèrent à la fois des basses fréquences sonores et des mouvements de cisaillement tardifs (vibrations). Ce déplacement génère une onde acoustique qui s'amplifie plusieurs milliers de fois en se propageant, vers le haut, à la verticale ascendante sous la zone ionisée de l'atmosphère terrestre (entre 50 et 1000 km d'altitude) provoquant ainsi des anomalies ionosphériques détectables en analysant les signaux radioélectriques émis par les satellites GPS/GNSS. En effet, il existe une membrane de forte densité d'ions et d'électrons libres qui représente un écran réflecteur d'écho ionosphérique (plasma), dite la couche F2 (à environ 350 km d'altitude). De ce fait, il sera utile de substituer l'enregistrement terrestre par la résonance du paramètre physique 'TEC ionosphérique' pour pouvoir identifier les pointées des précurseurs sismiques. Ainsi, cette thèse porte sur l'étude et l'analyse des précurseurs sismiques en matière des perturbations anormales de la membrane ionosphérique (sismologie ionosphérique), toute en se basant sur une approche géodésique établie principalement sur le calcul paramétrique du contenu électronique total 'TEC' et de la densité en électrons libres de la couche ionosphérique.

La recherche que nous présentons dans cette thèse est orientée pour atteindre deux principaux objectifs: établissement d'une cartographie spatio-temporelle du TEC ionosphérique permettant de détecter des signaux précoces de perturbations de la haute atmosphère ionisée liées aux tremblements de terre de magnitude notable ($M_w \geq 5$) ; et développement d'une approche géodésique prédictive des évènements telluriques basée sur le couplage séismo-ionosphérique relatif aux membranes lithosphère-ionosphère.

Pour atteindre ces objectifs, nous avons pris en compte la majeure problématique liée à la couche ionosphérique ; qui s'influence par d'autres phénomènes externes, principalement l'activité solaire et l'activité géomagnétique. D'où la nécessité de séparer la réponse du TEC ionosphérique liée à ces phénomènes saisonniers et aux mouvements du sol. En outre, des algorithmes et des programmes sont développés pour le traitement de données de l'information géodésique et la modélisation du paramètre ionosphérique TEC en utilisant les données d'observations de plusieurs stations permanentes GPS/GNSS bi-fréquences du réseau mondial IGS et du réseau espagnol ERGNSS/IGN.

En phase de traitement d'information nous avons utilisé la série chronologique du signal GPS pour l'échantillonnage discrétisé du temps (un pas de 30 secondes), suivi d'un dépouillement spécifique des phases du signal GPS. Ainsi, le diagramme GPS_TEC obtenu nous a permis de dresser la chronique des variations relatives au contenu électronique de l'atmosphère ionisée et qui reflètent les perturbations énergétiques de l'asthénosphère régionale. Ces dernières sont argumentées à la faveur d'une série de cartes thématiques, globales et régionales, dites 'TEC-Mapping'. L'analyse minutieuse des variations du TEC ionosphérique, par le traitement géodésique des données spatiales GPS/GNSS (au format d'échange Rinex: Observation-files et Navigation-files), avant l'arrivée des événements sismiques devient alors une nécessité primordiale afin de les prédire et donc d'éviter des dégâts matériels et surtout de sauver des vies. Ainsi, l'étude des signes annonciateurs séismo-ionosphériques à partir des observations spatiales, nous a conduit à structurer cette thèse en quatre principaux chapitres :

Comme l'ionosphère est considérée parmi les régions de l'atmosphère terrestre la plus influente sur la propagation des signaux des systèmes de navigation mondiaux (GPS, GLONASS, Galileo, Beidou, etc.), nous consacrons le premier chapitre à la description détaillée de la couche ionosphérique et ses effets sur le trajet des signaux GNSS. Une attention plus particulière est portée sur les différentes techniques, spatiales et terrestres, de mesure et de sondage ionosphérique afin de mieux contrôler les variabilités spatio-temporelles de cette couche perturbatrice.

Nous présentons ensuite, dans le deuxième chapitre, les principaux phénomènes physico-chimiques ainsi que les perturbations ionosphériques détectées bien avant l'arrivée des événements sismiques dans une région donnée. Et afin d'appréhender l'origine de l'interaction des activités telluriques avec la haute atmosphère ionisée, nous exposerons les mécanismes physiques des couplages dynamique des différentes membranes (Asthénosphère Lithosphère, Atmosphère, Ionosphère).

L'avant dernier chapitre expose les démarches méthodologiques de notre traitement géodésique et présente en détail l'approche développée dans le cadre de cette thèse. Ainsi, une étude explicite des événements telluriques secouant la péninsule Italienne, à savoir : le tremblement de terre d'Amatrice (24 août 2016, $M_w = 6.2$), Ussita (26 octobre 2016, $M_w = 6.1$) et celui de la ville de Norcia (30 octobre 2016, $M_w = 6.6$), est introduit à la fin de ce chapitre servant à montrer les possibles corrélations entre les mouvements de sol et les perturbations ionosphériques.

Cette approche prévisionnelle sera validée, dans le dernier chapitre, en étudiant les évènements sismiques causés sur la région nord-occidentale de l'Algérie : le séisme de magnitude $M_w = 5.7$ survenu à Ain Témouchent le 22 décembre 1999 et celui du littoral Oranais du 06 juin 2008 de magnitude 5.5 sur l'échelle de Richter.

Les résultats obtenus à travers cette étude sont très satisfaisants et nécessitent d'autres perspectives qui sont présentés en conclusion.

Chapitre I

Effets ionosphériques sur les signaux GNSS



Effets ionosphériques sur les signaux GNSS

Introduction	4
I.1 Les signaux GNSS	5
I.1.1 Le système américain, GPS	5
I.1.2 Le système russe, GLONASS	6
I.1.3 Le système européen, Galileo	7
I.1.4 Le système chinois, Beidou	8
I.2 Modélisation des observations GPS.....	9
I.2.1 Mesure de code (pseudo-distance)	9
I.2.2 Mesure de phase.....	10
I.2.3 Formation de différences.....	11
I.3 Stratégies d'analyse des observations GPS.....	14
I.3.1 La combinaison Ionosphere-Free L_3	14
I.3.2 La combinaison Geometry-Free L_4	15
I.3.3 La combinaison Wide-Laning L_5	15
I.3.4 La combinaison Melbourne-Wübbena L_6	16
I.4 Description physique du spectre ionosphérique.....	17
I.4.1 Concept de la formation ionosphérique	18
I.4.2 Les strates ionosphériques.....	19
I.4.2.1 La région D.....	20
I.4.2.2 La région E	20
I.4.2.3 La région F.....	21
I.4.3 Champ magnétique terrestre	22
I.5 Variabilités du taux ionosphérique	24
I.5.1 Variation diurne.....	24

I.5.2 Variation latitudinale.....	24
I.5.3 Activité undécennale solaire.....	25
I.6 Techniques de contrôle de l'activité ionosphérique	27
I.6.1 Les sondages ionosphériques.....	28
I.6.1.1 Les ionosondes.....	28
I.6.1.2 Le sondeur Doppler.....	30
I.6.2 Le Riomètre.....	31
I.6.3 Le Radar.....	31
I.6.4 Global Positioning System, GPS	32
I.6.5 DEMETER.....	32
I.7 Réfraction ionosphérique du signal GPS	35
I.7.1 Vitesse de groupe et vitesse de phase.....	35
I.7.2 Le retard ionosphérique	36
I.8 Effets ionosphériques sur les signaux GNSS	39
I.8.1 Effet de l'orage ionosphérique	39
I.8.2 Effet de l'orage magnétique	40
I.8.3 Effet de la scintillation	40
Conclusion	41

Introduction

En domaine de la géodésie, l'atmosphère terrestre est scindée en cinq couches stratifiées : la Troposphère (à environ 13 km d'altitude de la surface de la Terre), la Stratosphère (13 à 50 km), la Mésosphère (50 à 80 km), la Thermosphère (85 à 600 km) et l'Exosphère (600 à 10 000 km). La couche ionosphérique se positionne dans la partie haute de l'atmosphère, entre la Mésosphère et l'Exosphère ; mais à ces altitudes l'air est extrêmement raréfié, il a presque la densité du gaz dans un tube à vide et l'absorption du rayonnement ultraviolet (longueur d'onde inférieure à 102.7 nm) occasionne son ionisation : formation d'un plasma (Jin et al., 2019).

L'ionosphère est une zone de l'atmosphère terrestre, qui s'étend globalement entre 60 et 1 000 km d'altitude, et qui présente une forte densité en ions et en électrons, constituée de gaz fortement ionisé à très faible pression (entre 2×10^{-2} mbar et 1×10^{-8} mb) et à haute température (+1000 °C). Cette ionisation est un phénomène déterminant en domaine de la télécommunication d'ondes radio, courtes et longues, qui se caractérisent par la réflexion à travers les différentes couches de l'atmosphère (Tachema, 2012). L'effet de trois phénomènes physiques fait résulter l'ionisation de la haute atmosphère, le premier est créateur d'électrons libres, les deux autres destructeurs. Il s'agit de :

- Photo-ionisation : les rayonnements EUV solaires ultraviolets extrêmes (*The solar extreme ultraviolet*) et les rayons X lointains émis par le Soleil interagissent avec les atomes et les molécules neutres de l'atmosphère terrestre ; cette interaction est à l'origine de la formation d'ions positifs (cation) et d'électrons libres. Lorsqu'un atome (ou un groupe d'atomes) perd des électrons, il se transforme en ion positif (Schunk et Nagy, 2000).
- Recombinaison : les ions positifs et les électrons libres issus de la photoionisation se recombinent (inversion du processus d'ionisation), formant ainsi des atomes et des molécules neutres (Bayet et Quemada, 1955; Kelley, 2009).
- Capture : les électrons libres se combinent avec des atomes et des molécules neutres pour donner naissance à des ions négatifs (anion). Lorsqu'un atome gagne des électrons, il se transforme en ion négatif.

Il est à noter que la quantité d'ondes réfléchies par l'ionosphère décroît lorsque la fréquence augmente, à courte longueur d'onde (λ), ce type d'ondes sont dites 'très haute fréquence' de 30 MHz à 300 MHz ; appartenant au spectre radioélectrique non-réfléchissant.

I.1 Les signaux GNSS

Les différentes méthodes de navigation par satellite sont classées en systèmes passifs et actifs, ainsi qu'en systèmes de télémétrie unidirectionnels ; connu par les liaisons : montante (Terre-espace) et descendante (espace-Terre) et/ou bidirectionnels. En fait, les systèmes actifs obligent l'utilisateur à émettre des signaux. Notant que, les trois principales constellations GNSS (GPS des États Unis, Glonass de la Russie et Galileo de l'Union Européenne) sont des systèmes de télémétrie passive à liaison descendante unidirectionnelle (Hofmann-Wellenhof et al., 2008). À savoir que l'ensemble des satellites émettent des signaux modulés qui incluent le temps de transmission pour calculer les distances ainsi que les paramètres de modélisation pour calculer les positions des satellites.

I.1.1 Le système américain, GPS

Dans les années soixante-dix, une nouvelle ère de positionnement sur terre, sur mer et dans l'espace a commencé avec le lancement du premier satellite dit : Système de Positionnement Global (GPS, *Global Positioning System*). Ce système fonctionne 24 heures sur 24, en orbite terrestre et en toutes conditions météorologiques. Le GPS fut déclaré opérationnel en 1995, comportant au total 31 satellites (24 satellites opérationnels et 7 satellites de réserve en cas de disfonctionnement) sur une orbite moyenne MEO (*Medium Earth Orbit*) quasi-circulaires autour de la Terre, formant un angle de 55° avec l'équateur et de 60° avec chacune des autres orbites (six plans orbitaux) à une altitude de 20200 Km. Le calcul des coordonnées géographiques se réfèrent au système de référence mondial WGS 84 (World Geodetic System 1984).

Le spectre de fréquences d'émissions des satellites GPS correspond à deux gammes L1 (1.57 GHz) et L2 (1.23 GHz) modulées avec deux types de codes (code C/A à usage civil, code crypté P (Y) pour les militaires) ainsi que des signaux contenant les messages de navigation (Leick, 2004). L'un des principaux objectifs du programme de modernisation du GPS est l'ajout de nouveaux signaux de navigation, civils et militaires, à savoir les signaux à usage civil L2C, L5 et L1C.

Le tableau ci-dessous donne une vue d'ensemble sur les différents signaux GPS.

Tableau I.1
Signaux du système GPS.

Onde porteuse	Fréquence (MHz)	Longueur d'onde (cm)	Civil	Précis	Militaire
L1	$154 \times 10.23 = 1575.42$	19.03	C/A	P	M
L2	$120 \times 10.23 = 1227.60$	24.42	C/A et L2C	P	M
L5	$115 \times 10.23 = 1176.45$	25.48			

- Les horloges atomiques à bord des satellites GPS produisent une fréquence fondamentale $f_0=10.23$ MHz ;
- Le code C/A (Coarse/Acquisition, $f=f_0=10.23$ MHz, longueur d'onde $\lambda=293.2$ m) est disponible pour tous les utilisateurs GPS ;
- Le code P (Precise, $f=f_0/10=1.023$ MHz, $\lambda=29.32$ m) est encrypté au code secret Y, consacré seulement aux militaires américains.

I.1.2 Le système russe, GLONASS

Sur la base de l'expérience acquise avec le système à satellite Doppler Tsikada, l'armée russe de l'ancienne Union des Républiques Socialistes Soviétiques a lancé, au milieu des années 70, le développement du programme GLONASS (Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema). Ce système est considéré comme une contestation concurrente au GPS américain. Le segment spatial utilise 24 satellites circulant dans trois plans orbitaux approximativement circulaires à 19130 km (Huit satellites pour chaque plan orbital), avec une période orbitale de 11h 15min 44sec et une inclinaison de $64,8^\circ$ (Kleusberg, 1990; Langley, 1997; Hofmann-Wellenhof et al., 2008; El-Rabbany, 2002). La particularité de ce système est que chaque satellite possède sa propre fréquence d'émission.

Semblable au GPS, chaque satellite GLONASS transmet un signal comportant plusieurs composantes : deux porteuses en bande L, un code C/A sur L1, un code P sur L1 et L2 et un message de navigation. Cependant, contrairement au GPS, chaque satellite GLONASS émet dans son propre spectre de fréquences porteuses ; dans les bandes 1602-1615.5 MHz pour L1 et 1246-1256.5 MHz pour L2. Cette particularité fait augmenter la résistance au brouillage (diffusion d'un signal parasite qui brouille les fréquences des satellites).

Notant que, le (PZ-90.11) du Parametry Zemli (1990) représente le système géodésique adapté à la constellation GLONASS, qui est en accord avec le système ITRF2008 auquel se conforme au WGS 84 (source : PZ-90.11, 2014 et 2018). A cet effet, les systèmes GPS/GLONASS peuvent

être intégrés pour améliorer la géométrie et la précision de positionnement, en particulier lorsque la visibilité par satellite est faible, comme dans les zones urbaines.

I.1.3 Le système européen, Galileo

Galileo est un système de navigation satellitaire globale initié, au début des années 90, par l'Agence Spatiale Européenne (ESA) et la Communauté Européenne (CE), dont le déploiement doit s'achever vers 2020 (Commission of the European Communities, 2000; Groves, 2013; Teunissen et Montenbruck, 2017). Trois types de constellation différents ont été étudiés pour assurer la sélection optimale de l'architecture Galileo, à savoir les orbites basses (LEO), les orbites moyennes (MEO) et les orbites géosynchrones inclinées (IGSO). Sous contrôle civil, le système Galileo possède une constellation de 30 satellites MEO répartis sur trois plans orbitaux, inclinés à 56° par rapport à l'équateur et à une altitude de 23222 km ; dont la période de révolution est égale à 14h 07min. Cette sélection permet d'obtenir des performances plus uniformes pour toutes les régions, c'est-à-dire indépendamment de la latitude de la région.

Galileo diffuse ses signaux sur trois bandes de fréquences spectrales (E1, E5, E6) :

- Les services ouverts (OS pour *Open Service*) : E1B, E1C, E5aI, E5aQ, E5bI, E5bQ. Ce service fonctionne sur deux bandes de fréquences: 1164–1214 MHz et 1563–1591 MHz.
- Le service de haute précision (HAS pour *High Accuracy Service*) : E1B, E1C, E5bI, E5bQ, E6B, E6C. Ce service offrira de nombreux avantages à valeur ajoutée (garantie du service, intégrité et continuité du signal, meilleure précision de la datation et des données de positionnement, ou encore la diffusion d'informations chiffrées à l'aide de deux signaux supplémentaires). Ce service utilisera les deux bandes de fréquences du service ouvert, ainsi qu'une bande de fréquence supplémentaire de 1260 à 1300 MHz.
- Le service public réglementé (PRS pour *Public Regulated Service*) : E1A, E6A. il s'adresse en priorité aux utilisateurs remplissant une mission de service public, très dépendants de la précision, de la qualité du signal et de la fiabilité de sa transmission (services d'urgence, transport de matières dangereuses, etc.). Comme ce service doit être disponible en tout temps, il utilise deux signaux à part et dispose de plusieurs systèmes prévenant un brouillage ou un leurrage du signal (Galileo ESA, 2008; Gebre-Egziabher et Gleason, 2009; European GNSS, 2016; Kaplan et Hegarty, 2017).

Le système Galileo s'appuie sur un référentiel cartésien géocentrique, le GTRF (Galileo Terrestrial Reference Frame) qui est compatible avec le repère international ITRF.

I.1.4 Le système chinois, Beidou

Le système de navigation chinois Beidou (BDS, *BeiDou Navigation Satellite System*), également nommé Compass, a été développé depuis le début des années 90. A l’instar du GPS, deux types de services sont offerts: un signal standard/gratuit pour les utilisateurs civils (précision de positionnement <10 m) et un signal plus précis (crypté) pour les usages réservés (Jin et al., 2019).

La Chine a finalisé, le 23 juin 2020, le déploiement de son système de navigation BDS grâce au lancement du dernier satellite (#55ème), qui couvre désormais l’ensemble de la planète (ultime étape permet à la Chine de s’affranchir du GPS américain). A noter que la constellation BDS regroupe 35 satellites dont 27 satellites en orbite terrestre moyenne (MEO, à une altitude de 21528 km), 5 en orbite géostationnaire circulaire (GEO, 35786 km) et 3 autres en orbite géosynchrone inclinée (IGSO, 35786 km) répartis sur trois plans orbitaux (Grewal et al., 2020). BeiDou utilise le système géodésique China Geodetic Coordinate System 2000 (CGCS2000), coïncidant avec l’ITRF à quelques centimètres près ; et pour la plupart des applications, la différence entre CGCS2000 et ITRF peut être ignorée. Notant que les satellites BDS émettent des signaux sur trois bandes B1, B2 et B3 : 1575.42 MHz, 1191.795 MHz et 1268.52 MHz, respectivement (China Satellite Navigation Office, 2020).

Tableau I.2
Caractéristiques des principaux systèmes globaux de navigation.

Caractéristiques	GPS	GLONASS	GALILEO	BEIDOU
Altitudes	20200Km	19100Km	23220Km	21528Km
Inclinaison	55°	64.8°	56°	55°
Période orbitale	1h 58	1h 15	14h 07	12h50
Nombre de plan orbitaux	6	3	3	3
N^{bre} de satellites opérationnels (en cible)	31 (31)	24 (24)	14 (30)	35 (35)
Spectres de Fréquence (GHz)	[1.18–1.57]	[1.20–1.61]	[1.18–1.57]	[1.19–1.57]

D’autres pays se sont efforcés de développer leur propre système de navigation par satellite, comme le Japon avec son QZSS (*Quasi Zenith Satellite System*) qui couvre le Japon et l’Australie, ce système est opérationnel depuis 2007. L’Inde avec l’*Indian Regional Navigation Satellite System* (IRNSS) était le dernier arrivant, dont le déploiement a été achevé fin 2016. Notant bien que parmi les GNSS, on considèrera dans ce document le GPS, dans la mesure où celui-ci a été longtemps le seul système disponible, et le seul qui est entièrement exploitable actuellement.

I.2 Modélisation des observations GPS

Dans la littérature GNSS le mot observation (*observable*) est utilisé pour indiquer les signaux dont la mesure donne la distance (distance entre le satellite et le récepteur).

En GPS, il existe deux types d'observations permettant de déterminer la position, la vitesse et le temps : la pseudo-distance (P, *pseudo-range*) et la phase porteuse (Φ , *carrier phase*). Cette dernière est à la base des techniques utilisées pour les mesures GPS de haute précision. Aussi, la combinaison de ces deux principales observations (P, Φ), génèrent des mesures supplémentaires présentant plusieurs avantages (cf. chap. III, § III.2.1).

I.2.1 Mesure de code (pseudo-distance)

Le signal reçu par un récepteur GPS contient un code de bruit pseudo-aléatoire qui est différent d'un satellite à l'autre. En comparant le code reçu avec le code généré localement par le récepteur, ce dernier peut calculer le temps de propagation du signal et en déduire la distance qui le sépare du satellite. Il faut cependant que les horloges du récepteur et du satellite soient parfaitement synchronisées et d'autre part, qu'il n'y ait aucune perturbation dans la propagation du signal dans l'espace et lors de la transmission et de la réception. Comme, dans la réalité, ces conditions sont impossibles à réaliser, la distance mesurée par le récepteur est entachée d'erreurs.

L'équation d'observation pour les mesures de pseudo-distances P (ou mesure de code) effectuées par un récepteur (r) est la suivante (Leick et al., 2015) :

$$P_r^s(t_r, t^s) = \rho_r^s(t_r, t^s) + d\rho_r^s(t_r, t^s) - c(\delta t_r - \delta t^s) + \frac{I}{f^2} + T + m + c(b_r - b^s) + v \quad (1 - 1)$$

Où :

- ρ : distance géométrique entre le satellite s et le récepteur r , (t^s : temps de transmission) et (t_r : temps de réception) : $\rho_r^s(t_r, t^s) = \sqrt{(x_r - x^s)^2 + (y_r - y^s)^2 + (z_r - z^s)^2}$
- I : paramètre de retard ou allongement ionosphérique ($=40.30 \times \text{TEC}$; le TEC est mesuré en électrons/m²) ;
- $d\rho$: erreur d'orbite (en mètre, m) ;
- T : retard ou allongement troposphérique (en m) ;
- m : mesures de retard dû aux multi-trajets (en m) ;
- δt_r et δt^s : erreurs d'horloge de récepteur r (non modélisable) et de satellite s , respectivement (en seconde, s) ;
- v : bruit de mesure sur le code (en m) ;

- \mathbf{b}_r et \mathbf{b}^s : biais électronique du récepteur r et du satellite s , respectivement ;
- f : fréquence de signal porteuse (L1=1575.42 MHz et L2=1227.60 MHz) ;
- c : vitesse de la lumière dans le vide ($299792458 \approx 3 \times 10^8$ m/s), du système international d'unités (système SI).

1.2.2 Mesure de phase

La précision du positionnement obtenue avec une mesure de code est, dans le meilleur des cas, de l'ordre du mètre. En utilisant les mesures de phases, la précision obtenue est de l'ordre de quelques centimètres. Plus précisément, le récepteur mesure une différence de phase entre la phase générée par le récepteur et la phase générée par le satellite et reçue par le récepteur.

Cette différence de phase est proportionnelle au temps de propagation du signal entre le récepteur et le satellite et permet ainsi d'obtenir la distance récepteur-satellite. Néanmoins, de façon similaire à la mesure de code, la mesure de phase est entachée d'erreurs ; ainsi des ambiguïtés seront rajoutées sous forme d'inconnues supplémentaires, ces dernières représentent le nombre entier de longueur d'onde entre le récepteur et le satellite. En effet, la mesure de phase donne uniquement une mesure de la fraction de longueur d'onde à laquelle il faut ajouter un nombre entier de longueurs d'onde pour retrouver la distance récepteur-satellite (Nohutcu, 2009).

L'équation d'observation pour les mesures de phase sur l'onde porteuse Φ , exprimée en cycles, effectuées par un récepteur est la suivante (Leick et al., 2015) :

$$\lambda \Phi_r^s(t_r) = \rho_r^s(t_r, t^s) + d\rho_r^s(t_r, t^s) - c(\delta t_r - \delta t^s) - \frac{I}{f^2} + \lambda N_r^s + T + m + c(\mathbf{b}_r - \mathbf{b}^s) + \mathbf{v} \quad (1 - 2)$$

Où :

- λ : longueur d'onde des porteuses L1 ou L2 ;
- \mathbf{N} : ambiguïté de cycle qui est liée à la méconnaissance du nombre de cycles entiers parcourus par la phase sur chacune des fréquences au premier instant où le signal du satellite est reçu par le récepteur.

Il y a de nombreux termes en commun entre la mesure de code et celle de phase, sauf l'ambiguïté entière ' \mathbf{N} '. En fait, la mesure de phase n'est pas entièrement une mesure de distance.

NB :

Une autre méthode pour modéliser les observations GPS, appelée mesure Doppler. L'effet Doppler (Christian Johann Doppler, 1842) est un phénomène de décalage (modification) de fréquence du signal électromagnétique causé par le mouvement relatif entre l'émetteur (satellite) et le récepteur.

1.2.3 Formation de différences

Afin d'éliminer ou de réduire l'influence des erreurs, à savoir les biais des horloges satellites et récepteurs GPS, corrections atmosphériques et orbites des satellites, il serait préférable de ne pas calculer directement sur la relation non différenciée (Formule : 1-2) mais sur des différences de mesures (simple, double et triple différence) ; comme l'illustre les trois figures ci-après, adaptées de Sickle (2008).

D'abord on définit le terme zéro différence \vec{P}_k^j comme la mesure de distance réduite de code entre le récepteur k et le satellite j .

- La mesure de simple différence est générée par la différence simultanée de mesures entre deux stations (k,l) et un satellite (j), elle permet d'éliminer les décalages d'horloges satellites et de réduire l'influence des autres erreurs ; selon Leick et al. (2015).

$$L_{Fkl}^j = L_{Fk}^j - L_{Fl}^j \quad (1 - 3)$$

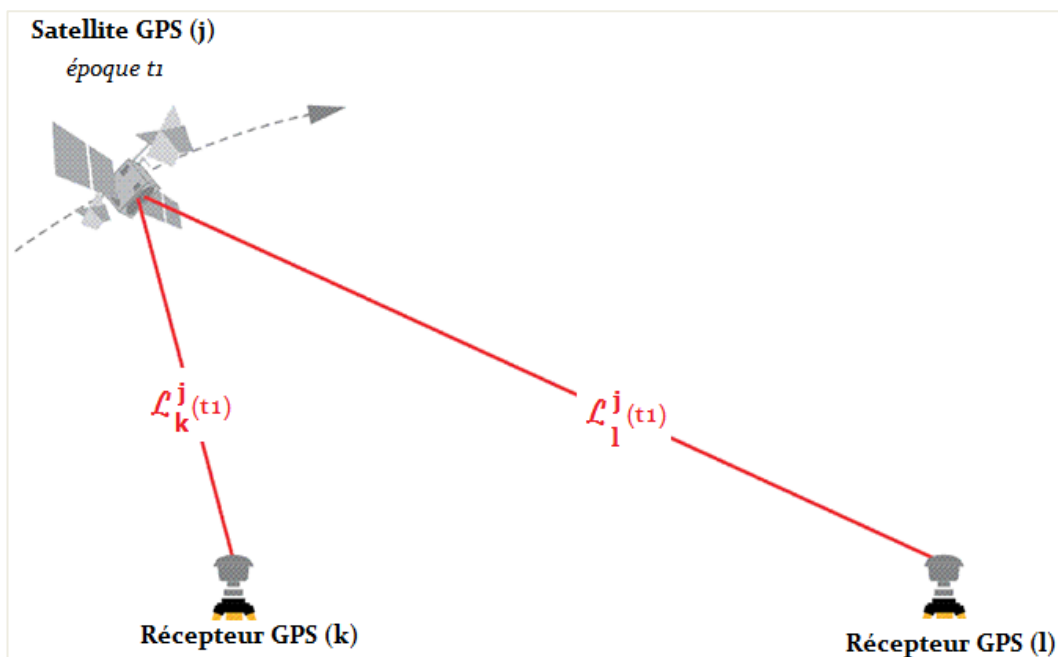


Figure I.1 : Principe de la simple différence.

- La mesure de double différence est la combinaison de mesures de simple différence relatives à deux satellites (i,j) différents à la même époque avec deux récepteurs, elle permet d'éliminer les erreurs d'horloges des récepteurs et de réduire les effets des perturbations atmosphériques et des orbites.

$$L_{Fkl}^{ij} = L_{Fkl}^i - L_{Fkl}^j \quad (1 - 4)$$

Les relations de la double différence pour la mesure de phase pour les deux fréquences $f_{1,2}$:

$$L_{1kl}^{ij} = \rho_{kl}^{ij} - I_{kl}^{ij} + \Delta\rho_{kl}^{ij} + \lambda_1 n_{1kl}^{ij} \quad (1 - 5)$$

$$L_{2kl}^{ij} = \rho_{kl}^{ij} - \frac{f_1^2}{f_2^2} I_{kl}^{ij} + \Delta\rho_{kl}^{ij} + \lambda_2 n_{2kl}^{ij} \quad (1 - 6)$$

Les relations de la double différence pour la mesure de code pour les deux fréquences $f_{1,2}$:

$$P_{1kl}^{ij} = \rho_{kl}^{ij} - I_{kl}^{ij} + \Delta\rho_{kl}^{ij} \quad (1 - 7)$$

$$P_{2kl}^{ij} = \rho_{kl}^{ij} - \frac{f_1^2}{f_2^2} I_{kl}^{ij} + \Delta\rho_{kl}^{ij} \quad (1 - 8)$$

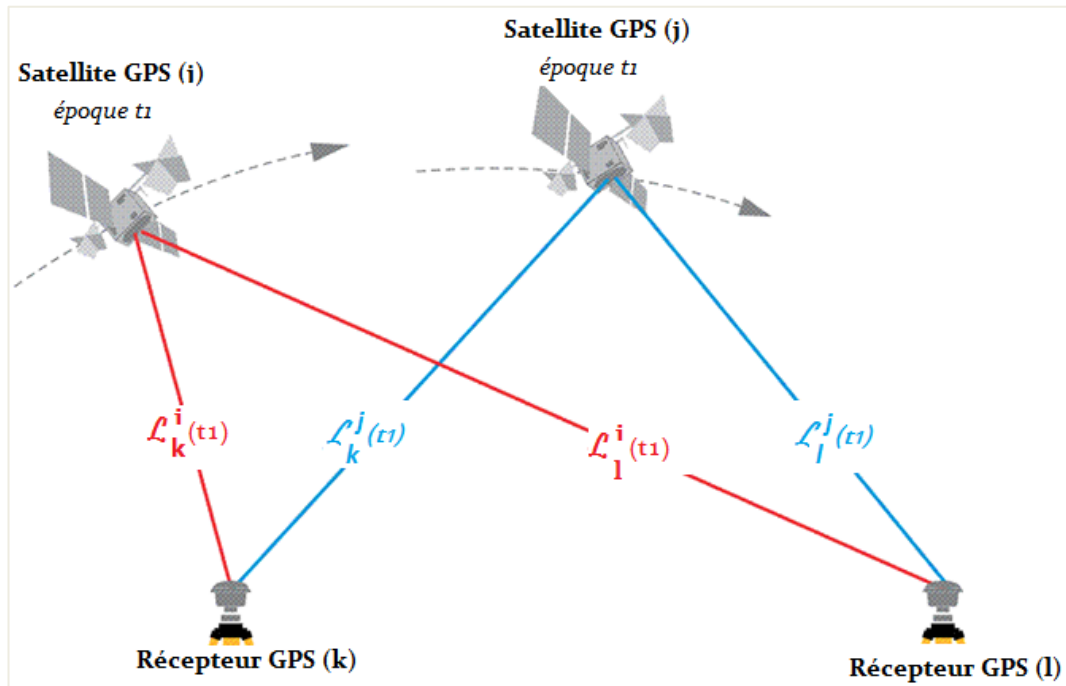


Figure I.2 : Principe de la double différence.

- La mesure de triple différence est la différence de deux doubles différences pour deux époques consécutives (t_m, t_{m+1}), elle permet d'éliminer les ambiguïtés entières et elle est utilisée principalement pour rechercher et éliminer les sauts de cycles (discontinuité dans l'enregistrement des phases qui donne entre deux époques un nombre de cycles aberrant).

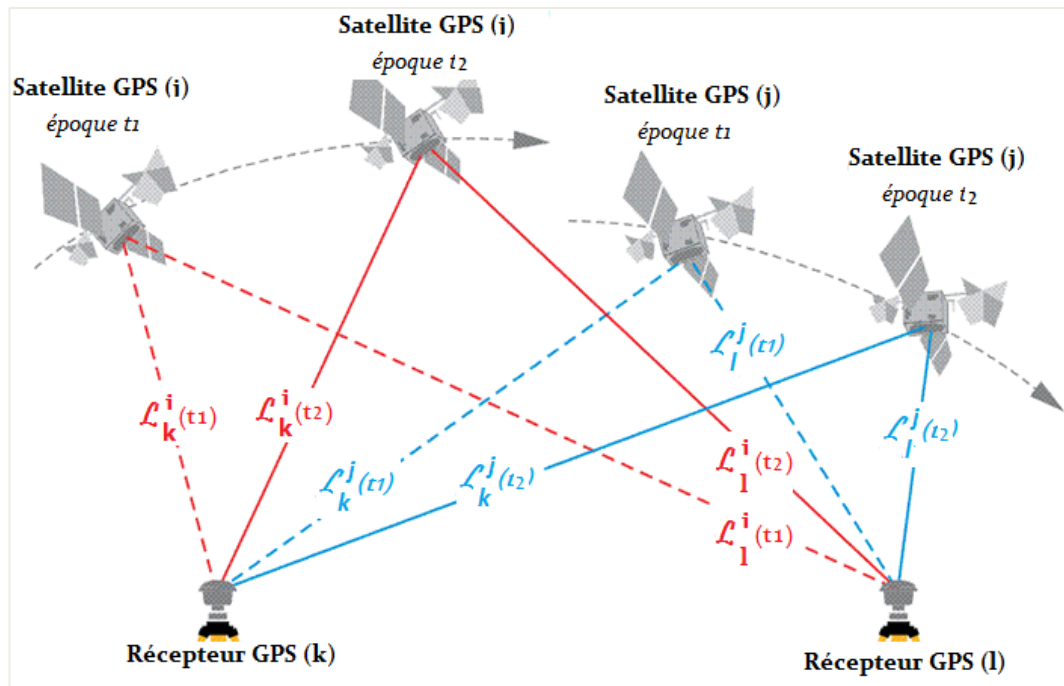


Figure I.3 : Principe de la triple différence.

I.3 Stratégies d'analyse des observations GPS

Les combinaisons linéaires (LC, *Linear Combinations*) sont des méthodes de combiner des données GPS mesurées avec le même récepteur à la même station (Sammuneh, 2003). Il est utile de former ces combinaisons pour des mesures de phase et/ou de code afin d'analyser les informations des erreurs GPS et d'éliminer un certain nombre de termes secondaires intervenant dans les équations d'observation 1-1 et 1-2. (Durand, 2003).

- La combinaison code-code peut être formée par :

$$\mathbf{n}_1 \mathbf{P}_1 + \mathbf{n}_2 \mathbf{P}_2 + \mathbf{n}_3 \mathbf{P}_3 \quad (1 - 9)$$

Où n_1 , n_2 et n_3 sont des constantes arbitraires.

- La combinaison linéaire phase-phase peut être formée par :

$$\mathbf{n}_1 \Phi_1 + \mathbf{n}_2 \Phi_2 + \mathbf{n}_3 \Phi_3 \quad (1 - 10)$$

Où le signal formé, respectivement, à la fréquence et la longueur d'onde :

$$\mathbf{f} = \mathbf{n}_1 \mathbf{f}_1 + \mathbf{n}_2 \mathbf{f}_2 + \mathbf{n}_3 \mathbf{f}_3 \quad \text{et} \quad \lambda = c/\mathbf{f} \quad (1 - 11)$$

I.3.1 La combinaison Ionosphere-Free L_3

La combinaison Ionosphere-Free (L_3) est une combinaison de mesures de phases effectuées sur les deux porteuses L1 et L2 qui élimine au premier ordre l'effet de la réfraction ionosphérique, c'est une combinaison utilisée par la majorité des logiciels traitant des données bi-fréquences afin de construire des doubles différences (Hofmann-Wellenhof et al., 2008) :

$$L_3 = \frac{1}{f_1^2 - f_2^2} (f_1^2 L_1 - f_2^2 L_2) \quad (1 - 12)$$

Le même concept est appliqué dans le cas des mesures de code :

$$P_3 = \frac{1}{f_1^2 - f_2^2} (f_1^2 P_1 - f_2^2 P_2) \quad (1 - 13)$$

En tenant compte de la double différence en mesures de phase et en négligeant l'effet de la réfraction troposphérique, on peut écrire :

$$L_{3kl}^{ij} = \rho_{kl}^{ij} + B_{3kl}^{ij} \quad (1 - 14)$$

Où le biais B_{3kl}^{ij} peut-être écrit sous la forme :

$$B_{3kl}^{ij} = \frac{1}{f_1^2 - f_2^2} (f_1^2 \lambda_1 n_{1kl}^{ij} - f_2^2 \lambda_2 n_{2kl}^{ij}) \quad (1 - 15)$$

Si nous connaissons la différence $n_{3kl}^{ij} = n_{1kl}^{ij} - n_{2kl}^{ij}$ (appelée *wide-lane ambiguity*), nous pouvons écrire :

$$B_{3kl}^{ij} = c \frac{f_2}{f_1^2 - f_2^2} n_{3kl}^{ij} + c \frac{1}{f_1 + f_2} n_{1kl}^{ij} \quad (1 - 16)$$

$\lambda_3 = c/(f_1+f_2) = 10.70$ cm, c'est la raison pour laquelle on appelle l'ambiguïté inconnue n_{1kl}^{ij} dans cette dernière équation « *narrow-lane ambiguity* ». Selon Sammuneh (2003), cette combinaison comporte deux inconvénients :

- Le bruit qui lui est associé est environ trois fois supérieur au bruit des mesures individuelles.
- L'ambiguïté n_{3kl}^{ij} n'est pas entière.

I.3.2 La combinaison Geometry-Free L_4

Cette combinaison linéaire est indépendante de l'effet de l'horloge du récepteur et la géométrie (orbites, coordonnées de station,...). Elle contient le retard ionosphérique, des effets multi-trajets, et l'ambiguïté initiale de phase (qui n'est pas entière). On peut s'en servir pour estimer les modèles ionosphériques. La même combinaison est possible en utilisant les mesures de code. Elle s'exprime sous la forme :

$$L_4 = L_1 - L_2 \quad (1 - 17)$$

L'équation suivante décrit la relation de cette combinaison géométrique :

$$L_{4kl}^{ij} = L_{1kl}^{ij} - L_{2kl}^{ij} = - \left(1 - \frac{f_1^2}{f_2^2} \right) I_{kl}^{ij} + (\lambda_1 n_{1kl}^{ij} - \lambda_2 n_{2kl}^{ij}) \quad (1 - 18)$$

Appliquant la méthode de double différence à cette combinaison, les biais instrumentaux des satellites et des récepteurs sont éliminés. La combinaison Geometry-Free est également utile une fois appliquée aux stratégies de résolution d'ambiguïté (Sammuneh, 2003).

I.3.3 La combinaison Wide-Laning L_5

Cette combinaison linéaire est utilisée pour fixer les sauts de cycle et résoudre l'ambiguïté dans le cas des mesures de phase.

$$L_5 = \frac{1}{f_1 - f_2} (f_1 L_1 - f_2 L_2) \quad (1 - 19)$$

En négligeant la réfraction ionosphérique I_{kl}^{ij} et la réfraction troposphérique, on obtient :

$$L_{5kl}^{ij} = \rho_{kl}^{ij} + \frac{c}{f_1 - f_2} (n_{1kl}^{ij} - n_{2kl}^{ij}) \quad (1 - 20)$$

La longueur d'onde $\lambda_5 = c/(f_1 - f_2) = 86.25$ cm.

λ_5 est presque quatre fois plus grande que λ_1 ou λ_2 , c'est pour cette raison L5 est appelée wide-lane. De plus l'ambiguïté $n_{5kl}^{ij} = n_{1kl}^{ij} - n_{2kl}^{ij}$ est entière. En effet, dans les calculs de positions relatives par GPS, la résolution des ambiguïtés est l'un des problèmes les plus difficiles à surmonter. Le fait de pouvoir fixer les ambiguïtés à leur valeur entière est indispensable pour obtenir une meilleure précision.

1.3.4 La combinaison Melbourne-Wübbena L_6

Cette combinaison est linéaire par rapport aux mesures de phase (L_1 et L_2) et aux mesures de code P (P_1 et P_2). Elle minimise l'effet de l'ionosphère, de l'horloge et de la troposphère :

Melbourne-Wübbena = wide-lane (phase) – wide-lane (code)

$$L_6 = \frac{1}{f_1 - f_2} (f_1 L_1 - f_2 L_2) - \frac{1}{f_1 + f_2} (f_1 P_1 - f_2 P_2) \quad (1 - 21)$$

Dans le cas des mesures en double différence on obtient :

$$L_{6kl}^{ij} = \lambda_5 L_{5kl}^{ij} \quad (1 - 22)$$

Avec des mesures en code P cette combinaison peut être utilisée afin de résoudre l'ambiguïté en wide-lane n_{5kl}^{ij} . (Durand, 2003).

Dans le cas de zéro différence, la même combinaison linéaire donne $L_{6k}^i = \lambda_5 L_{5k}^i$ qui signifie que cette combinaison linéaire peut être utilisée pour examiner les sauts de cycle dans le cas de mesures de zéro différence (Sammuneh, 2003). En tous cas, la différence $n_{1k}^i - n_{2k}^i$ est le seul paramètre qu'on peut examiner dans cette méthode.

Le tableau ci-dessous récapitule les différentes combinaisons linéaires, selon Wyllie (2007) :

Tableau I.3

Caractéristiques des combinaisons linéaires des phases porteuses.

CL	Description	λ (m)	σ (m) L1
L1	Porteuse de base	0.19	1
L2	Porteuse de base	0.244	1
L3	Ionospheric-Free LC	0.107	3
L4	Geometry-Free LC	0.054	1.414

Où σ est le bruit de mesure.

I.4 Description physique du spectre ionosphérique

Dans le domaine de la physique classique, le rayonnement électromagnétique, au sens de transfert d'énergie linéaire, montre une très large gamme de fréquences appelée spectre (Fig. I.4). Par définition, l'onde électromagnétique est un modèle utilisé pour représenter les rayonnements électromagnétiques. La propagation conjointe d'un champ électrique \vec{E} et du champ magnétique \vec{B} compose l'onde électromagnétique, tel que $\vec{E} \perp \vec{B}$ (Nicolas, 2009).

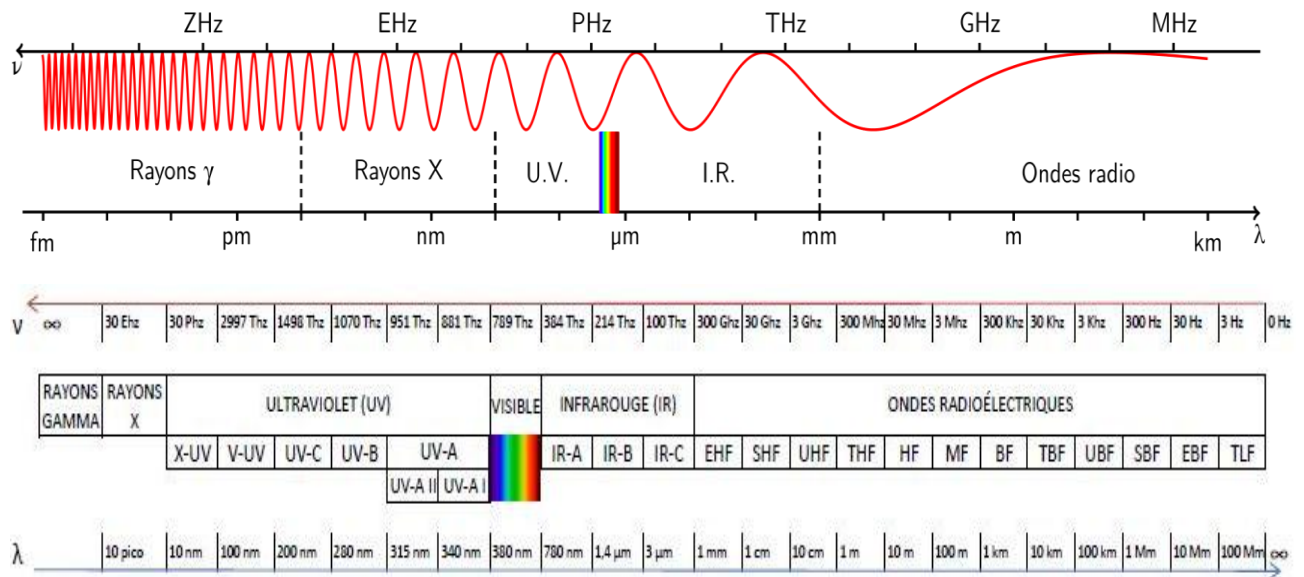


Figure I.4 : Domaines du spectre électromagnétique (source : Wikipédia).

Le rayonnement électromagnétique se déplace simultanément sous la forme d'ondes de différentes fréquences et de particules de lumière appelées photons. Le spectre du rayonnement électromagnétique s'étend des ondes radio aux rayons gamma en passant par les micro-ondes, l'infrarouge, la lumière visible, l'ultraviolet et les rayons X (Fig. I.4). Ces rayons se distinguent par leur longueur d'onde (couleur), mesure de l'énergie que chaque photon transporte. Plus les ondes sont rapprochées (longueur d'onde plus courte), plus chaque photon associé transporte d'énergie (source : www.cea.fr). Inversement, les grandes longueurs d'onde sont caractéristiques de photons moins énergétiques.

I.4.1 Concept de la formation ionosphérique

L'ionosphère est caractérisée par l'existence des électrons libres et des ions chargés positivement. Quand les molécules et les atomes de l'atmosphère terrestre reçoivent assez d'énergie externe du rayonnement cosmique et de la radioactivité terrestre ; alors un ou plusieurs électrons sont dissociés de ces molécules/atomes, ce procédé s'appelle l'*ionisation*. Par ailleurs, le rayonnement solaire extrême ultraviolet 'EUV' et la précipitation de particules sont les deux sources d'énergie primaires d'ionisation. Dans ce système de procédure les atomes ou les molécules deviennent des ions chargés positivement tandis que les électrons dissociés deviennent des électrons libres chargés négativement ; ceci forme l'ionosphère. À ce niveau, le nombre d'ions chargés positivement est approximativement égal à celui d'électrons libres chargés négativement pour constituer un plasma ionosphérique qui est électriquement neutre.

À noter que l'ionisation atmosphérique dépend principalement du rayonnement solaire, c'est dans le noyau du Soleil que se produisent d'importantes réactions thermonucléaires exothermiques (fusion nucléaire) qui transforment quatre noyaux d'Hydrogènes en un noyau d'Hélium. La figure ci-dessous (Böhm et Schuh, 2013) montre le processus d'ionisation d'un atome d'oxygène (8 électrons) soumis aux rayonnements solaires exprimés en ondes électromagnétiques, entraînant ainsi la libération d'une charge élémentaire négative dite 'électron' et la production d'une charge élémentaire positive dite 'ion'.

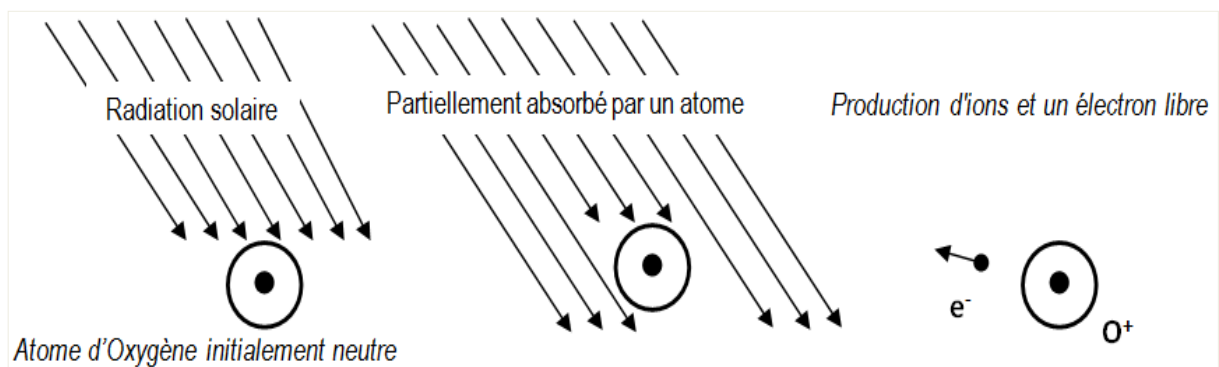


Figure I.5 : Cas d'ionisation d'une molécule d'oxygène due au rayonnement solaire.

Une des caractéristiques fondamentales liées à cette ionisation est que pendant la journée, les photons venant du domaine spectral solaire UV entraînent le gaz neutre pour produire des paires d'ion et d'électron libre dues à l'effet de la photo-ionisation. Notant que ce procédé de photo-ionisation, lié aux particules énergétiques (principalement l'électron) constitue une seconde source entraînant l'ionisation.

Ainsi pendant la nuit, l'ionisation due aux particules énergétiques maintient encore l'ionosphère tandis que la photo-ionisation disparaît. En conséquence, la présence et l'absence du rayonnement solaire entraînent certainement les variations ionosphériques diurnes et nocturnes.

I.4.2 Les strates ionosphériques

Du fait de l'existence d'une densité volumique de charges, variables en fonction de l'altitude, l'ionosphère est scindée en quatre régions distinctes nommées respectivement, de la plus basse à la plus haute couche : la région D, la région E, la région F1 et la région F2. Ces couches subissent des variations diurnes (radiations solaires), saisonnières et géographiques. Comme indique la figure (I.6), chaque couche ionosphérique dispose d'une gamme d'altitude et de densités électroniques bien déterminées.

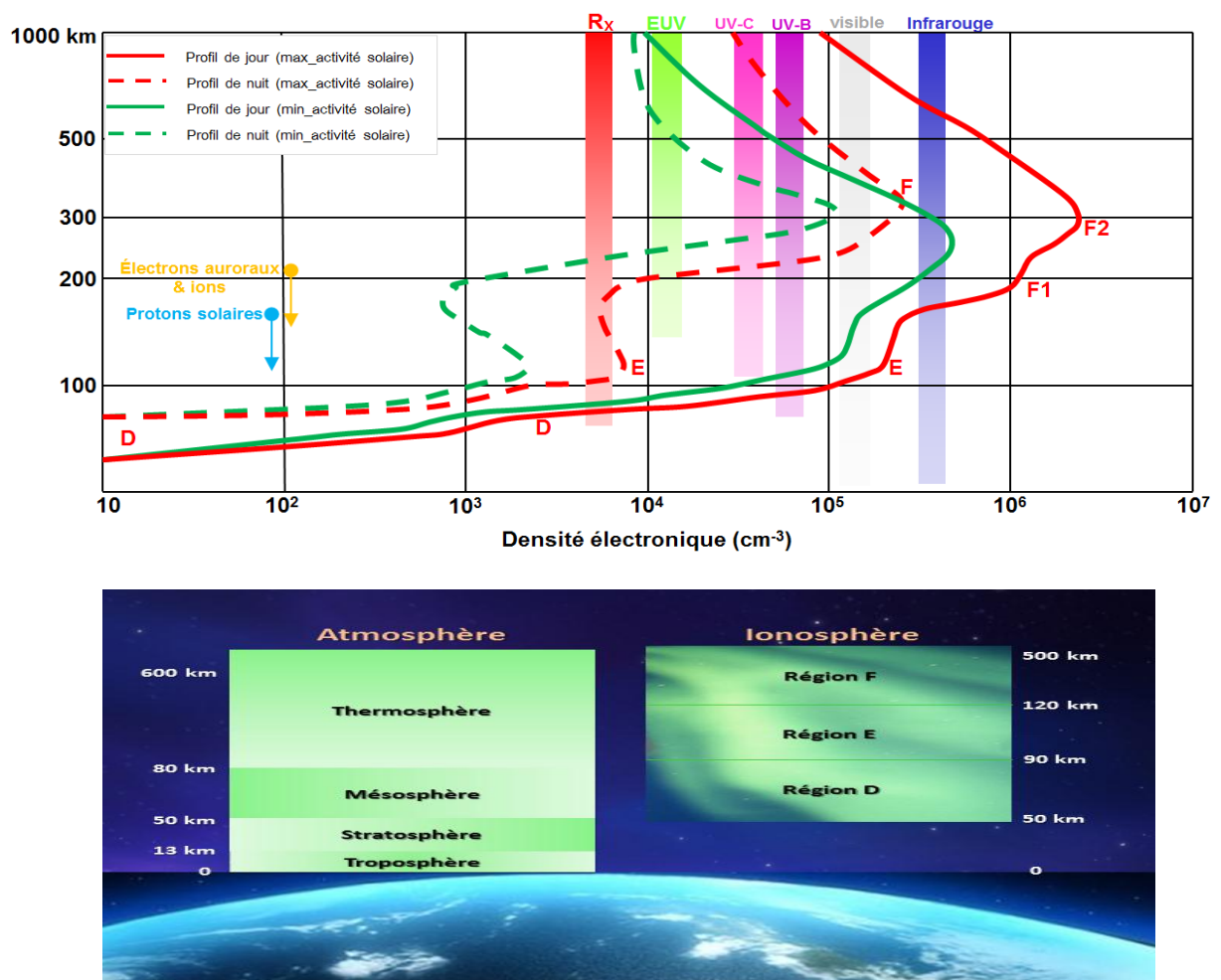


Figure I.6 : Profil altimétrique de densité électronique et gamme d'altitude des couches ionosphériques (Occhipinti, 2006, modifiée).

La densité électronique ou la fréquence de plasma sont deux grandeurs liées par la relation :

$$F_P = \sqrt{N_e / 1.24 * 10^{10}} \quad (1 - 23)$$

Où :

N_e est la densité électronique (e^-/m^3) ;

F_P représente la fréquence plasma (MHz).

Les caractéristiques des couches ionosphériques se définissent comme suit :

I.4.2.1 La région D

La couche D est la région basse située entre 50 et 90 Km d'altitude (Pression ≈ 2 Pascal, température ≈ -76 °C et la densité électronique est entre 10^8 à 10^{10} e^-/m^3). Elle est très peu ionisée, constituée d'ions polyatomiques, avec un maximum au midi local (10^9 e^-/m^3) et des valeurs de densité électronique négligeables la nuit (presque nulle). Cette couche est produite par quelques particules très énergétiques et ionisantes comme les rayons cosmiques du Soleil qui ont réussi à traverser les couches supérieures (Occhipinti, 2006). La fréquence de collision avec les atomes et les molécules neutres est importante si bien que cette couche est capable d'atténuer considérablement les ondes décimétriques (30 KHz à 0.3 MHz) lors de leur traversée du milieu ionosphérique (absorption).

I.4.2.2 La région E

La couche E, appelée aussi couche de Heaviside ou de Kennelly-Heaviside, est située entre 90 et 120 km d'altitude environ ($P \approx 10^{-2}$ Pa, $T \approx -50$ °C et $N_e \approx 10^{11}$ e^-/m^3). Constituée d'oxygène et monoxyde d'azote moléculaires ionisés et d'ions météoritiques, cette couche est sujette à deux types d'ionisation : pour des périodes de jour (10^{11} e^-/m^3) et en toutes saisons, elle présente des fréquences plasma comprises entre 3 et 5 MHz à des altitudes comprises entre 110 et 115 km ; et pour les périodes de nuit (3 à 4×10^{10} e^-/m^3) l'ionisation résiduelle est très faible. Cette couche est capable de réfléchir des ondes électromagnétiques de fréquences allant jusqu'à 100 MHz. Elle présente également de très forte densités électroniques se présentant sous la forme de bulles d'ionisation de taille et de densité très variable ou d'une fine couche d'étendue spatiale plus ou moins grande pouvant occulter l'ionisation supérieure, c'est la couche *E sporadique* notée E_s (Kelley, 2009).

I.4.2.3 La région F

La région F, ou couche d'Appleton, est la couche de l'ionosphère qui a l'influence la plus prépondérante sur les communications. Elle s'étend au-delà de 130 km d'altitude avec un maximum de densité électronique (N_e) situé entre 200 et 450 km ($P \approx 10^{-4}$ Pa, $T \approx 1000$ °C et $N_e \approx 10^{11}$ à 10^{12} e^-/m^3). Constituée d'atomes d'oxygène, d'azote et d'hydrogène, la couche F est sujette à de fortes variations diurnes et saisonnières et, par conséquent, ses propriétés réflexives aussi. Dans cette région, à effet de collision très faible, les ions et les électrons sont magnétisés et leurs mouvements sont donc contrôlés par les champs électriques issus du couplage vent solaire¹/magnétosphère² et qui se projettent le long des lignes de champ magnétique (Vallières, 2002). La couche F est la région de l'ionosphère la plus ionisée et qui présente les plus larges variations d'ionisation. Pendant les heures de jour et en été la région F se dédouble en F1 et F2 et se recombinaient la nuit plusieurs heures après le coucher du Soleil mais peut persister toute la nuit lors des maxima d'activité solaire :

- La couche F1 n'existe que pendant le jour et durant l'été. Elle est située entre 130 et 210 km d'altitude. Cette couche ne présente pas de maximum d'ionisation mais une inflexion du profil de densité électronique située entre 180 et 220 km qui tend à disparaître pour des périodes de nuit.
- La couche F2 est située entre 250 et 500 km d'altitude. L'ionisation y est élevée et sa densité électronique dépasse parfois 10^{12} e^-/m^3 ; pendant le jour et pour une altitude d'environ 350 km (principe de couche ionosphérique mince). Cette ionisation diminue durant la nuit, 5×10^{10} e^-/m^3 . L'ionisation passe par un maximum durant l'hiver (*winter anomaly*) pour l'hémisphère nord. Par sa densité électronique élevée, la couche F2 permet des liaisons radio à très grande distance. Le rôle de la couche F est essentiel pour la propagation des ondes courtes.

Le tracé de l'altitude ionosphérique en fonction de la fréquence de plasma, $H = f(f)$, présente l'*ionogramme*, sur lequel on peut identifier les paramètres caractéristiques du profil ionosphérique pour une situation diurne (jour) et une situation nocturne (nuit). Comme illustré sur la figure ci-dessous.

¹ Globalement, le vent solaire est un flux permanent de plasma constitué par un mélange d'ondes électromagnétiques (des rayons gamma aux ondes radio), d'électrons, de protons, d'environ 5% d'hélium et de neutrinos, sous-produits des réactions nucléaires du cœur du Soleil.

² En approchant de la Terre, le vent solaire interagit avec le champ géomagnétique et le déforme pour le confiner dans une cavité (nommée la magnétosphère). C'est aussi la région de l'espace où domine l'influence du champ magnétique terrestre.

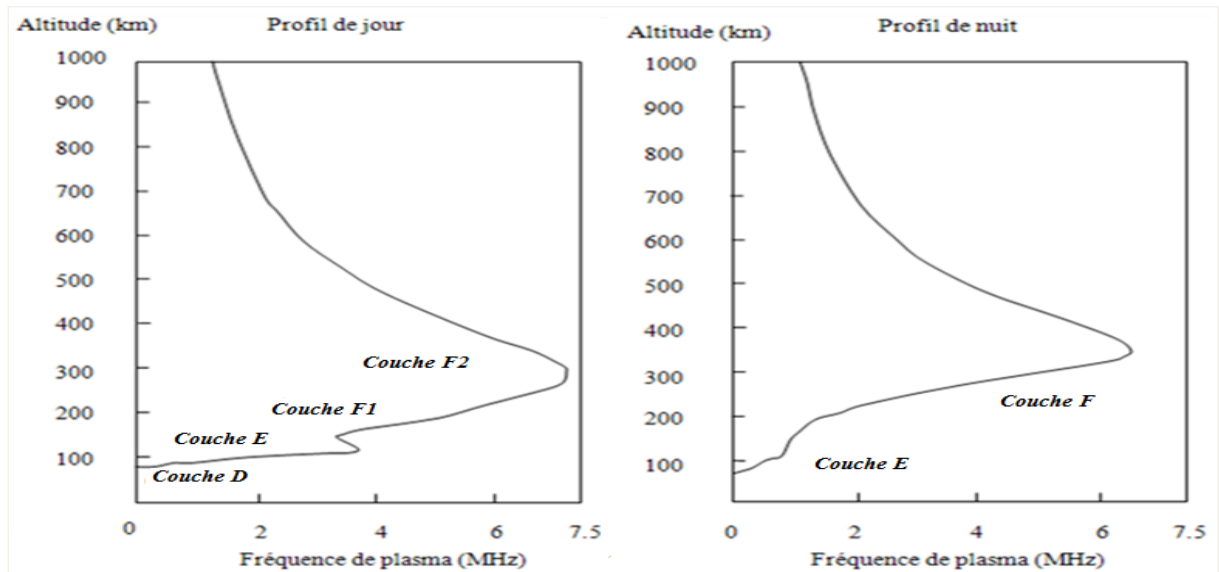


Figure 1.7 : Profils ionosphériques diurne et nocturne (Tachema, 2012).

Sur la base de cette dernière figure, on remarque que la couche D disparaît la nuit car dans cette région l'ionisation de jour est trop faible, la couche E est fortement réduite la nuit et les couches F1 et F2 fusionnent en une seule couche F, durant la nuit.

1.4.3 Champ magnétique terrestre

Le champ géomagnétique est approximativement assimilable à une sphère, uniformément magnétisé dans la direction de l'axe du dipôle. Cet axe coupe la surface de la Terre en des points connus sous les noms de dipôle boréal (Nord) et dipôle austral (Sud). Les pôles Nord et Sud ont respectivement pour coordonnées géographiques (79°N , 73°O) et (79°S , 110°E). L'axe de dipôle est incliné approximativement à 11° à l'axe de rotation de la Terre. Par conséquent, l'équateur magnétique qui est le plan traversant le centre de la Terre perpendiculaire à l'axe du dipôle ne coïncide pas exactement avec l'équateur géographique. C'est pour cette raison, il est important d'utiliser les coordonnées du champ magnétique pour décrire ou modéliser l'ionosphère terrestre. Actuellement, le champ géomagnétique est en pleine diminution avec une intensité proche de $30\mu\text{T}$ à l'équateur et de $60\mu\text{T}$ aux pôles (Nicolas, 2009). La formation de l'ionosphère est affectée beaucoup plus par le champ magnétique terrestre, la Terre est constamment baignée dans un courant régulier de plasma ionisé par le Soleil. Une grande partie de ce plasma, étant transporté par les vents solaires $V_{\text{moy}} = 450 \text{ Km/s}$ (*solar wind*), est déviée par le champ magnétique terrestre (Vallières, 2002). Cependant, une partie de ce vent solaire activé trouve son chemin dans l'ionosphère ainsi que la haute atmosphère via les régions aurorales où l'ionisation a eu lieu par incidence énergétique de particules sur les gaz neutres. Ainsi, les lignes de champ

magnétique créent un vaste système de circulation de plasma ionisé dans et au voisinage de l'environnement terrestre. Les phénomènes d'environnement Soleil-Terre sont à la base d'une activité qui intéressent beaucoup les ionosphéristes, appelée activité géomagnétique.

- L'indice généralement utilisé pour quantifier cette activité est le 'Kp' (et l'indice Ap). L'indice Kp (*Planetary K-Index*) est un indice planétaire d'activité magnétique. Il traduit les effets des particules du vent solaire sur le champ géomagnétique. Découvert par Bartels en 1949 (Bartels, 1949), cet indice est déduit des mesures du champ magnétique réalisées par treize stations à des latitudes comprises entre 46° (respectivement -46°) et 63° (resp. -63°) et il est donné par plusieurs centres de météorologie spatiale, à savoir le centre américain NOAA SWPC³, le centre allemand GFZ⁴ et le centre japonais WDC⁵.

Le Kp est utilisé pour exprimer la magnitude des tempêtes géomagnétiques, varié entre 0 et 9, et indique les fluctuations maximales et les perturbations des composantes horizontales du champ magnétique terrestre observées pendant un intervalle de trois heures (Pham, 2012; Tachema et Nadji, 2019). Notant que :

*Kp ≤ 4 représente une basse activité géomagnétique ; et
5 (G1 : faible tempête géomagnétique) ≤ Kp ≤ 9 (G5 : extrême tempête géomagnétique).*

- Un autre indice appelé 'Dst' (*Disturbance Storm Time*), introduit par Sugiura et Poros en 1969 (Sugiura et Poros, 1969), est l'un des indicateurs indispensables d'évaluation de l'intensité des activités et des tempêtes géomagnétiques. Mesuré en nano-Tesla (Hamilton et al., 1988; Ritter, 2004), l'indice Dst est proche de 0 en temps calme et peut atteindre des valeurs aussi basses que -200 à -400 nT au cours d'orages majeurs (Maget, 2007).
- En ce qui concerne l'activité solaire, l'indice 'F10.7' mesure le flux radio émis par le Soleil à la longueur d'onde de 10.7 cm ($f=2800$ MHz). Cet indicateur suit les changements du rayonnement solaire UV extrême (Etienne, 2011), qui a une influence sur la haute atmosphère terrestre et sur l'ionosphère. Ses valeurs peuvent varier de 50 à 300 s.f.u (*Solar Flux Units*). Des valeurs supérieures à 200 s.f.u se trouvent typiquement pendant des phases ultimes (pics) de cycles solaires.

Notons que dans notre étude, nous avons exploité ces trois indices expressifs des activités géomagnétique et solaire.

³ National Oceanic and Atmospheric Administration_Space Weather Prediction Center, États-Unis.

⁴ Deutsche GeoForschungsZentrum (German Research Centre for Geosciences).

⁵ World Data Center for Geomagnetism, Japon.

I.5 Variabilités du taux ionosphérique

Comme le Soleil est la source principale d'ionisation de la haute atmosphère, n'importe quelles variations du rayonnement solaire produisent de larges dynamiques spatio-temporelles dans le contenu électronique ionosphérique TEC. La variabilité de l'ionosphère résulte donc de :

- La variabilité du flux solaire entrant (essentiellement dans la partie UV lointain du spectre, c'est l'un des objectifs de la mission spatiale de l'Observatoire Solaire et Hélosphérique SoHO⁶) ;
- La variabilité du plasma d'origine solaire pénétrant dans la Magnétosphère ;
- Les marées atmosphériques produites par le Soleil et la Lune ;
- Son chauffage par le Soleil qui provoque un cycle quotidien de dilatation /rétraction.

Les deux premières causes, les seules qui soient aléatoires, relèvent de la météorologie de l'espace.

I.5.1 Variation diurne

La variabilité diurne est due à la rotation de la Terre suivant un cycle journalier, les positions relatives de la Terre et du Soleil changent avec le temps. Ceci implique que la quantité d'ionisation dépendra par conséquent de ce cycle : l'ionisation augmente dans l'hémisphère ensoleillé, atteignant un pic peu après l'heure locale de midi et diminue du côté ombragé (Leick, 2004). En conséquence, la couche D disparaît quasiment pendant la nuit et la couche E apparaît rapidement au lever du soleil pour disparaître à son coucher ; à l'exception de l'ionisation résiduelle de nuit.

I.5.2 Variation latitudinale

La couche ionosphérique montre un certain comportement au gré des latitudes terrestres (Fig. I.8) Dans les basses latitudes, près de l'équateur géomagnétique, l'occurrence des anomalies d'Appleton-Hartree (également connues sous le nom d'anomalies équatoriales, EIA : *Equatorial Ionization Anomaly*) ont lieu. Dans les latitudes moyennes, les variations sont faibles ; mais à des latitudes élevées, particulièrement les régions comprises entre 60° et 70° (régions aurorales), sont caractérisées par des variations à court terme plus importantes que les basses latitudes.

Dans les régions aurorales, il existe une interaction entre les lignes géomagnétiques et la précipitation des particules solaires. Quand le champ géomagnétique est relié au champ

⁶ Solar and Heliospheric Observatory : Déc. 1995–Déc. 2020.

magnétique interplanétaire au sud, des orages (tempêtes) géomagnétiques sont produits juste après les événements d'éjections solaires (CME, *Coronal Mass Ejections*). (Boscher, 1998).

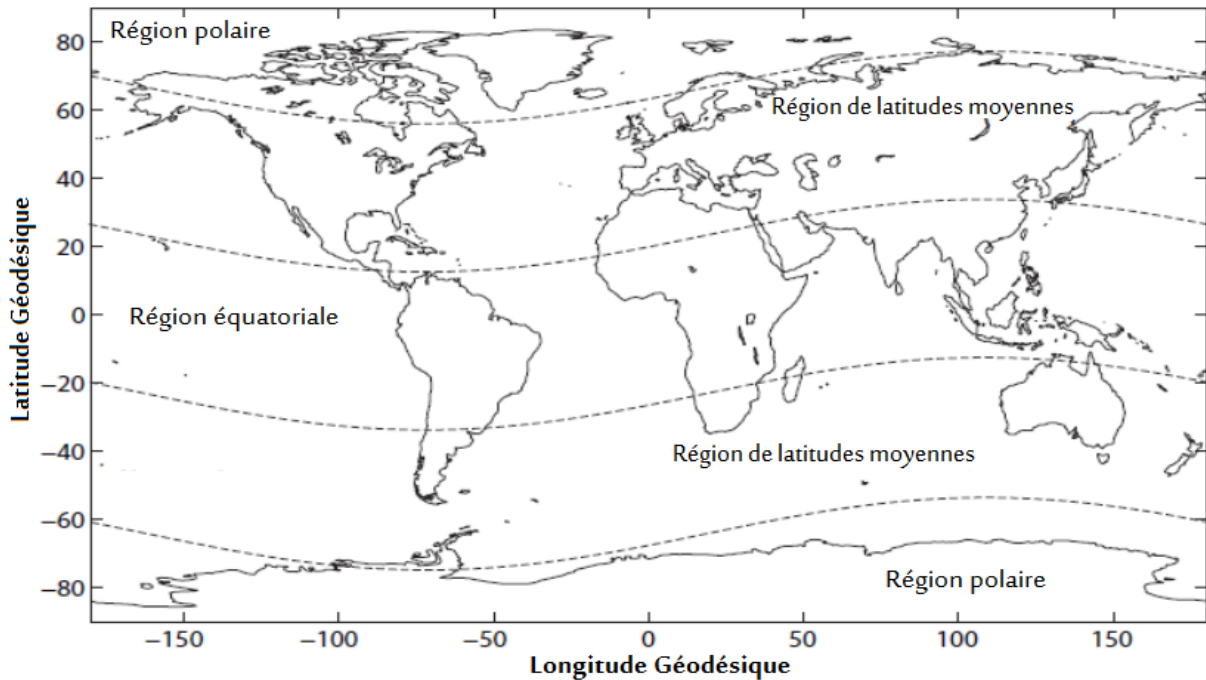


Figure I.8 : Principales régions géographiques de l'ionosphère (Memarzadeh, 2009).

Par ailleurs, dans les calottes glaciaires des zones polaires la variation de l'angle zénithal du Soleil est beaucoup plus petite que dans les autres régions, et par conséquent les variations dans les densités électroniques sont plus faibles, bien qu'encore détectables.

I.5.3 Activité undécennale solaire

L'ionisation de la haute atmosphère terrestre est mesurée en permanence dans le spectre du visible par l'observation du nombre de taches apparaissant quotidiennement sur le Soleil, le résultat de cette observation est relaté par un nombre appelé nombre de Wolf (défini par l'astronome suisse Rudolf Wolf en 1855), qui est un indicateur normalisé de l'activité solaire. Plusieurs mesures du nombre de ces taches solaires (SSN, *sunspot number*) montrent une périodicité principale d'environ 11 ans (Memarzadeh, 2009). Cette périodicité peut également être détectée suivant la variabilité de la concentration électronique.

Nombre de Wolf = $10 \times \text{nombre de groupes de taches solaires} + \text{nombre de taches individuelles}$.

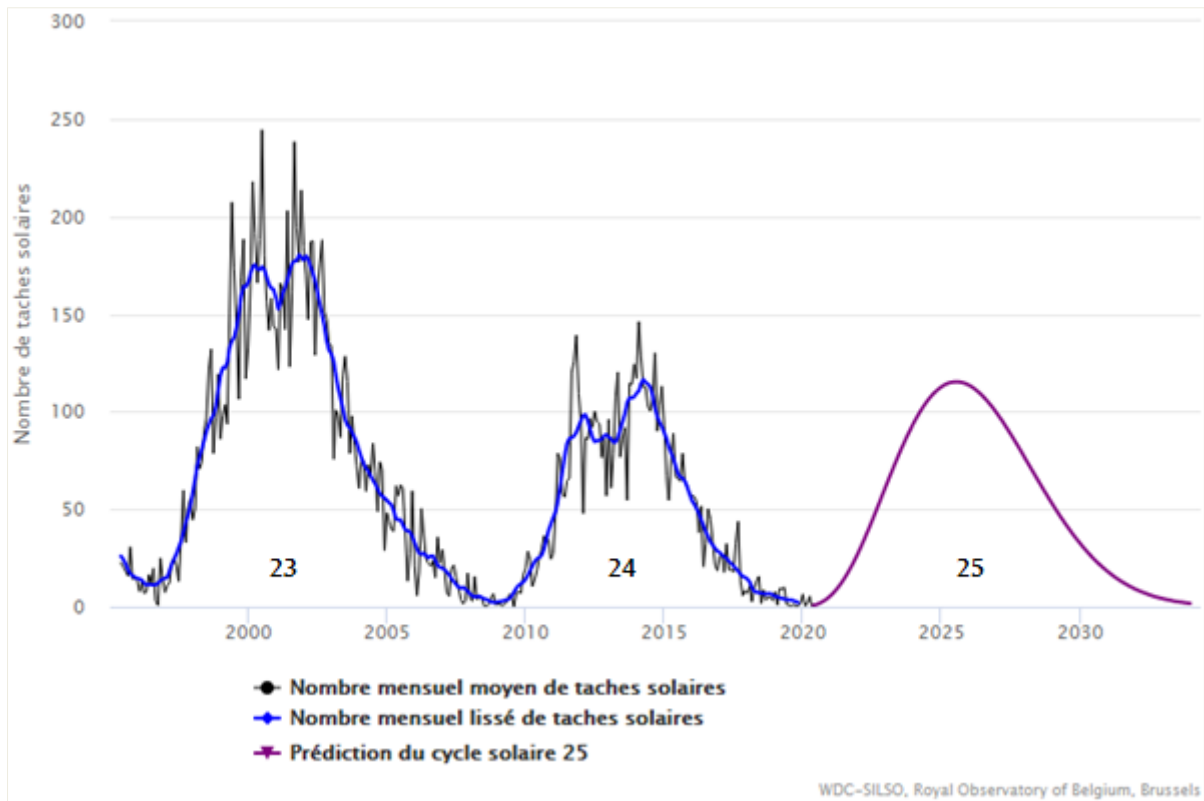


Figure I.9 : Progression du nombre de taches solaires des 23, 24 et 25^{ème} cycles solaires. Données observées jusqu'en juin 2020 (source : <http://www.sidc.be/silso/home>).

Le nombre de Wolf est le résultat d'une moyenne pondérée d'observations effectuées dans un réseau mondial d'observatoires astronomiques. Plusieurs centres et observatoires, à savoir le *NOAA-Space Environment Center* et l'Observatoire Royal de Belgique (<http://sidc.oma.be/silso/>) fournissent des données journalières sur le nombre de taches solaires. La figure (I.9) illustre l'évolution mensuelle, entre 1995 et 2034, de l'activité solaire (nombre de Wolf). Pour le cycle 24, le maximum d'activité solaire s'est étalé sur les années 2012 et 2014. Tandis, les experts du NOAA/NASA indiquent que le cycle solaire actuel (cycle#25) atteindra probablement un pic entre 2023 et 2026.

Il convient de noter que la série des événements telluriques traités à travers cette thèse se sont produits lors des 23^e et 24^e cycles d'activité solaire.

I.6 Techniques de contrôle de l'activité ionosphérique

En pratique, on utilise la notion du contenu électronique total indexé 'TEC' (*Total Electron Content*) qui représente la quantité totale des électrons libres dans la couche F2 de l'ionosphère ; exprimant l'intégration de la densité des électrons libres (N_e) dans un cylindre de section de 1 m^2 et d'une hauteur égale au trajet du signal oblique séparant la station du satellite émetteur, voir figure ci-dessous.

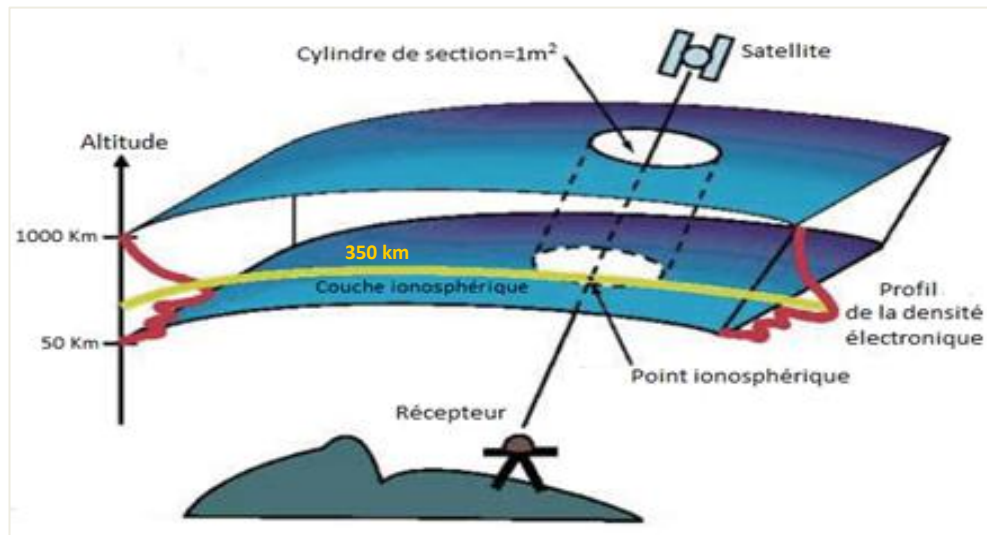


Figure I.10 : Principe de calcul du contenu électronique total ionosphérique (Tachema, 2012).

Dans l'approche bidimensionnelle, la couche ionosphérique se représente comme une couche fine à une altitude fixe. L'unité du TEC est le *TECU*, où ($1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ électron/m}^2$).

$$TEC = \int_{\text{recepteur}}^{\text{satellite}} N_e dl \quad (1 - 24)$$

Durant les dernières décennies, différents instruments observant l'ionosphère ont été développés et utilisés pour capter les informations liées à cette couche. En général, deux moyens servent à sonder la couche ionosphérique, qui sont les méthodes terrestres et les techniques spatiales ; à savoir les ionosondes, les scatter radars, sondeurs à bord des satellites, les observations par satellite et les mesures de radio-occultation via les récepteurs GPS embarqués sur satellites à basse altitude LEO (orbite terrestre basse, *Low Earth Orbit*). Mais la plupart de ces techniques sont onéreuses et également limitées à la couche basse de l'ionosphère.

I.6.1 Les sondages ionosphériques

Deux types de sondages existent : les ionosondes, qui déterminent la structure verticale de l'ionosphère, et les sondeurs Doppler, qui mesurent le mouvement vertical des différentes couches ionosphériques.

I.6.1.1 Les ionosondes

La densité électronique dans l'ionosphère ' N_e ' est fonction de l'altitude ' h '. D'autre part, on définit une fréquence critique, ' f_c ' ou ' f_oF2 ', nommée aussi fréquence de plasma, selon Li (2007) :

$$f_c = \sqrt{\frac{e N_e}{4\pi^2 \epsilon_0 m_e}} = 8.98 \sqrt{N_e} \quad (1 - 25)$$

Où :

- f_c et N_e sont respectivement exprimés en Hertz et en électrons/m³ ;
- e et m_e représentent respectivement la charge (1.6021×10^{-19} Coulomb) et la masse d'un électron (9.1083×10^{-28} g) ;
- $\epsilon_0 = 10^{-9}/36\pi$ est la permittivité du vide ($8.85418782 \times 10^{-12}$ farad/m).

Le sens physique de cette fréquence critique est le suivant : « soit une couche ionosphérique d'altitude h et de densité électronique égale à N_e ; à cette densité électronique (donc à cette couche d'altitude h) correspond une fréquence critique f_c . Si on suppose qu'une onde électromagnétique ayant une fréquence de sondage f soit envoyée sur cette couche ionosphérique, alors :

- Pour $f \leq f_c \Rightarrow$ l'onde est réfléchiée par la couche ;
- Pour $f > f_c \Rightarrow$ l'onde traverse la couche ».

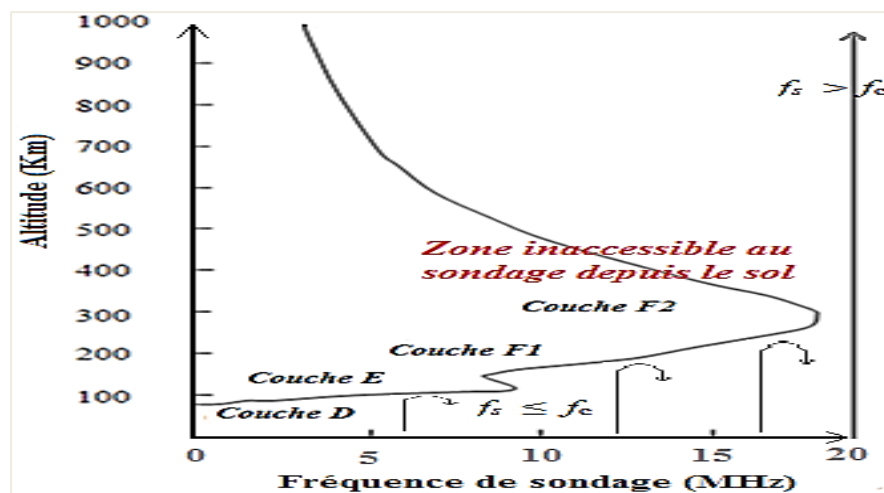


Figure I.11 : Principe de l'ionosonde (Tachema, 2012).

En particulier, le maximum de densité de la couche F2 est caractérisé par une fréquence critique appelée f_0F2 . Comme montre la figure (I.11), aucune onde de fréquence inférieure à f_0F2 ne peut traverser l'ionosphère. Cette relation entre fréquence critique, densité électronique et altitude est à la base de la technique du sondage ionosphérique vertical (écho). Dans le cadre de cette méthode expérimentale, une station au sol envoie des fréquences qui varient entre 1 à 20 Mhz (Röttger, 2004), avec une incidence verticale sur l'ionosphère associée aux réflexions d'ondes électromagnétiques sur les couches ionosphériques. Puisque la densité électronique augmente avec l'altitude jusqu'au maximum de la couche F2, l'onde incidente est réfléchiée par des couches de plus en plus hautes au fur et à mesure que la fréquence de cette onde augmente. L'onde réfléchiée par l'ionosphère est captée par un récepteur au sol qui mesure le temps de parcours, T , correspondant une hauteur virtuelle, h' , définie par :

$$h' = cT/2 \quad (1 - 26)$$

La hauteur virtuelle est l'altitude à laquelle le signal émis par la station au sol aurait été réfléchi si ce signal s'était propagé à la vitesse c . Le sondage vertical permet donc d'obtenir les fréquences critiques en fonction de la hauteur virtuelle h' , un tel graphique s'appelle un ionogramme. Cette technique expérimentale ne fournit aucune information au-delà de l'altitude du maximum de densité électronique de la couche F2 à partir de stations au sol. Les sondeurs ionosphériques à diffusion incohérente apportent des informations au-delà de cette limite (Sammuneh, 2003). Les ondes VHF (*Very High Frequency*) émises sont rétrodiffusées par les irrégularités du milieu. A partir de ces mesures, des profils complets de densités électroniques peuvent être construits et ceci jusqu'à une altitude de 1000 km. Cette technique est cependant très onéreuse puisqu'elle nécessite des transmissions de haute puissance et d'une antenne réceptrice de grande dimension.

Dans ce contexte, l'Algérie est propriétaire d'une ionosonde de type analogique⁷ (TN022) sise à l'observatoire de Tamanrasset et qui est entretenue par la gérance des laboratoires d'Institut de Physique du Globe de Paris (IPGP) et du Centre de Recherche en Astronomie Astrophysique et Géophysique (CRAAG-Alger). Il existe un réseau universel composé de 130 stations d'ionosondes opérationnelles, illustré par la figure suivante.

⁷ <https://www.ukssdc.ac.uk/>

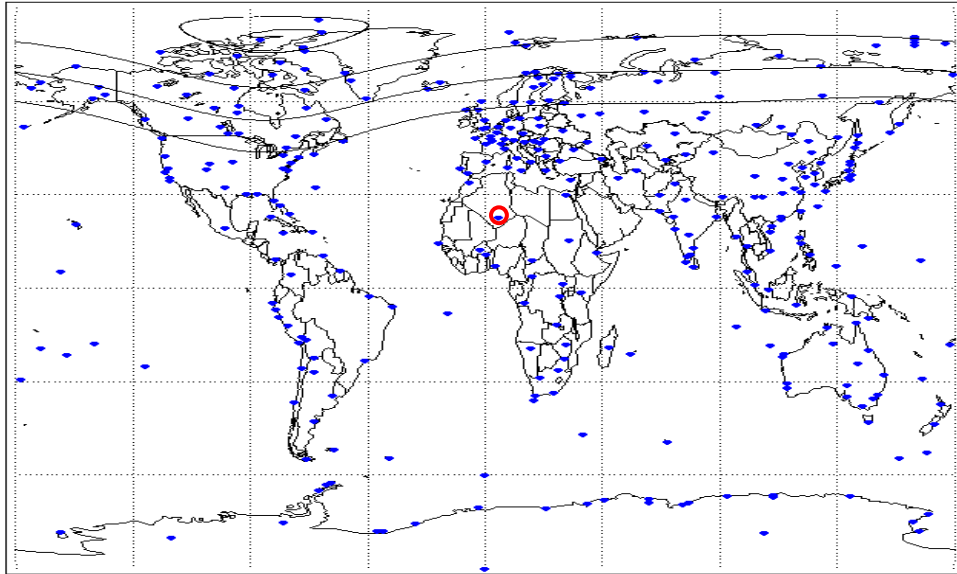


Figure I.12 : Réseau universel des stations ionosphériques (source : UK Solar System Data Centre).

À noter que notre station est focalisée à Tamanrasset au Sud Saharien, aux coordonnées (22.792° N, 5.530° E, 1373m), marquée par un cercle rouge.

I.6.1.2 Le sondeur Doppler

Le sondeur Doppler, figure (I.13), fonctionne en émettant un signal harmonique de fréquence fixée f_0 , toujours dans la bande 1-20 MHz. Un récepteur, qui peut être éloigné de l'émetteur, mesure la fréquence de l'onde réfléchie. Le décalage δf que peut présenter l'onde réfléchie par rapport à l'onde incidente provient de l'effet Doppler induit par la vitesse verticale 'v' de la couche ionosphérique réfléchissante (Occhipinti, 2006).

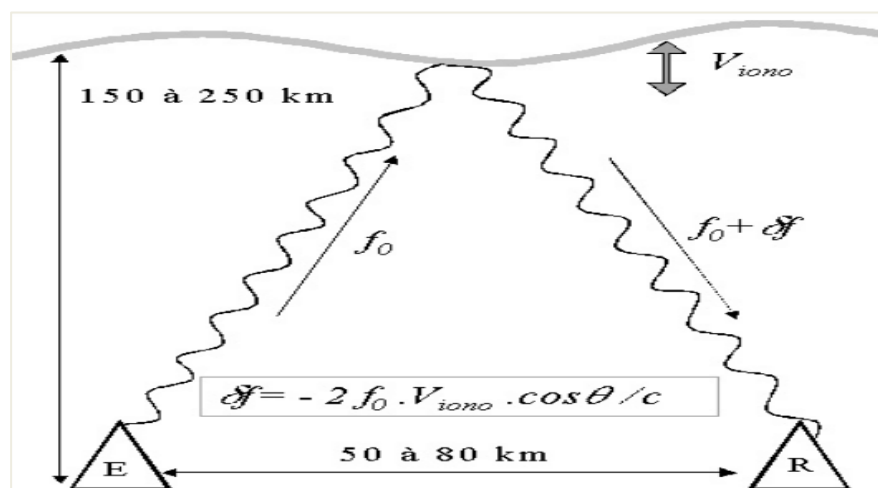


Figure I.13 : Principe du sondeur Doppler (Occhipinti, 2006).

Il est à noter que ces méthodes de sondage et de contrôle ionosphérique présentent l'inconvénient de ne pouvoir être réalisées qu'à un instant donné et en un point donné.

1.6.2 Le Riomètre

Le Riomètre (pour *Relative Ionospheric Opacity Meter for Extra-Terrestrial Emissions of Radio noise*) ; communément connu sous le nom : ‘*Relative ionospheric opacity meter*’ est un équipement de mesure de l’absorption ionosphérique basé sur la mesure du bruit radio cosmique lors de sa propagation dans l’ionosphère (à des altitudes ionosphériques comprises entre 60 et 110 km). Principalement, un riomètre est basé sur un récepteur radioélectrique sensible étalonné fonctionnant dans la gamme de fréquences radio VHF (~30-50 MHz) qui enregistre les fluctuations d’absorption des ondes cosmiques ionosphériques dans des conditions instables (Bezrodny et al., 2010). Le récepteur est connecté à une antenne de transmission qui envoie des faisceaux ascendants (antenne radio passive). Le récepteur collecte le bruit radio naturel du soleil, des planètes et des étoiles, ainsi que sa variation au cours d’une seule journée sidérale. La variation quotidienne moyenne sur plusieurs jours consécutifs est appelée courbe de jours calme (He et al., 2014). L’existence d’un phénomène d’absorption ionosphérique peut être révélée par une comparaison du niveau de bruit actuel du ciel avec la courbe de jour calme.

Les Riomètres sont encore utilisés aujourd’hui pour la recherche ionosphérique et sont généralement situés dans les zones polaires et sub-polaires (étude des effets des aurores boréales sur la propagation radioélectrique, cas de l’observatoire HAARP⁸).

1.6.3 Le Radar

Cette méthode appelée « *Thomson-scatter-sounding* » est basée sur le principe de transmission verticale vers l’ionosphère d’ondes radio avec des fréquences plus hautes que la fréquence critique de la couche F2. Le champ électrique qui est traversé par cette fréquence crée une oscillation des électrons libres, produisant ainsi un signal (rayonnement secondaire) qui a la même fréquence que l’onde originale. L’intensité mesurée est proportionnelle au nombre d’électrons libres dans l’ionosphère, car chaque électron transmet en retour d’une façon incohérente une petite quantité de l’énergie incidente. L’intensité du rayonnement secondaire est mesurée sur Terre par une antenne. Pour un Radar en bande ‘C’ de fréquences allant de 300 MHz à 1 GHz, l’erreur ionosphérique est de l’ordre de quelques centimètres (Röttger, 2004).

⁸ High Frequency Active Auroral Research Program, Alaska, États-Unis.

I.6.4 Global Positioning System, GPS

A partir des observations GPS, réfraction des ondes transmises à travers l'ionosphère depuis le satellite GPS, les mesures du TEC peuvent être ultérieurement dérivées. Généralement, un seul récepteur GPS peut observer de 8 à 10 satellites ; ce qui signifie que 8 à 10 mesures de TEC ionosphérique de différents angles d'élévation sont ainsi dérivées. De-ce-fait, un réseau dense de stations GPS nous permet d'effectuer un grand nombre de mesures du paramètre physique TEC.

Dans la pratique, on utilise la combinaison linéaire Geometry-Free (L_4) qui est formée à partir des observations bi-fréquences pour éliminer tous les termes relatifs à la géométrie (distances) et aux timing (horloges). En fait, cette combinaison dépend essentiellement de la réfraction ionosphérique et des retards différentiels de phase.

Dans le cas des observations de code (pseudo-distance) la réfraction ionosphérique pour chaque fréquence dépend du contenu électronique total. Et pour les observations de phase, la méthode sera biaisée par un terme inconnu qui est le terme de l'ambiguïté. Cette dernière peut estimer en même temps que les autres paramètres du modèle ionosphérique ; sinon on peut utiliser les observations de code P pour étalonner l'ambiguïté (Hofmann-Wellenhof et al., 2008). En ce cas il faut prendre en compte les effets de multi-trajets ; la précision formelle de cette méthode est autour de 1 TECU. Cette méthode est utilisée pour estimer les séries temporelles du TEC.

De nos jours, les satellites GPS sont capables de fournir plus de détails sur la structure entière de l'ionosphère et de ses activités.

I.6.5 DEMETER

Le Demeter⁹ est un microsatellite, lancé en juin 2004 par le centre français CNES (Centre National d'Etudes Spatiales), qui a pour objectifs scientifiques d'étudier les perturbations ionosphériques dues aux effets séismo-électromagnétiques engendrés par les activités anthropogènes (rayonnement harmonique des lignes électriques, émetteurs VLF et stations de radiodiffusions HF), et de l'étude globale de l'environnement électromagnétique de la Terre, figure (I.14).

⁹ Detection of Electro-Magnetic Emissions Transmitted from Earthquake Regions.

Les composantes du Demeter sont nombreuses : Trois sondes électriques et trois autres magnétiques (six composants du champ électromagnétique spécifiques au courant continu à $f=3.5$ MHz) et une sonde dite 'Langmuir', un spectromètre d'ion et un analyseur énergétique de particules. Ces sondes sont associés à des équipements distincts : A bord du satellite une importante capacité de mémoire (8Gbits)

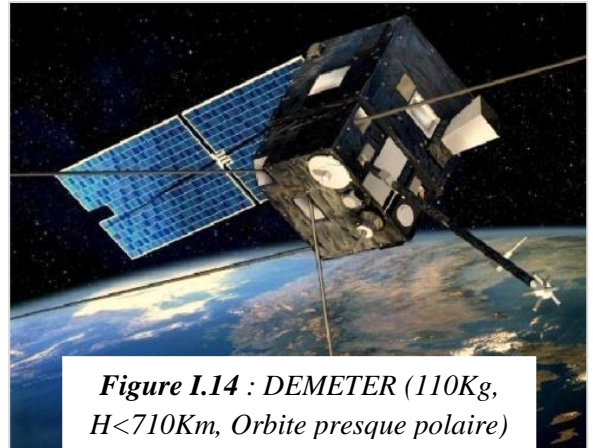


Figure I.14 : DEMETER (110Kg, $H < 710$ Km, Orbite presque polaire)

permettant l'enregistrement des données autour de la Terre, associé à un système de relevé télémétrique à haut débit (Parrot, 2002). Il est à noter que la mission Demeter a pris fin en mois de décembre 2010.

Actuellement, ils existent d'autres méthodes et sondes ionosphériques basées sur des techniques d'observations spatiales, à savoir :

- Rotation de Faraday et télédétection par Interférométrie radar (InSAR¹⁰) : le principe de cette technique est basé sur l'utilisation de deux images radar (amplitude et phase) acquises par l'antenne, à bord du satellite, à deux moments différents (Jehle et al., 2005). En fait, les ondes électromagnétiques traversant l'ionosphère subissent une rotation de Faraday du vecteur de polarisation, qui modifie les caractéristiques de polarisation et de phase du signal électromagnétique. Outre le retard de trajet induit par l'ionosphère, qui se manifeste par un décalage de distance dans les images spatiales SAR, l'ionosphère induit également un faible effet dépendant de la polarisation qui peut devenir important en bande L ou à des fréquences plus basses.

La technique de rotation de Faraday, limitée à une hauteur inférieure à 2000 km, permet d'atténuer les erreurs de phase ionosphérique sur l'interférométrie polarimétrique SAR. (Jehle et al., 2009; Zhu et al., 2019).

- PRARE¹¹ : C'est un système, allemand, de suivi satellitaire à micro-ondes bidirectionnelles. Basé sur deux méthodes, différence de temps de parcours des signaux transmis simultanément dans les bandes X à une fréquence de 8.5 GHz et S à une fréquence de 2.2 GHz et les vitesses de propagation de groupe ou de phase, servant de

¹⁰ Interferometric Synthetic Aperture Radar (radar à synthèse d'ouverture).

¹¹ Precise Range and Range-rate Equipment.

base à calculer les corrections ionosphériques correspondantes ainsi que le contenu électronique total dans les directions oblique et verticale. (Flechtner et al., 1997; Komjathy, 1997; Seeber, 2003)

- DORIS¹² : Ce système français a été développé à l'origine pour la détermination de l'orbite précise des satellites LEO. Basé sur les observations de phase à double fréquence en bande L (2036.25 MHz et 401.25 MHz), ce système est hautement qualifié à la modélisation globale du contenu électronique total vertical (VTEC) et à la distribution des électrons libres de la couche ionosphérique. (Willis et al., 2007; Dettmering et al., 2014).
- Radio-occultation : Utilisation des données collectées (signaux) par des récepteurs GNSS embarqués sur des satellites à basse altitude, LEO. (Angling et al., 2018; Danzer et al., 2015).

¹² Doppler Orbitography and Radio Positioning Integrated by Satellite.

I.7 Réfraction ionosphérique du signal GPS

La réfraction atmosphérique a pour effet d'incurver la direction de propagation du signal GPS/GNSS, de provoquer un retard dans la propagation des modulations. Ce phénomène est lié d'une part, à l'influence de l'atmosphère neutre (la Troposphère) et d'autre part, à l'effet de l'atmosphère ionisée ; on parle alors de réfraction ionosphérique (Leick et al., 2015).

I.7.1 Vitesse de groupe et vitesse de phase

Cette notion est importante pour comprendre la physique de la réfraction ionosphérique du signal GPS. En effet, il y a une vitesse de propagation dans l'ionosphère pour la phase de la porteuse (vitesse de phase), et une autre vitesse (vitesse de groupe) pour le code du signal (Schunk et Nagy, 2000).

On rappelle la forme du signal GPS :

$$S_{GPS}(t) = A_1 P(t) E(t) \cos(\omega_{L_1} t) + A_1 C(t) E(t) \sin(\omega_{L_1} t) + A_2 P(t) E(t) \cos(\omega_{L_2} t) \quad (1 - 27)$$

Où :

- A_1, A_2 : respectivement l'amplitude des porteuses L1 et L2 ;
- $P(t), C(t) = \{+1, -1\}$: respectivement l'état du code P et du code C/A ;
- $E(t) = \{+1, -1\}$: le message de navigation ;
- $\omega_{L_1}, \omega_{L_2}$: respectivement la fréquence des porteuses L1 et L2.

Considérons une onde électromagnétique dans l'espace ayant une longueur d'onde λ et une fréquence f . Sa vitesse de phase est :

$$\omega = 2\pi f, \quad k = 2\pi/\lambda, \quad v_{ph} = \omega/k$$

$$v_{ph} = \lambda f \quad (1 - 28)$$

Dans le cas du système GPS, les ondes porteuses L1 et L2 se propagent avec la vitesse de phase.

La vitesse de groupe d'ondes ayant des fréquences légèrement différentes est : $v_{gr} = d\omega/dk$

$$v_{gr} = -\frac{df}{d\lambda} \lambda^2 \quad (1 - 29)$$

Cette vitesse est applicable sur les mesures de code en GPS (Leick et al., 2015).

Une relation entre la vitesse de phase (v_{ph}) et la vitesse de groupe (v_{gr}) peut être dérivée en formant la différentielle totale de l'équation (1-28) :

$$\mathbf{v}_{gr} = \mathbf{v}_{ph} - \lambda \frac{d\mathbf{v}_{ph}}{d\lambda} \quad (1 - 30)$$

La vitesse de groupe est équivalente à la vitesse de phase dans un milieu non dispersif. En fait, la propagation dans un milieu dépend de son indice de réfraction n . En général on obtient la vitesse de propagation par : $\mathbf{v} = \mathbf{c}/n$, alors :

$$\mathbf{v}_{ph} = \mathbf{c}/n_{ph} \quad , \quad \mathbf{v}_{gr} = \mathbf{c}/n_{gr}$$

La différentiation de \mathbf{v}_{ph} par rapport λ donne :

$$\frac{d\mathbf{v}_{ph}}{d\lambda} = -\frac{\mathbf{c}}{n_{ph}^2} \frac{dn_{ph}}{d\lambda} \quad (1 - 31)$$

En substituant les trois dernières équations dans (1-30) on aura :

$$\frac{\mathbf{1}}{n_{gr}} = \frac{\mathbf{1}}{n_{ph}} \left(\mathbf{1} + \lambda \frac{\mathbf{1}}{n_{ph}} \frac{dn_{ph}}{d\lambda} \right) \quad (1 - 32)$$

On peut inverser cette équation sous la forme suivante par le biais de $(\mathbf{1} + \varepsilon)^{-1} = \mathbf{1} - \varepsilon$:

$$n_{gr} = n_{ph} - \lambda \frac{dn_{ph}}{d\lambda} \quad (1 - 33)$$

En différenciant la relation $c = \lambda f$ par rapport à λ , on aura alors (Fernandez, 2004) :

$$n_{gr} = n_{ph} + f \frac{dn_{ph}}{df} \quad (1 - 34)$$

Ces concepts de vitesse de groupe et de vitesse de phase trouvent leur application dans le traitement de données GPS.

1.7.2 Le retard ionosphérique

On rappelle que l'ionosphère est formée de plusieurs strates allant d'environ 50 jusqu'à 1000 km d'altitudes au-dessus de la Terre. Cette couche est considérée comme un milieu dispersif pour les signaux électromagnétiques du système GPS où la vitesse de propagation de l'énergie dépend de la fréquence de l'onde. Les mesures du code GPS se propagent comme un groupe, et l'indice de réfraction peut être simplifié comme (Jin et al., 2019) :

$$n_{ph} = \mathbf{1} + \frac{c_2}{f^2} + \frac{c_3}{f^3} + \frac{c_4}{f^4} + \frac{c_5}{f^5} + \dots \quad (1 - 35)$$

Les coefficients c_2, c_3, c_4, \dots ne dépendent pas uniquement de la fréquence mais de la quantité N_e (le nombre d'électrons libres dans un mètre cube qui reflète la densité électronique le long du

chemin de propagation), du champ magnétique, etc. En négligeant les termes de 3^{ème} ordre, on obtient (Jin et al., 2019) :

$$n_{ph} = 1 + \frac{c_2}{f^2} \quad (1 - 36)$$

En différenciant cette équation par rapport à f , on obtient alors :

$$n_{gr} = 1 - \frac{c_2}{f^2} \quad (1 - 37)$$

En comparant les deux dernières équations, on déduit qu'elles diffèrent par le signe positif ou négatif du coefficient c_2 , on rappelle que ce coefficient ne dépend que de la densité électronique de l'ionosphère ' N_e '.

L'estimation du coefficient c_2 est donnée par (Jin et al., 2019) :

$$c_2 = -40.3 N_e \quad (1 - 38)$$

Où : N_e est la densité électronique dans l'ionosphère (électrons/m³) et c_2 est exprimé en Hz².

La relation $n_{gr} > n_{ph}$ est toujours vraie car N_e est positif, d'où $v_{gr} < v_{ph}$.

Et par conséquent il y a « *un retard de groupe et une avance de phase* ».

De ce fait, les mesures de code sont en retard et celles de phase sont en avance. En d'autres termes, la mesure de code (pseudo-distance) est plus longue, tandis que la mesure de phase est plus courte par rapport à la distance géométrique satellite-récepteur (Sammuneh, 2003).

Si on calcule le chemin d'après le *principe de Fermat*, la distance mesurée s est définie par :

$$s = \int n ds \quad (1 - 39)$$

L'intégrale doit être calculée sur tout le parcours de propagation. La distance géométrique s_0 sur la ligne droite entre le satellite et le récepteur est obtenue en remplaçant n par 1 :

$$s_0 = \int ds_0 \quad (1 - 40)$$

La différence Δ^{iono} entre la pseudo-distance mesurée et la distance géométrique est la réfraction ionosphérique :

$$\Delta^{iono} = \int n ds - \int ds_0 \quad (1 - 41)$$

Pour les indices de réfraction de phase n_{ph} et de de groupe n_{gr} , cette dernière équation peut être écrite :

$$\begin{cases} \Delta_{ph}^{iono} = \int \left(1 + \frac{c_2}{f^2}\right) ds - \int ds_0 , \\ \Delta_{gr}^{iono} = \int \left(1 - \frac{c_2}{f^2}\right) ds - \int ds_0 \end{cases} \quad (1 - 42)$$

Acceptant que ds soit égal à ds_0 :

$$\begin{cases} \Delta_{ph}^{iono} = -\frac{40.3}{f^2} \int N_e ds_0 , \\ \Delta_{gr}^{iono} = \frac{40.3}{f^2} \int N_e ds_0 \end{cases} \quad (1 - 43)$$

Ainsi, le résultat final en dimension de longueur (en mètre) :

$$\begin{cases} \Delta_{ph}^{iono} = -\frac{40.3}{f^2} TEC , & \text{Raccourcissement apparent du parcours} \\ \Delta_{gr}^{iono} = +\frac{40.3}{f^2} TEC , & \text{Allongement apparent du parcours} \end{cases} \quad (1 - 44)$$

On a donc le retard ionosphérique sur les observations GPS (Todorova et al., 2007) :

$$\Delta_i^{iono} = \pm \frac{40.3}{f_i^2} TEC = \pm \frac{I}{f_i^2} \quad (1 - 45)$$

Où :

- Δ_i^{iono} : retard ionosphérique de la fréquence i (en mètres) ;
- f_i : fréquence de la porteuse (1575.42 MHz pour L1, 1227.60 MHz pour L2) ;
- + : signe des observations de code / - : signe des observations de phase ;
- I : paramètre du retard ionosphérique (=40.3×TEC).

I.8 Effets ionosphériques sur les signaux GNSS

L'effet de la couche ionosphérique sur la propagation des ondes radioélectriques constitue l'enjeu d'un investissement durable de la recherche en domaine spatial. Le chemin d'une onde radio est influencé par les électrons libres que renferme la couche ionosphérique. L'indice de réfraction dépend de la concentration en électrons, le champ magnétique du milieu, la fréquence et la polarisation de l'onde transmise. Les perturbations ionosphériques peuvent être produites par l'activité solaire ou par des perturbations du champ magnétique terrestre. Toutefois, les perturbations ionosphériques sont liées à l'agissement du Soleil. Les ondes radioélectrique, dont le spectre de fréquence varie de 30 MHz jusqu'à 2 GHz environ, peuvent être perturbées lors de leur traversée de la couche ionosphérique (Kelley, 2009), de différentes manières :

- Atténuation et variation de phase du signal ;
- Absorption quasi-totale et réflexions (Pavelyev et al., 2007) ;
- Changement de la direction de propagation, d'où la modification du trajet de propagation;
- Modification de la vitesse de propagation ($v \neq c$).

I.8.1 Effet de l'orage ionosphérique

Un orage ionosphérique est une forme de turbulence dans l'ionosphère de la haute atmosphère. De tels orages sont provoqués par des éruptions/filaments solaires (*solar flares*) très intenses de plusieurs centaines de milliers de kilomètres de long, qui lancent propulsivement des particules énergétiques (Fig. I.15). Lors d'une éruption solaire, des protons et des électrons avec des énergies de l'ordre du méga électron-volt sont capables d'augmenter considérablement l'ionisation.



Figure I.15 : Eruption solaire intense
(source: Solar Dynamics Observatory, NASA).

Si l'éruption solaire est suffisamment grande en intensité et en durée, il peut y avoir le déclenchement des orages ionosphériques (Sierro, 2010). Ces derniers peuvent se produire également suite au vent solaire à très haute vitesse (HSSWS, *High Speed Solar Wind Stream*) qui est considéré comme une conséquence d'éjections de la couronne solaire (CME, *Coronal Mass Ejections*).

Concernant ces orages ionosphériques on distingue deux phases (Stankov et al., 2009) :

- Phase positive de l'orage ionosphérique \Rightarrow Augmentation du TEC (*TEC enhancement*).
- Phase négative de l'orage ionosphérique \Rightarrow Diminution du TEC (*TEC depletion*).

I.8.2 Effet de l'orage magnétique

Un orage magnétique, appelé aussi tempête géomagnétique (*geomagnetic storm*), est une perturbation majeure de la magnétosphère terrestre. Elle se produit lors d'important échange d'énergie en provenance du vent solaire dans l'environnement terrestre. Ces orages affectent le champ magnétique de la Terre et se produisent en même temps que les orages ionosphériques (affectent les conditions des couches ionosphériques ionisées), en plus ils peuvent avoir la même origine. Les orages sont liés aux incréments de la densité électronique dans la partie basse de l'ionosphère (réchauffement) et de l'absorption des ondes radioélectrique simultanément (Sierro, 2010), ce qui modifie le parcours des signaux radio et occasionnera les perturbations aux systèmes de positionnement par satellite, à savoir le GPS. L'indice des tempêtes géomagnétiques est nommé « *G-Scale* », il est utilisé pour décrire les conditions météorologiques spatiales pouvant perturber les systèmes sur Terre.

Le centres NOAA et GFZ utilisent un système à cinq niveaux appelé l'Échelle-G « *G-Scale* », pour indiquer la sévérité de l'activité géomagnétique (Fig. I.16). Cette échelle varie de G1 à G5, chaque niveau-G a une certaine valeur Kp associée avec. Ceci varie à partir de G1 pour une valeur de Kp-5 à G5 pour une valeur de Kp-9.



Figure I.16 : Niveaux-G (mineure à extrême activité) des tempêtes géomagnétiques.

G0 (activité très basse) correspond à $Kp=[0-4]$ (Adaptée du siteweb: Space Weather Prediction Center, USA).

I.8.3 Effet de la scintillation

La scintillation ionosphérique est produite par des irrégularités à petite échelle (des dizaines de mètres à des dizaines de km) de la densité électronique de l'ionosphère et peut perturber ou fluctuer rapidement l'amplitude et la phase des signaux radioélectriques qui la traversent (déforme le trajet des ondes radioélectriques des satellites GPS) (Boutiouta et al., 2006). Le spectre de fréquence de ces fluctuations se repère essentiellement dans la gamme comprise de 1 Hz à 10 Hz (Kleusberg et Teunissen, 1996). De tels effets peuvent causer des évanouissements

sévères, avec des atténuations qui s'étendent jusqu'à 20 dB, du signal où de rapides variations de phase dépassant l'aptitude d'un récepteur à démoduler le signal. Les régions comprises entre $+30^\circ$ et -30° de latitude géomagnétique ainsi que les zones polaires et équatoriales sont particulièrement sensibles à ce type de phénomène (Jin et al., 2019). Des analyses statistiques menées en différents lieux et pour différentes époques, ont montré que l'intensité des événements de scintillation varie, entre autre, avec la fréquence d'émission, la localisation géographique, l'heure locale et avec l'activité solaire (Lassudrie-Duchesne, 2010).

Conclusion

La couche ionisée de l'atmosphère terrestre est composée de molécules neutres (gaz neutre), des atomes, des ions et des électrons libres ; constituant ainsi un plasma ionosphérique. Ce plasma est généré par le processus de dissociation sous l'effet du rayonnement solaire ultraviolet énergétique. Cette composition atmosphérique de l'ionosphère lui donne une particularité distinctive par rapport aux autres couches, la conductivité électrique (principalement due à la densité en électrons). À une altitude donnée, d'environ 350 km, une couche ionisée formera la région F2, connue par sa forte concentration en électrons libres et en ions positifs. Le maximum d'ionisation peut influencer la direction et la vitesse de propagation des ondes radioélectriques (bande L) des satellites de navigation GPS/GNSS.

Dans les chapitres qui suivent, nous aborderons l'étude des éventuelles perturbations de la densité et du contenu électronique TEC dans l'ionosphère engendrées par les mouvements brusques de terrain occasionnés par les événements sismiques.

Chapitre II

Principe du couplage sismo-ionosphérique

Chapitre
2

Principe du couplage sismo-ionosphérique

Introduction	42
II.1 Avènement sismique et structure de la Terre	43
II.1.1 Les plaques tectoniques.....	44
II.1.2 Les ondes sismiques.....	44
II.1.3 Concepts de la nucléation sismique	46
II.2 Peut-on prédire un séisme ?.....	47
II.2.1 Introduction de la prévision des précurseurs sismiques	48
II.2.1.1 Surveillance et évaluation des sources sismiques.....	49
II.2.1.2 Perspectives de la déformation du milieu et la mesure instrumentale.....	49
II.2.2 Observations naturelles des phénomènes précurseurs	51
II.2.2.1 Secousses prémonitoires	51
II.2.2.2 Anisotropie	51
II.2.2.3 Hydrogéochimie, émission de gaz et surveillance de la nappe phréatique	52
II.2.2.4 Comportement anormal d'animaux	56
II.3 Indices des précurseurs sismo-ionosphériques	58
II.4 Mécanisme des modèles de couplages dynamiques	61
II.4.1 Couplage Lithosphère-Atmosphère-Ionosphère (CLAI).....	61
II.4.2 Couplage Terre solide-Atmosphère	63
Conclusion	65

Introduction

Les tremblements de terre ou séismes ont de tout temps effrayé les populations qui vivent dans certaines zones du globe. Ils peuvent dévaster une région entière, causer des dégâts et sinistrer des dizaines voire des centaines de milliers de personnes. Ils représentent ainsi, le risque naturel majeur le plus meurtrier (entre 2000 et 2019, près de 800 mille de personnes ont été tuées à cause des risques sismique et ses phénomènes associés).

Les séismes se produisent lorsque la surface de la Terre est secouée par la libération d'énergie sismique à la suite du mouvement de larges blocs de la croûte terrestre le long d'une faille (fractures dans la croûte qui peuvent atteindre des centaines de kilomètres et s'étendre dans la croûte de 10 à 20 km).

En fait, pour au moins limiter les énormes pertes humaines et d'atténuer les dégâts matérielles causées par ce phénomène naturel, plusieurs études et recherches scientifiques ont porté sur les séismes et sur la manière de les prévoir. Ainsi, l'évolution des technologies spatiales, à savoir le système de positionnement GPS/GNSS (mesure de nombre d'électrons libres le long du trajet des signaux radioélectriques émises par les satellites GPS) et le satellite d'observation géophysique Demeter (basé sur l'observation de l'émission des ondes électromagnétiques qui perturbe la couche ionosphérique lors du déclenchement de séismes), ont permis de détecter principalement des perturbations de types atmosphériques (perturbations et anomalies du paramètre ionosphériques TEC, variations de température atmosphérique) et physico-chimiques (ex. émanation des gaz radioactifs ; principalement le radon), permettant de prévenir l'arrivée des événements sismiques dans une région donnée.

A cet effet, nous rapportons dans les chapitres suivants, sur l'étude et l'analyse des signaux sismo-ionosphériques qui précèdent les secousses telluriques de magnitude notable ($M \geq 5$).

II.1 Avènement séismique et structure de la Terre

Afin d'appréhender l'origine et les causes du phénomène sismique, on doit tout d'abord passer en revue la structure interne du globe terrestre qui peut générer les conditions de déclenchement des secousses telluriques au niveau de la surface de l'écorce terrestre. A noter que les entités profondes de la Terre constituent l'essentiel de la géodynamique interne qui porte des interactions importantes avec les édifices morpho-structuraux et les astres; y compris la lune.

En effet, la structure du globe terrestre est constitué d'une succession de couches de propriétés physiques différentes : au centre, le *noyau* qui forme 17% du volume terrestre et qui se divise en noyau interne solide et noyau externe liquide ; puis, le *manteau*, qui constitue le gros du volume terrestre (81%) et qui se divise en manteau inférieur solide et manteau supérieur principalement plastique, mais dont la partie tout à fait supérieure est solide ; finalement, la *croûte* (ou écorce) qui compte pour moins de 2% en volume et qui est solide (plaques tectoniques).

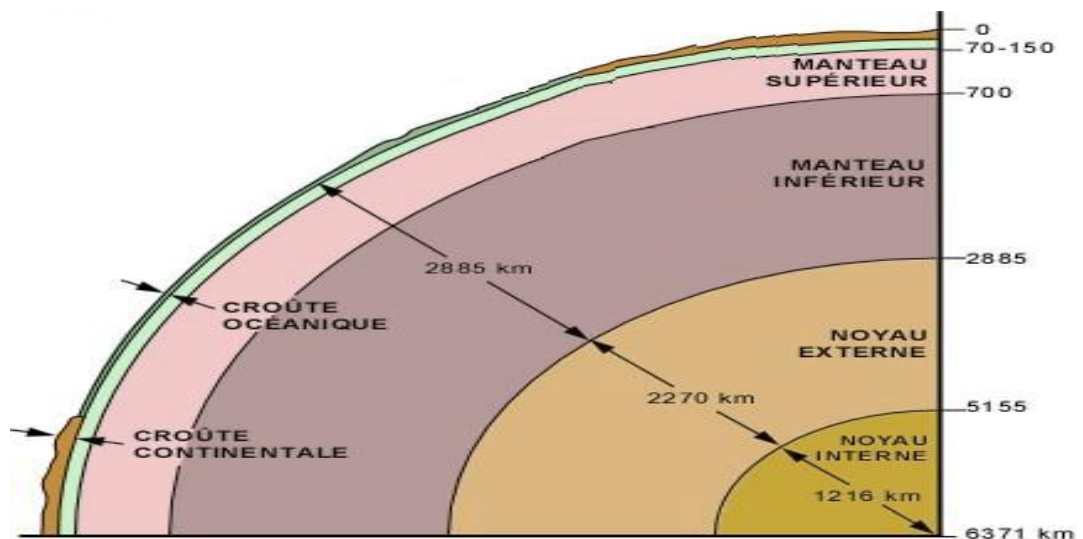


Figure II.1 : Juxtaposition des couches à l'intérieur du globe terrestre (source: <http://ggl.ulaval.ca>).

La couche plastique du manteau supérieur est appelée *asthénosphère*, alors qu'ensemble, les deux couches solides qui la surmontent, soit la couche solide de la partie supérieure du manteau supérieur et la croûte terrestre, forment la *lithosphère*. On reconnaît deux types de croûte terrestre : la *croûte océanique* (en gros se situe sous les océans, d'épaisseur environ 5 km) est formée de roches basaltiques de densité 3.2 et la *croûte continentale* (se situe au niveau des continents de 30 à 100 km sous les massifs montagneux).

L'intérieur de la Terre est donc constitué d'un certain nombre de couches stratifiées, qui se différencient par la nature de leur état (solide, liquide ou plastique), ainsi que par leur densité.

II.1.1 Les plaques tectoniques

Au début des années soixante, la théorie de la tectonique des plaques est apparue, théorie proposée en 1915 par le physicien-météorologue Alfred Wegener. Ces plaques sont portées par trois mouvements, du manteau asthénosphérique sous-jacent, relatifs des plaques les unes par rapport aux autres : la divergence, la convergence ou le coulissage (Vallée, 2007). A ces trois types d'interaction, sont associées les trois grandes familles de failles :

- La faille normale est divergente (extensive) ;
- La faille inverse ou chevauchante est convergente (compressive) ;
- La faille décrochante est extensive (les axes d'extension et de compression sont dans le plan horizontal).

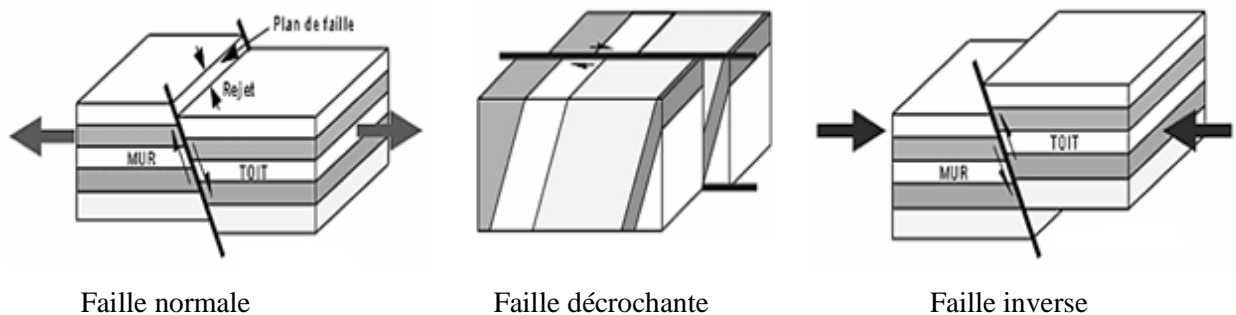


Figure II.2 : Représentation schématique des différents types de failles (source : <http://ggl.ulaval.ca>).

II.1.2 Les ondes sismiques

Le phénomène de propagation des ondes sismiques porte une caractéristique physique importante qui est nécessairement liée par la nature du milieu physique et de l'énergie de la propagation des ondes électromagnétiques de l'intérieur vers l'extérieur en parcourant les différentes couches qui enveloppent le noyau terrestre.

A l'intérieur de la Terre il existe un certain nombre de couches superposées, qui se distinguent par leur état solide, liquide ou plastique, de densités différentes. Les recherches sismologiques ont approuvé à la faveur de l'expérimentation, notamment de Mohorovicic, Gutenberg, Lehmann et Benioff, que l'état et la densité des couches ont un effet direct sur la vitesse et sur l'accélération de ces ondes sismiques en traversant les différents milieux lors d'un tremblement de terre. Ces ondes sont engendrées lors de la délibération brutale d'énergie tellurique. Cette énergie prend plusieurs formes, à savoir : sous forme de chaleur, de vibration et de propagation des ondes électromagnétiques en se propageant sous forme sphérique (nucléation) (Kayal, 2008).

Ainsi, on doit noter que la vitesse de propagation de ces ondes est fonction de l'état et de la densité des structures géologiques traversées, en spécifiant deux grands types d'ondes :

- Les ondes de volume (ondes de fond) qui traversent la Terre et qui se propagent dans toutes les directions : comprennent les ondes de cisaillement (ondes S) et les ondes de compression (ondes P) ;
- Les ondes de surface (causent des modifications topographiques et des dommages aux populations) qui se propagent parallèlement à la surface terrestre et qui sont guidées par des interfaces entre deux milieux de propriétés différentes : comprennent les ondes de Love et de Rayleigh.

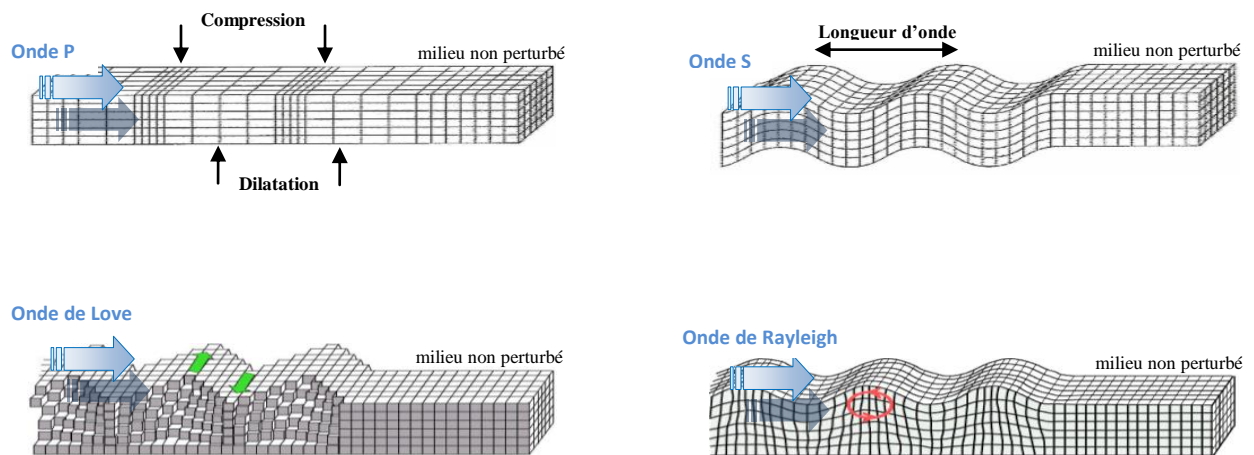


Figure II.3 : Déplacement des particules d'un milieu à travers lequel se propagent les ondes sismiques : P, S, L et R. Modifié d'après Pasquet (2014).

II.1.3 Concepts de la nucléation séismique

Pour appréhender profondément le domaine de la prévision sismique, il est extrêmement important d'estimer la taille et la forme de la zone de nucléation séismique. Cette zone sismique contient a priori des roches fissurées et déformable au niveau de la lithosphère, sous l'influence de contraintes tectoniques (Fleitout, L., 1991). Dans les années soixante-dix, les chercheurs soviétiques et occidentaux, ont montré l'existence de changements physiques au niveau de la croûte terrestre au-delà de la zone épiscopale. En fonction de la puissance du séisme, ces changements se traduisant par des déformations, des variations de la vitesse des ondes sismiques, des émanations de gaz rares (radon), associées à des modifications de conductivité électrique à l'échelle de la croûte terrestre, etc. (Pulinets, 2004).

A la base d'un modèle rhéologique spécifique au calcul de la déformation élastique de la croûte terrestre, évoqué par Dobrovolsky et al. (1979), le rayon de la zone affectée par les effets précurseurs d'un séisme imminent peut être estimé à l'aide de l'équation suivante :

$$r = 10^{0.43 * M_w} \quad (2 - 1)$$

Avec :

- r : Rayon de la zone de préparation du séisme (rayon de déformation), en kilomètres ;
- M_w : Magnitude ¹ du séisme (amplitude maximale des ondes sismiques sur un sismogramme et représente l'énergie produite à la source du séisme).

Prenant comme exemple démonstratif deux cas : un séisme de magnitude 5 a pour rayon de 141 km et un autre de magnitude 9 a pour rayon de 7413 km.

¹ Instaurée, en 1935, par le sismologue américain Charles Francis Richter.

II.2 Peut-on prédire un séisme ?

Les séismes sont des phénomènes naturels les plus catastrophiques qui se produisent à différentes échelles et à différentes périodes et qui se propagent à la surface de la Terre souvent peuplée et colonisée à des seuils différents. Au niveau de l'écorce terrestre il existe plusieurs zones distinctes selon la fragilité de la matière. L'anticipation des chercheurs en nature de détermination de l'heure et de l'endroit de l'évènement est souvent critique vu la non complétude et la caractérisation des paramètres de propagation d'énergie. De nombreuses effets anté-perturbations de la densité électronique de l'ionosphère ont été observés, dues aux grands événements sismiques (Blanc, 1985). Ces observations sont interprétées comme résultat d'une propagation, au niveau de la haute atmosphère, d'ondes de gravité ou d'ondes acoustiques engendrées par les mouvements vibratoires du sol, non seulement au voisinage de l'épicentre mais également à grande distance lorsque les ondes sismiques se propagent autour de la Terre (Artru, 1998). D'autres auteurs constatent qu'il est difficile de comprendre le mécanisme de perturbations ionosphériques ayant lieu quelques jours ou quelques heures avant l'occurrence d'un tremblement de terre notable (Parrot et al., 1993).

Depuis plus de soixante ans, à l'instar du Japon et les États unis, divers pays ont déployés d'importants efforts en matière de prévision et de prédiction séismique. La recherche en ce domaine est donc devenue une priorité majeure ; permettant ainsi de détecter, bien à l'avance, une éventuelle activité sismique et de mettre à l'épreuve toute un système prévisionnel fiable et efficace.

Aujourd'hui, les systèmes spatiaux ont la capacité de surveiller la Terre et son atmosphère à des échelles spatiales et temporelles variées. A titre indicatif, le micro-satellite français d'observation géophysique DEMETER (étude de l'environnement électromagnétique de la Terre, analyse des perturbations ionosphériques en relation avec l'activité sismique et humaine) et le satellite chinois Zhangheng 1² (surveillance des anomalies électromagnétiques dans l'atmosphère terrestre et l'identification des corrélations de ces variations avec les séismes).

D'autres hypothèses rénovatrice, en domaine de la prévision séismique, ont été avancées en faisant appel à la redistribution des charges électriques à la surface de la Terre, puis dans la haute atmosphère (Pulinets et al., 1994). Comme argument de base, nous citons les références (Bonchkovsky 1954; Chernyavski 1955; Davies and Baker, 1965; Nasyrov 1978; Sobolev, Husamiddinov 1985; Gaivoronskaya 1991) et plus récemment, d'autres approches focalisées sur

² Également désigné par son appellation anglaise 'China Seismo-Electromagnetic Satellite, CSES', en orbite depuis le 02 Février 2018.

la mesure du contenu électronique par les données du système GPS ont pu être adapté par plusieurs auteurs tels que : Orús et al., 2005; Liu et al., 2009; Priyadarshi et al., 2011; Li et al., 2015; Ulukavak et Yalçinkaya 2017; Ulukavak et al., 2020; Tachema et Nadji, 2019; Tachema et Nadji, 2020). Par ailleurs, une investigation via le satellite Demeter; destiné à la surveillance séismique a approuvé son succès en domaine de prévision séismique pour des évènements de magnitudes notables (Zlotnicki et al., 2006; Parrot et al., 2006a; Bhattacharya et al., 2007; Sarkar et al., 2007; Zhu et al., 2008; Zhang et al., 2009; Parrot, 2012; Benghanem, 2013; Pisa et al., 2017).

Dans la même tendance de prévision de nouvelles méthodes se sont développées pour mettre en harmonie la fiabilité et la rigueur des résultats attendues en ce domaine. Alors on distingue généralement une prévision (géophysique) qui s'appuie sur le calcul d'aléa estimé par les données d'inventaire exhaustif et homogène. Comme il existe d'autres essais qui utilisent les données géodésiques et en s'appuyant sur une démarche analytique des anomalies du TEC ionosphérique.

II.2.1 Introduction de la prévision des précurseurs séismiques

La prévision séismique permet de prédire l'endroit et les délais de temps (quelques jours) préconisé pour la manifestation d'un évènement tellurique notable ($M \geq 5$). L'analyse des données de la densité électronique de la couche ionosphérique F2 nous a permis de mieux visualiser la trace physique du signal qui marque l'anomalie du paramètre TEC via les précurseurs séismiques envisagés pour une éventuelle prévision.

En effet la sismicité instrumentale grâce aux algorithmes de calcul, dérivant du traitement du signal telle que la méthode d'analyse des ondelettes (wavelet analysis), peut également contribuer à prédire le temps du déclenchement du séisme à travers le dépouillement de la trace séismique enregistrée au niveau des stations de surveillance séismique. Le délai de prévision sur Terre (quelques minutes) est très différent de celui enregistré par rapport à la couche ionosphérique (plusieurs jours). Cette différence dépend de la caractéristique physique du milieu dans lequel traverse l'onde électromagnétique de l'évènement tellurique. Du point de vue théorique, le transfert d'énergie dépend de l'intensité de la source émettrice et du milieu d'environnement (liquide, solide et plasma) selon le modèle principal de propagation des ondes optiques, conformément aux lois de Snell-Descartes.

II.2.1.1 Surveillance et évaluation des sources sismiques

Pour identifier la localisation d'un futur séisme, il est nécessaire de bien comprendre les processus permettant de générer de nouvelles sources sismiques (failles). Cela implique la compréhension du mécanisme de la déformation locale et les processus géologiques impliqués au phénomène envisagé.

Pour cela, les chercheurs géologues et géophysiciens (sismologues) ont essayé de faire associer les paramètres nécessaires à la restructuration du phénomène séismique et de modéliser son effet. Pour les sismologues le catalogue de la sismicité d'une région devient nécessaire pour pouvoir effectuer les études de l'aléa séismique et de prédire ainsi l'occurrence séismique et la période de retour d'évènements notables. Pour cet objectif, plusieurs réseaux de surveillance sismique nationaux et internationaux participent à la résolution de l'aléa. Parallèlement, il existe d'autres réseaux géodésiques, répartis de façon plus ou moins régulière à travers les continents, pour mesurer le contenu électronique de l'ionosphère ainsi pour assurer la surveillance des mouvements différentiels du sol. Pour mieux appréhender le risque sismique, les géologues utilisent plusieurs sources d'informations de surface et de subsurface pour décrire la structure des couches géologiques ainsi que leurs cartographies. La délimitation des milieux d'environnement au sein de l'écorce terrestre est une opération concluante et fondamentale, car elle permet d'envisager les seuils d'organisation spatio-temporelle et notamment la distinction entre les entités terrestre-céleste (Asthénosphère-Lithosphère-Ionosphère). Ces milieux sont généralement entachés par des anomalies liées à la nature spécifique à chaque milieu (solide-liquide et plasma (ionisée)), qui reste encore une thématique difficile à résoudre. Cependant, il s'est avéré que l'utilisation des méthodes indirectes ; dérivant de la géodésie spatiale (TEC) et le traitement de signal GPS/GNSS, peuvent apporter une contribution importante à la prévision séismique.

II.2.1.2 Perspectives de la déformation du milieu et la mesure instrumentale

En domaine géophysique, il existe plusieurs approches pour appréhender la quantification des sources sismiques à la faveur de l'énergie dissipée lors des séismes notables. Parmi ces méthodes, on évoque la sismologie instrumentale (séismographe) qui s'est développait considérablement en ces dernières décennies pour quantifier les différents paramètres séismogènes relatifs aux grands accidents de failles où se délibère l'essentielle d'énergie. En effet, chaque source sismique (faille) porte une longueur et une largeur qui délimitent une surface de frottement entre les blocs crustaux, donnant en conséquence l'aléa du risque sismique. Un évènement notable est souvent mis en évidence à travers des précurseurs

séismiques et des observations naturelles. Parmi ces observations, la donnée géodésique intervient également pour prédire les anomalies significatives constatées au niveau des couches supérieures de l'atmosphère (ionosphère).

A cet effet, nous soulignons le lien existant entre les anomalies géophysiques et géodésiques à la faveur des ondes électromagnétiques. Les études expérimentales en physique prouvent que la matière (géologie) est sensible à toute variation de champ électrique, magnétique, thermique ou autre pour donner en conséquence différents types d'anomalies, entre autres les déformations sous tenseurs (physique) et contraintes tectoniques (géologie).

En pratique, toute déformation géologique en surface, sur un site donné, peut être mesurée et surveillée par différents instruments technologiques à haute précision géodésique (ex. les techniques de relevé temporel via satellites GPS/GNSS) et par les investigations géospatiales (télédétection, géomatique, photogrammétrie, etc.). Dans ce contexte, nous soulignons que la position d'un point réparti de part et d'autre de la faille est souvent identifiée et mesurée grâce aux coordonnées euclidiennes. Du point de vue analyse, chaque point du plan de faille, peut être modélisé vis-à-vis aux contraintes tectoniques impliquées à ses abords, pour livrer le taux potentiel de sa déformation future. Cette déformation surfacique, intéresse toute une région, à une profondeur donnée et une longueur donnée d'un segment de faille ; favorisant ainsi l'évaluation de la magnitude séismique potentielle (extrême) pouvant affecter un site donné (à la faveur des relations empiriques).

Les segments de failles actives, sont souvent situées en zone à risque sismique où l'aléa est omniprésent. Cette perspective est importante pour localiser et gérer le mécanisme de la déformation au sein d'un site donné ainsi de prédire les occurrences séismiques en fonction des périodes de retour correspondantes.

II.2.2 Observations naturelles des phénomènes précurseurs

Des phénomènes annonciateurs précèdent, souvent, les évènements séismiques notables, parmi ces phénomènes on distingue : la baisse des niveaux d'eau dans les puits, d'étranges lueurs dans le ciel, un comportement particulier des animaux et des sons inhabituels (Jousset et al., 2009). En fait, pour certains tremblements de terre, des phénomènes précurseurs ont été authentifiés et, s'ils étaient détectés de manière fiable lors d'évènements futurs, pourraient constituer la base d'une prévision séismique à court terme. Certains phénomènes préenregistrés n'ont pas une bonne interprétation scientifique, mais les conditions géologiques des matériaux de la croûte terrestre, juste avant une rupture majeure, pourraient avoir des effets à la surface. L'une des principales caractéristiques des matériaux crustaux, avant la rupture, est l'accumulation de contraintes dans les roches en profondeur. En conséquence, ce niveau très élevé de stress produisent de la chaleur, provoquent la déformation et la dilatation des roches, libèrent des gaz, alignent les formations de fissures dans les cristaux de roche et peuvent avoir d'autres effets géomagnétiques. Celles-ci peuvent être détectées à l'avance ; serviront ainsi à prédire -à court terme- l'imminence d'un séisme destructeur.

II.2.2.1 Secousses prémonitoires

L'un des indicateurs les plus probables d'un puissant séisme est la survenue préalable d'un certain nombre de tremblements de terre de faible magnitude, en préparation d'un grand évènement. À mesure que les contraintes s'accumulent, des fractures plus faibles risquent de se produire avant la rupture principale. Des études scientifiques ont montrées que des secousses précurseurs ont été détectées pour environ 40% des séismes de magnitude modérées à fortes et environ 70% pour les évènements de magnitude $> 7,0$ (Kayal, J.R. 2008). Ils surviennent quelques minutes à quelques jours, voire plus, avant le choc principal. Prenons comme exemple, le séisme de Sumatra³ en 2002 est considéré comme une secousse précurseur du séisme dévastateur de 2004 dans l'océan Indien⁴ (un intervalle de temps de plus de deux ans entre les deux évènements) (Vallée, M. 2007).

II.2.2.2 Anisotropie

Lorsque la roche est en contrainte, près de son point de rupture, les pressions entraînent de certains changements dans les caractéristiques de la roche (Coburn et Spence, 2002). L'une des

³ Séisme du 02 Nov. 2002 ($M_w = 7.3$) à Sumatra-Indonésie.

⁴ Séisme du 26 Déc. 2004 ($M_w = 9.1$ à 9.3) au large de l'île indonésienne de Sumatra.

caractéristiques est que la pression provoque l'alignement des formations de microfissures dans la roche parallèlement aux forces de contrainte ; la roche devient anisotrope (Stefansson, 2011). Ces structures de fissures provoquent la polarisation des ondes de choc traversant la roche soumise à une contrainte, une particularité détectable par des instruments sismographiques sophistiqués. Dans la croûte terrestre, il est possible d'identifier les zones de roches fortement stressées en surveillant minutieusement le «bruit» de fond de petites ondes de choc provenant de microséismes profonds et en détectant la polarisation dans certaines directions (Crampin et al., 1984; Almqvist et Mainprice, 2017).

II.2.2.3 Hydrogéochimie, émission de gaz et surveillance de la nappe phréatique

Les schémas de microfissures qui se développent dans des roches soumises à de fortes contraintes, en profondeur, semblent également absorber les eaux souterraines (Pulinets et Boyarchuk, 2004; Pérez et al., 2008). Dans certains cas, cela peut entraîner une baisse de niveau de la nappe phréatique adjacente. La surveillance des nappes souterraines, en mesurant la profondeur des puits, a montré qu'un abaissement des nappes s'était produit peu de temps avant l'occurrence des principaux séismes (King et al., 1981; Chadha et al., 2003; Grant et al., 2011; Paudel et al., 2018). Malheureusement, ces nappes varient d'un jour à l'autre pour de nombreuses raisons (ex. consommation abusive de l'homme) et une telle baisse du niveau d'eau dans les nappes n'est pas toujours utilisée comme facteur de prévision sismique. Il est à noter que l'eau qui pénètre dans les formations rocheuses fissurées ; absorbe certains produits chimiques de la roche, éventuellement libérés en raison du stress. Le suivi du contenu chimique de la nappe phréatique et les gaz du sol montre que des anomalies de concentrations en Radon (Rn), Hélium (He), Hydrogène (H₂), Mercure (Hg), dioxyde de Carbone (CO₂) et d'autres substances volatiles ont été enregistrées quelques semaines ou mois avant de nombreux séismes. Plusieurs recherches scientifiques à savoir : King 1986, 1993; Igarashi et al., 1995; Wattananikorn et al., 1998; Miklavčić et al., 2008; Barman et al., 2016 ont été concentrées sur l'étude et la surveillance géochimique de la concentration en radon afin de mieux affiner les prédictions séismiques.

Par définition, le Radon est un gaz radioactif (inodore et incolore) chimiquement inerte et extrêmement soluble dans l'eau qui se désintègre en quelques jours dès qu'il atteint la surface terrestre. Selon la figure II.4 (Petrović et Dragović, 2019), les atomes du radon peuvent s'échapper des grains minéraux dans les espaces poreux (émanation du radon), ainsi ces atomes

peuvent migrer par diffusion et/ou convection/advection (transport du radon), et enfin exhalent dans l'atmosphère (exhalation et émission du radon).

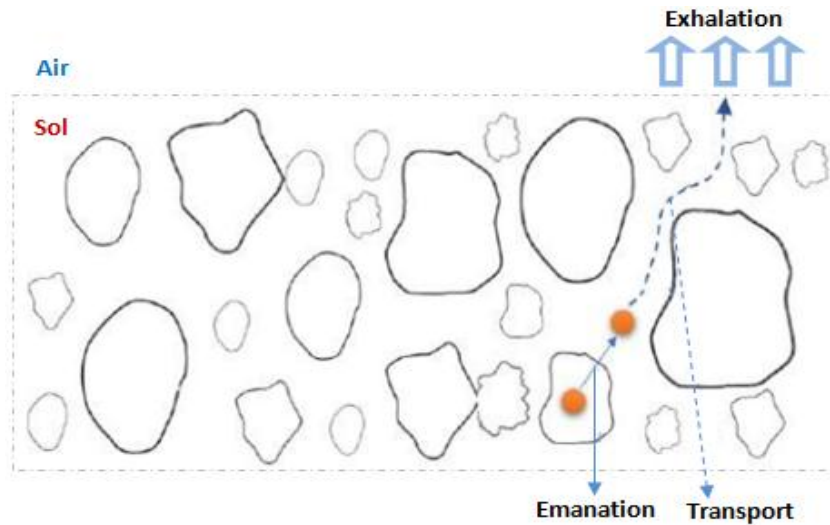


Figure II.4 : *Processus de libération du gaz Radon dans l'air.*

- *Séisme de Tachkent, 1966*

La toute première observation de l'activité géochimique 'émanation du radon' corrélée à un événement séismique, remonte à plus de cinquante ans. Ainsi, à compter du séisme de Tachkent⁵ en 1966; Ulomov et Mavashev (1967) ont mesuré ponctuellement l'activité volumique du Radon-222 de l'eau d'un forage profond entre 1955 et 1967. Quelques mois avant l'évènement séismique, des variations inhabituelles de la teneur en Radon-222 (^{222}Rn) augmentent pour ensuite décroître brutalement juste après le séisme (Fig. II.5).

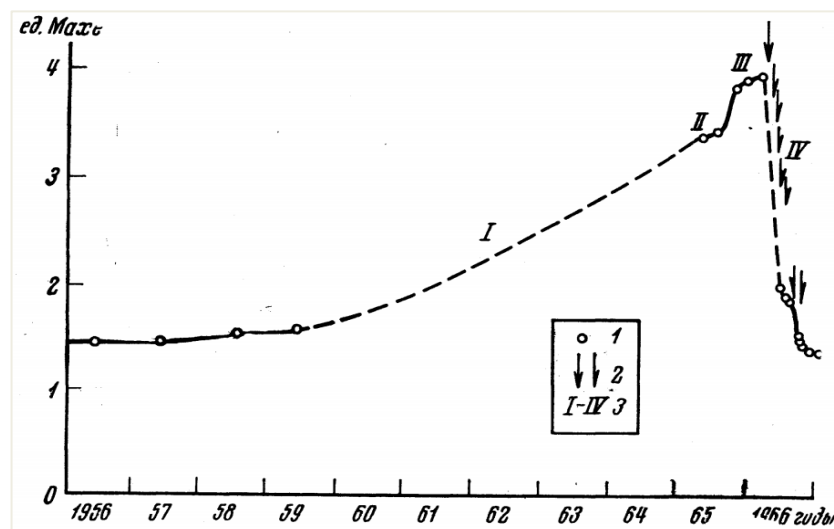


Figure II.5 : *Évolution de la teneur en Radon dans l'eau minérale thermique du bassin hydrographique de Tachkent dans la zone de l'épicentre du séisme le 26 avril 1966 (Ulomov et Mavashev, 1967).*

⁵ Séisme du 26 Avr. 1966 ($M_w = 7.5$) à Tachkent – Ouzbékistan.

- *Séisme de Kobe, 1995*

La concentration de radon dans les eaux souterraines est illustrée dans la figure (II.6), où on observe une augmentation accrue de concentration, plusieurs mois, avant le séisme de Kobe⁶ (Japon, 1995).

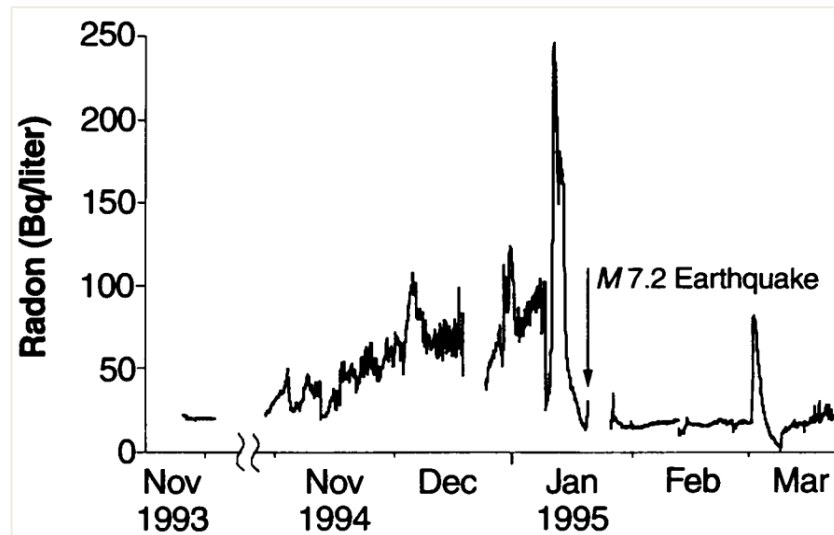


Figure II.6 : Données de concentration de Radon au puits (17m de profondeur) dans la partie sud de la ville de Nishinomiya, préfecture de Hyogo, Japon (Igarashi et al., 1995).

La concentration de radon a commencé à augmenter progressivement à partir du début de l'observation en octobre 1994 (station de contrôle à 30 km au nord-est de l'épicentre : 34.583° N, 135.018° E) et a atteint environ 60 becquerel/litre à la fin du mois de novembre 1994, soit environ trois fois celle de la même période un an auparavant. Le 8 janvier, 9 jours avant le séisme, la concentration de radon a atteint un pic plus de 10 fois supérieur à celui observé au début de l'observation, avant de commencer à diminuer (Igarashi et al., 1995; Tsunogai et Wakita, 1995). Ces changements anormaux en taux d'émanation de radon sont probablement des phénomènes précurseurs du séisme catastrophique.

⁶ Séisme du 17 Jan. 1995 ($M_w = 7.2$) à Kobe-Sud de la préfecture de Hyōgo, Japon.

- *Séisme de l'Aquila, 2009*

Sur la base des mesures de la teneur en radon et de la sismicité locale dans l'Aquila⁷ et ses environs, le chercheur italien Giampaolo Giuliani (Observatoire National du Gran Sasso) a pu prédit, deux semaines à l'avance, le puissant séisme de l'Aquila (2009). Il a détecté deux anomalies - une au début du mois de mars et la seconde du 19 au 23 mars 2009. Il a prédit que le choc majeur se produirait pendant une semaine, soit jusqu'au 30 mars 2009. Le Comité des risques majeurs s'est réuni le 31 mars, il y avait des sismologues et des secouristes au sein de ce comité. Ils ont qualifié G. Giuliani de charlatan, l'ont forcé à retirer sa prédiction du réseau et à lui interdire l'accès aux médias. Plus tard, ils ont déclaré qu'il n'y aurait pas d'événement catastrophique, car les essaims sismiques observés sont fréquents dans cette région.

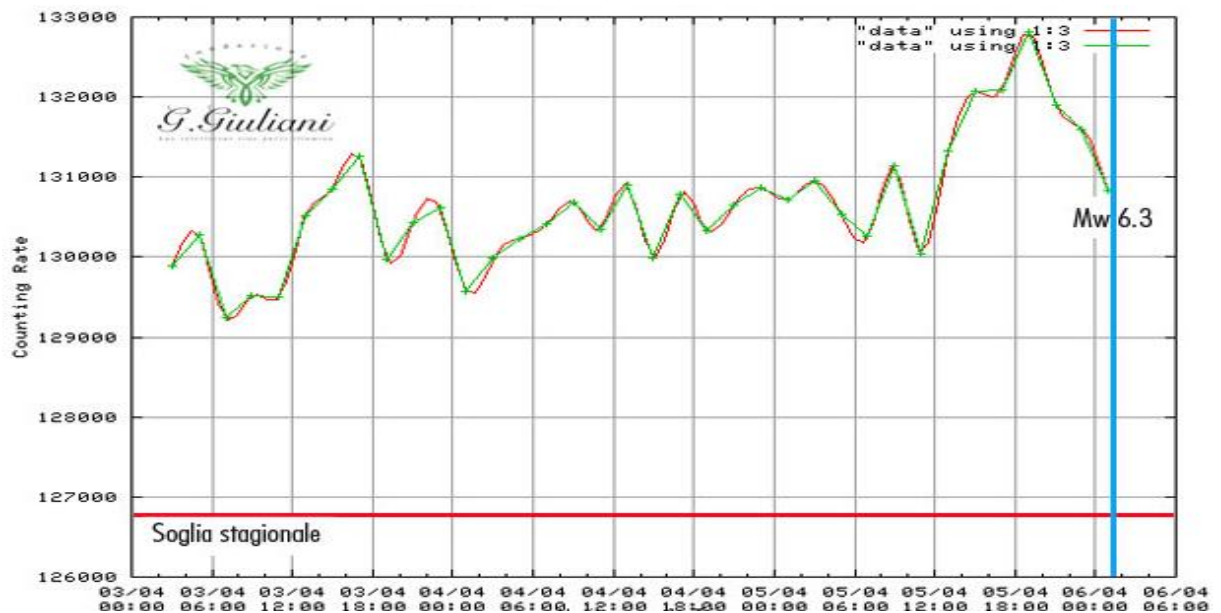


Figure II.7 : Taux de Radon observé par la station de Coppito (AQ) du 3 avril au 6 avril 2009
(source : www.fondazionegiuliani.it/).

Le graphique ci-dessus montre le taux de radon observé par la station de Coppito (AQ) du 3 avril 2009 à 00:00 UTC au 6 avril 2009 à 01:00 UTC. La ligne verticale bleue indique l'évènement sismique de l'Aquila (6 avril 2009 à 01:32:42 UTC) et la ligne rouge horizontale indique la valeur moyenne du taux de radon saisonnier. D'après la figure (II.7), on peut observer que le niveau des émissions en gaz radon a augmenté d'environ 2800 comptages supplémentaires, pour un total d'environ 6050 points au-dessus du seuil d'émission saisonnier moyen.

⁷ Séisme du 06 Avr. 2009 ($M_w = 6.3$) à l'Aquila-Italie.

II.2.2.4 Comportement anormal d'animaux

Les animaux peuvent-ils prédire les séismes ? C'est une question qui intéresse depuis longtemps les scientifiques. Depuis l'Antiquité, des comportements animaux étranges ont été régulièrement mentionnés (Lomnitz, 1994; Kanamori, 2009; Stefansson, 2011). En 373 av. J.-C., des historiens ont rapporté que des animaux, y compris des rats, des serpents et des belettes, avaient déserté en masse la ville grecque d'Hélice, quelques jours à peine avant le séisme qui avait dévasté l'endroit (Lakshmi, 2014).

De telles manifestations animalières étranges nous parviennent encore régulièrement un peu partout dans le monde, comme préalablement aux séismes de :

- Portugal, huit jours avant la secousse tellurique de Lisbonne_1755, des vers de terre avaient émergé en masse à la surface ;
- Italie, avant le séisme de Messine_1783, les chiens hurlaient si follement que nul ne réussit à les faire taire ; Naples_1805, pendant la nuit qui précède le séisme, on vit une multitude de sauterelles ramper à travers la ville en direction de la mer ;
- Japon, avant le séisme de Sanriku_1896, des anguilles envahirent la plage ; Quelques jours avant le séisme d'Edo_1855 un comportement inhabituel du poisson-chat a été signalé. De nombreux poissons sautant dans un étang un jour seulement avant le grand tremblement de terre de Kanto_1923.
- Allemagne, quelques minutes avant le tremblement de terre de Landsberg_1910, les abeilles abandonnèrent leurs ruches pour ne revenir qu'à la fin de l'alerte ;
- Alaska, deux semaines avant le puissant séisme de 1964, les grands ours kodiaks sont sortis d'hibernation et ont quitté précipitamment leurs abris ;
- Ouzbékistan, une heure avant le séisme de Tachkent_1964, les habitants ont observé avec stupéfaction un exode massif de fourmis qui emportaient leurs œufs ;
- Chine, les autorités ont lancé un avertissement, deux heures avant le séisme de Yientsin_1969, fondé sur l'agitation des tigres, des pandas, des yacks et des cerfs du zoo. Quant au violent séisme de Haicheng_1975, deux jours avant la catastrophe, les porcs se sont mis à se battre dans leurs porcheries ; Cinq jours avant le terrible séisme de Sichuan du 12 mai 2008, les rues de Mianzhu, ont été envahies par une arrivée massive de crapauds.

Il existe de nombreux autres cas de comportements qui incitent à penser que les animaux possèdent un instinct spécifique pour sentir aux séismes. A titre d'indication, l'agrégation de rapports sur les comportements étranges d'animaux est devenue un élément standard de la planification de la protection civile chinoise en cas de séisme et aurait contribué au succès de la prévision du séisme de Haicheng-Yingkou en 1975.

De nos jours, seuls quelques auteurs, notamment Sheldrake (1999, 2003) et Ikeya (2004), sont reconnus pour étudier ce sujet suivant une approche scientifique. Pour Ikeya (2004), qui s'appuie sur des expériences in vivo, le vecteur électromagnétique semble le plus plausible pour expliquer ces comportement animalières, qui réagiraient nerveusement au champ électrique créé par le milieu avant un séisme (Jousset et al., 2009). Les émanations de gaz ou, de manière moins justifiée, la propagation plus rapide des ondes sismiques ont également été évoquées pour expliquer ces comportements. Plus récemment, Wikelski et al. (2020) ont étudié de façon instrumentale et en continu l'activité des animaux de ferme (vaches, chiens, moutons) au cours de la séquence de tremblements de terre 2016/2017 (18 252 séismes, gamme de magnitude : $0.4 \leq M \leq 6.6$). Comme résultat, ils ont détecté comment les animaux ont collectivement réagi aux tremblements de terre. Aussi, ils ont constatés une activité prédictive non seulement dans les périodes de forte intensité, mais également dans les périodes de faible activité sismique. Les temps de prévision des tremblements de terre (1 à 20 heures) sont corrélés négativement avec la distance entre la ferme et les hypocentres sismiques. De telles études suggèrent que la surveillance instrumentale en continue de groupes d'animaux a le potentiel de fournir des modèles statistiquement fiables d'activité pré-séismique qui pourraient permettre des prévisions séismiques à court terme.

II.3 Indices des précurseurs séismo-ionosphériques

L'évolution technologique en domaine d'instrumentation (les systèmes de positionnement par satellites GNSS) et d'informatique a permis la compréhension de la composition de l'atmosphère terrestre ainsi que son investigation. Les principales couches atmosphériques sont la Troposphère, la Stratosphère, la Mésosphère et la Thermosphère que renferme la couche ionosphérique située à l'extrême de l'unité atmosphérique. Puisque le but principal de notre recherche est de déterminer les indices des précurseurs séismiques à la faveur des anomalies ionosphériques, nous avons opté à l'échantillonnage de plusieurs stations GPS couvrant l'ensemble du champ de la déformation co-sismique.

Dans l'histoire de la transmission radio, l'ionosphère a joué un rôle important dans la communication d'information par les ondes électromagnétiques qui transitent à des distances continentales. Le constat principal à mettre en évidence est l'existence d'une relation entre les indices de réfraction et le comportement des ondes entre réfractées, réfléchies et diffractées.

En effet, le phénomène de tremblement de terre est à l'origine de la rupture de blocs crustaux appartenant aux plaques tectoniques (plancher lithosphérique) où se manifestent la dissipation d'énergie de proche en proche sous ses différents types (déformation, flux thermique, propagation d'ondes sonores 'P' et de cisaillement 'S' et des oscillations de surface 'R'). Ce phénomène trouve un retentissement de grande envergure au niveau de l'atmosphère et précisément au niveau de la couche F2 ionosphérique situé à 350 km d'altitude (Fig. II.8). Notant que l'altitude de cette couche, vu sa densité en électrons libres est considérable, un phénomène extraordinaire apparaît au sens du déplacement des particules ionisées à une vitesse extrême qui semble être liée à la nature du milieu F2 ; qui sera développé ultérieurement.

Comme l'objectif de notre travail opte aussi à définir les paramètres et les modalités de résolution des délais de propagation des ondes électromagnétiques via le couplage ternaire Lithosphère-Atmosphère-Ionosphère sous l'excitation des précurseurs séismiques affectant une région ou un secteur donné, nous avons développé une approche systématique basée sur l'acquisition des données géodésiques et leurs analyse. Une seconde phase axée sur la cartographie de la couche ionosphérique 'TEC-Mapping'. Cette opération a nécessité la consultation du réseau géodésique GPS permanente à l'échelle méditerranéen et les signaux GPS/GNSS situés au-delà de la basse atmosphère dans le but de maîtriser le parcours et les vitesses de propagation des ondes à travers les différents milieux.

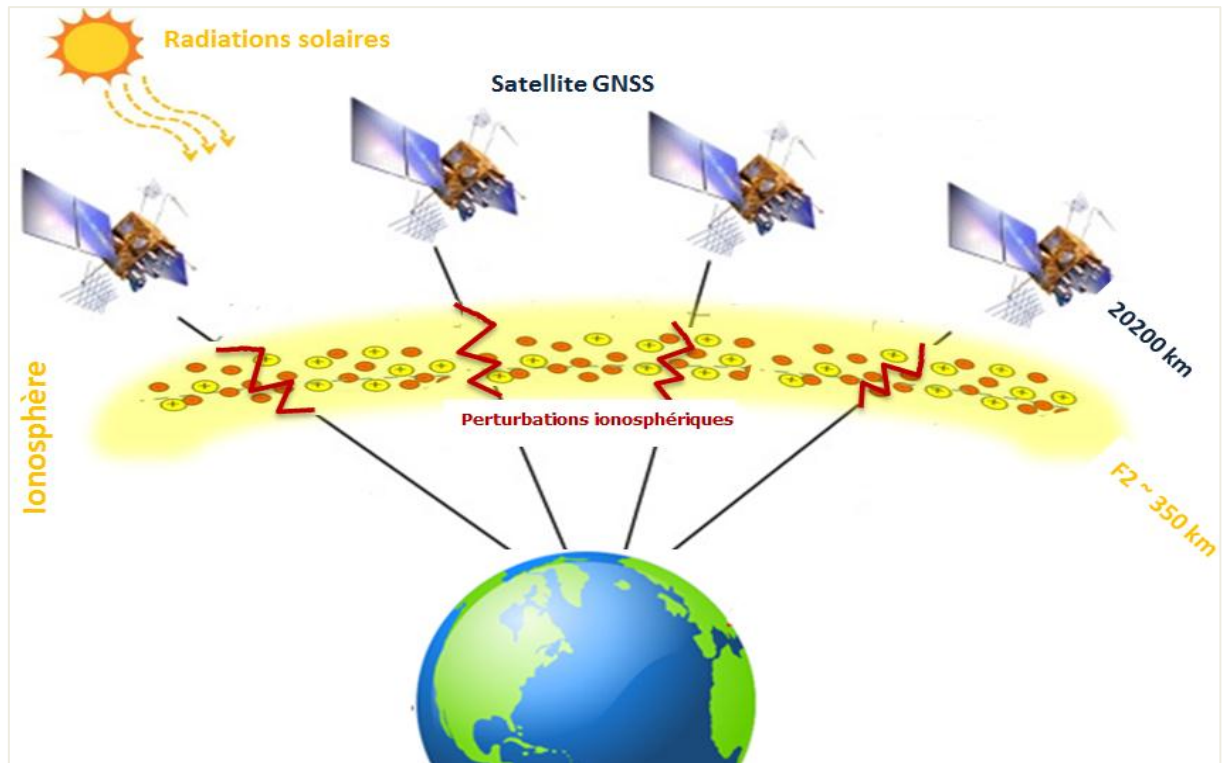


Figure II.8 : Dispositif de mesure GPS.

Les études géodésiques précises que l'analyse du cheminement radioélectrique relatifs aux satellites GPS/GNSS ont révélé l'existence d'importantes perturbations au niveau des couches ionisées de l'atmosphère terrestre qui sont évaluées via l'échelle temporelle à des délais qui varient de quelques heures à quelques jours bien avant le déclenchement de l'évènement séismique notable ; de ce fait on évoque ainsi le terme de signes avant-coureurs désignant la prévision séismo-ionosphérique.

Sur la base de multiples recherches scientifiques, nous distinguons parmi les précurseurs séismo-ionosphériques :

- Observation de perturbations du champ électrostatique vertical près du sol ; dépassant même les 1kv m^{-1} avant des puissants séismes. Il est à noter que la forte ionisation de l'atmosphère proche de la surface du sol est due essentiellement à l'émanation du radon et de la radioactivité sous l'effet d'aérosols métalliques (Vershinin et al., 1999; Pulinets et Boyarchuk, 2004).
- Emissions d'ondes électromagnétiques observées lors de tremblements de terre. Les résultats publiés par (Gokhberg et al., 1982; Warwick et al., 1982; Larkina et al., 1983) introduisent l'idée qu'une mesure des effets électromagnétiques des séismes est possible.

D'autres récentes études (Eftaxias et al., 2000; Hayakawa et al., 2006; Uyeda et al., 2009; etc.) ont permis d'observer des émissions électromagnétiques, et de détecter des éclats anormaux de rayonnement électromagnétique dans l'ionosphère, devant des événements séismiques notables d'une dizaine de minutes à plusieurs heures. Ces anomalies séismo-électromagnétiques ont été observées au sol ou par satellites et couvrant une large gamme de fréquences allant du DC, ULF, VLF jusqu'à VHF.

- Observation d'anomalie thermique le long des failles tectoniques actives, indiquant la libération du gaz radon (très lourd et sans odeur). Ce gaz remonte près de la surface terrestre en produisant une ionisation de l'air, modifié aussi sa conductivité, et qui peut être détectée dans les couches supérieures de l'atmosphère terrestre quelques semaines avant le déclenchement d'un événement séismique (Lomnitz, 1994; Riggio et Santulin, 2015; Tomer, 2016).
- Variations anormales des valeurs de la fréquence critique de plasma ' f_oF2 ' et de l'altitude virtuelle de la couche ionosphérique F2, peu de jours avant le séisme (Chen et al., 1999; Chuo et al., 2001; Pulnits et al., 2002; Ondoh 2004; Benghanem, 2013; Karaboga et al., 2018).
- Variations de la densité électronique ionosphérique (et du contenu électronique total de l'ionosphère, TEC), principalement dues à la génération d'un champ électrique vertical dans la zone épiscoptrale séismique. Ce champ électrique peut traverser l'ionosphère et influencer les caractéristiques dynamiques du milieu en électrons ionisés ainsi que sa densité (Liu et al., 2000, 2009; Tachema et Nadji, 2019; Tachema et Nadji, 2020).

II.4 Mécanisme des modèles de couplages dynamiques

L'étude des processus physiques qui accompagnent les différentes phases d'un tremblement de terre est devenue actuellement indispensable pour développer les approches de la prévision sismique. En effet, la complexité de la composition interne de la Terre ainsi que la structure spatiale dynamique de son ionosphère, est influencée par de nombreux facteurs (tels que le champ géomagnétique et les éruptions solaires) qui pénalisent toute démarche d'investigation liée au mécanisme physique des systèmes : Lithosphère-Atmosphère-Ionosphère / Terre solide-Atmosphère.

II.4.1 Couplage Lithosphère-Atmosphère-Ionosphère (CLAI)

Dans cette thèse, nous nous sommes référés à un couplage physique entre les différentes géosphères (milieu lithosphérique, milieu atmosphérique, milieu ionosphérique) jouissant d'une relation directe quant à la sismicité où plusieurs types de processus lithosphérique peuvent influencer la couche ionosphérique (ex. diffusion gaz-eau, éruptions volcaniques, etc.). En effet, cette question de couplage Lithosphère-Atmosphère-Ionosphère représente la clé d'identification et d'analyse de l'aptitude de transit et de propagation des ondes électromagnétiques (canaux de transport d'énergie) entre les différents milieux (Fig. II.9). Notant qu'il existe plusieurs phénomènes au niveau de ces géosphères dues généralement aux comportements des ondes électromagnétiques sous l'effet des variations du champ électrique et du champ magnétique lors d'une phase pré-séismique.

Dans ce contexte, nous présentons les principales recherches effectuées en ce domaine permettant la mise en évidence d'une relation qui relie les précurseurs séismiques avec leurs composantes électrique au sein du signal du TEC ionosphérique ; observé lors des séismes de magnitudes notables :

- Des états anormaux pré-séismiques dans l'atmosphère et l'ionosphère, dans les courants telluriques proches de la Terre et des variations électromagnétiques à ultra-basse fréquence (ULF) ont été signalés (Kamogawa, 2006).
- Il a été reconnu que la pénétration directe à partir du sol de champs électromagnétiques (Molchanov et al., 1995) et de champs électriques quasi stables (Pierce, 1976), observables dans des régions sismiquement actives, ne pourrait pas être très efficace. Par contre, bien que des pénétrations d'ondes acoustiques provenant d'impulsions sismiques aient été

enregistrées (Blanc et Jacobson, 1989), leur durée s'est avérée trop courte pour exciter les événements observés. En effet, pour expliquer toutes ces observations, il serait nécessaire de chercher les relations indirectes liées au couplage lithosphère-ionosphère au lieu de se baser uniquement sur la propagation d'ondes électromagnétiques ou acoustiques. Actuellement, il existe un consensus scientifique sur le fait que seules les ondes de gravité atmosphérique (*Atmospheric Gravity Waves*, AGW) peuvent être responsables du couplage indirect. Cette possibilité a été analysée dans de nombreux ouvrages (Nekrasov et al., 1995; Gokhberg et al., 1995; Liperovsky et al., 2000). Mareev et al. (2002) et Molchanov (2004) qui ont abordé d'importants détails sur le processus, y compris le temps de transport de l'énergie AGW, la focalisation et la transformation en turbulence de champ de densité de plasma ionosphérique.

- Comme il existe d'autres explications, concernant Gufeld et al. (1992) qui ont explicitement souligné l'existence d'anomalies pré-séismiques dans la basse ionosphère, en utilisant la transmission d'ondes électromagnétiques à très basse fréquence (VLF : 10–20 KHz), émises par un émetteur radiophare, se propageant à travers l'onde formée par la couche conductrice de la surface terrestre et de la couche ionosphérique D. L'intensité et la phase reçues des ondes VLF sont associées à la variation du guide d'onde Terre-ionosphère entre l'émetteur et le récepteur. Ces auteurs ont observé, en Russie, des anomalies d'intensité et de phase des ondes reçues bien avant les puissants séismes telluriques ; lorsque l'épicentre était situé entre l'émetteur et le récepteur. Ces études ont été développées également, au Japon et en Italie en étendant la fréquence utilisée des bandes extrêmement basses fréquences (ELF : quelques hertz à 3 KHz) aux bandes basses fréquences (LF : 30–300 KHz).
- Les anomalies de l'ionosphère ont été précisées également par les asiatiques Liu et al. (2000) en mettant en relation l'avènement des grands séismes avec les anomalies ionosphériques. Ceci est conforme à l'indexation d'anomalies ionosphériques mesurée à la faveur de la fréquence critique f_oF2 (ionosondes, cf. chap. I, § I.4.1.1). Les résultats envisagés par ces auteurs ont montré que cette fréquence avait considérablement diminué localement quelques jours avant les événements séismiques étudiés.
- Plus récemment, Shvets et al. (2004) ont également analysé les anomalies de transmission VLF entre Tsushima et Choshi. Ces auteurs ont comparé les anomalies avec 10 séismes ($M \geq 5$) dans la zone située à moins de 350 km autour du récepteur et dans une zone

elliptique entourant l'émetteur et le récepteur. Ils ont montré que les séismes étaient fortement corrélés aux anomalies VLF survenues quelques jours auparavant.

- Au Japon, Fujiwara et al. (2004) ont statistiquement démontré l'existence d'anomalies atmosphériques avec des durées qui s'étalent entre quelques minutes à plusieurs heures avant les tremblements de terre étudiés. Ils ont surveillé les ondes VHF (radio FM : environ 80 MHz) à l'Est de Tokyo transmises par une station radio située au nord de Honshu, et ont comparé minutieusement les ondes avec la sismicité dans les régions environnantes. Ils ont constaté que les anomalies de transmission étaient considérablement améliorées dans les cinq jours précédant les tremblements de terre de $M \geq 4,8$.

Le concept général du mécanisme CLAI, est brièvement résumé par Molchanov et al. 2004 comme suit :

- a) La migration ascendante des matériaux de substrat gazeux/liquide (bulle) peut entraîner l'évacuation de gaz/eau à proximité de la surface du sol proche de la source sismique en zone de force affaiblie.
- b) Des perturbations atmosphériques de la température et de la densité peuvent suivre le dégagement pré-séismique d'eau/gaz, ce qui entraîne la génération d'ondes de gravité internes sur une période de six minutes à une heure.
- c) Les ondes de gravité atmosphériques (AGW) induites par les séismes peuvent conduire à une modification de la turbulence ionosphérique, à une modification de la propagation des ondes radioélectriques au-dessus de l'horizon dans l'atmosphère ainsi à la réflexion de l'onde de basse fréquence LF de la basse ionosphère.

II.4.2 Couplage Terre solide-Atmosphère

La planète terre est considérée comme un système complexe, unique en son genre, formée de sous-systèmes qui n'agissent pas de manière indépendante, mais interagissent de manière continue. La plupart des interactions sont non linéaires, exprimant les interactions et les couplages entre les composantes mécaniques : la Terre solide et son enveloppe atmosphérique (De Santis, 2009; Brissaud, 2017). Notant que chaque composante de ce couple interagisse avec les autres de manière complexe et à différents niveaux spatio-temporels. Ainsi, les sources sismiques (failles) générées dans la partie solide (couche lithosphérique) engendrent des ondes électromagnétiques qui se propagent dans l'atmosphère à des vitesses distinctes ; ce qui permet

de mieux quantifier les phénomènes physiques ; générateurs d'information prédictive par la voie des précurseurs séismiques.

La bibliographie consultée a révélé que le concept d'interaction Terre solide et son atmosphère est proposé depuis les années soixante ; pendant les événements de la guerre froide, où les sismomètres et les capteurs atmosphériques étaient l'unique moyen de contrôle discret des tests nucléaires (localisation et calcul de l'intensité des sources explosives). Cette synergie entre les capteurs sismiques et atmosphériques n'a pas tardé à mettre en évidence la propagation dans l'atmosphère d'une onde gravito-acoustique générée par le déplacement vertical aux alentours de la source sismique (Occhipinti, 2006). A titre de référence (Bolt, 1964; Donn et Posmentier, 1964) ont pu expliquer les perturbations atmosphériques générées par le fort séisme d'Alaska (27 mars 1964, $M_w = 9.2$).

Ces études ont permis la découverte de l'apparition des phénomènes ondulatoires, pré-séismiques, enregistrés au niveau de l'atmosphère neutre ; plus particulièrement, les infrasons atmosphériques générés par les ondes sismiques de surface (Mutschlecner et Whitaker, 2005; Garcia et al., 2013; Lognonné et al., 2016; Martire et al., 2018).

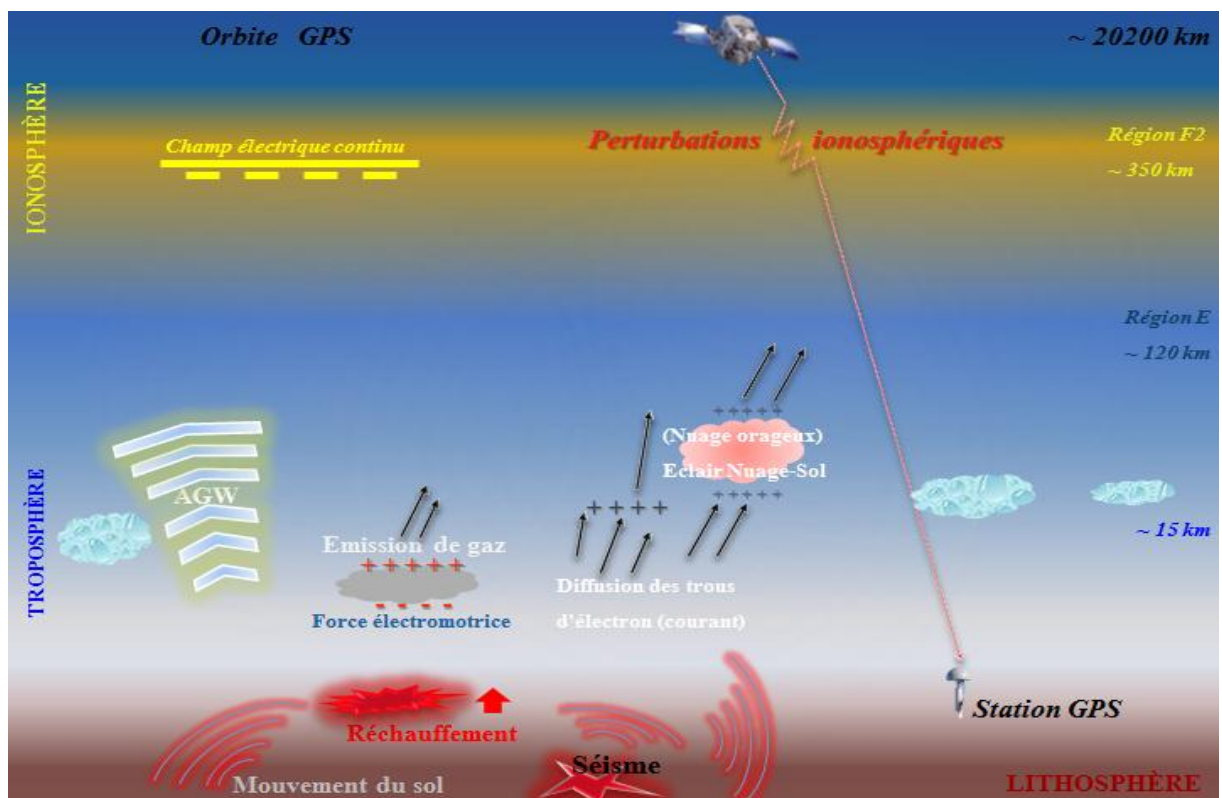


Figure II.9 : Présentation schématique du concept du mécanisme pré-séismique : Couplage Lithosphère-Atmosphère-Ionosphère et Couplage Terre solide-Atmosphère (Adaptée de Chmyrev et al., 2013; Ray 2018).

Conclusion

Les mesures entreprises dans le cadre d'une recherche prévisionnelle de l'activité séismique à partir de la surveillance du TEC ionosphérique restent sujet de recherche opérationnelle chez les scientifiques à travers le monde. Le sujet est important en domaine de l'étude du risque sismique dont l'objet est de réduire et de préserver davantage le nombre de victimes dues à ce phénomène tellurique nocif. En réalité, la question s'étale sur plusieurs contextes naturels en liaison avec différentes disciplines et sciences expérimentales (sismologie ionosphérique, géodynamique, géodésique et géophysique).

En domaine géodésique, la prévision des précurseurs séismiques semble être associée aux anomalies du contenu électronique total 'TEC' de la couche ionosphérique. Notant que les ondes séismiques générées lors d'un évènement notable ($M \geq 5$) au niveau de la lithosphère sont de nature électromagnétique qui se propagent aussi bien dans la croûte terrestre (solide) que dans l'atmosphère avec des vitesses qui varient de façon évidente (cas de l'ionosphère). En effet, l'avènement séismique débute par une nucléation d'une source sismique (faille) qui donne en conséquence un processus de déformation qui s'implique par des changements du potentiel physique (courant électrique, émanation de gaz rare 'radon' et la variation du champ magnétique ambiant). A un niveau supérieur de l'atmosphère (ionosphère), les changements physiques occasionnés sont déjà transmis à la couche F2 ionosphérique qui est fortement ionisée (plasma) pour enregistrer des anomalies relatives dues aux précurseurs séismiques. En effet, les perturbations produites au niveau de la couche ionosphérique sont qualifiées comme des données prévisionnelles au fait séismologique (Terre), reformulées en terme de signes de prévision séimo-ionosphérique.

Notant que la technique du dépouillement des précurseurs séismiques obtenus du signal géodésique sera détaillée dans le chapitre III.

Chapitre III

Prévision de l'activité séismique par l'analyse et interprétation des données 'TEC'

**Prévision de l'activité sismique par l'analyse
et interprétation des données 'TEC'****Partie I : Modélisation Ionosphérique**

Introduction	66
III.1 Détermination du délai ionosphérique.....	67
III.2 Approche méthodologique de la configuration cartographique du TEC	71
III.2.1 Prétraitement des données GPS.....	71
III.2.2 Organigramme de calcul du paramètre TEC	73
III.2.3 Extraction du TEC sous l'environnement MATLAB®	74
III.2.3.1 Types de données et programmes utilisés.....	75
III.2.3.2 Interpolation de l'information ionosphérique	75
III.2.3.3 Cartes thématiques de l'ionosphère à l'échelle locale	77

Partie II : Détection des précurseurs séismo-ionosphériques par GPS*Étude des évènements séismiques de l'Italie (octobre 2016, $M_w \geq 6.1$)*

Introduction	79
III.3 Problème de données liées à la couverture géodésique locale.....	80
III.4 Présentation de la région d'étude et du TEC-Mapping	82
III.4.1 Situation géographique des évènements séismiques étudiés	82
III.4.2 Procédé envisagé à la cartographie ionosphérique (TEC-Mapping)	83
III.5 Résultats d'analyse spectrale de la membrane ionosphérique	88
III.6 Interprétation des résultats obtenus	91
III.6.1 Mécanismes physiques de pointe des précurseurs séismo-ionosphériques	91
III.6.2 Variations des paramètres de l'atmosphère terrestre	92
III.6.3 Réponse du TEC aux activités solaire et géomagnétique	94
Conclusion	96

Partie I : Modélisation Ionosphérique

Introduction

La modélisation ionosphérique nécessite le passage par un processus d'engineering complexe qui débute par la procédure de collecte de données relatives à la mesure du contenu électronique total ionosphérique (TEC, *Total Electron Content*), par la voie d'échantillonnage des stations GPS/GNSS permanentes et le traitement systématique de leurs données spatio-temporelles. Une seconde étape est consacrée à l'analyse quantitative des données pour valider enfin les résultats. La mesure du contenu en électrons libres 'TEC' concerne la membrane ionosphérique ; ce paramètre physique est dérivé des données GPS bi-fréquences aux formats RINEX¹ (*Receiver Independent EXchange Format*, cf. Annexe D). Rappelant que les données ionosphériques acquises depuis les stations de références GPS, du service international IGS (cf. Annexe F), sont directement transmises aux centres d'analyse de données afin de pouvoir les traiter et émis aux utilisateurs GPS.

A ce jour, une série de modèles ionosphériques bidimensionnels sont disponibles et ont été employés pour différentes applications selon leurs exigences d'exactitude. Ces modèles ont pu en général être classés par catégorie en deux types : les modèles grid-based (ex. : résolution de 5°×5° entre 55° S et 55° N) et les modèles non-grid-based (incluent le modèle d'ajustement des moindres carrés, l'analyse en harmonique sphérique) (Opperman, 2007).

Une caractéristique commune entre ces modèles est basée essentiellement sur l'hypothèse suivante : « Tous les électrons se trouvant dans l'ionosphère sont concentrés dans une seule couche simple et infinitésimale (*SLM, Single Layer Model*) et le retard ionosphérique se produit au niveau de la région F2 à une altitude entre 250 et 450 kilomètres au-dessus de la surface terrestre ».

¹ Plus d'informations sur : <http://lareg.ensg.ign.fr/RGP/donnees/rinex.txt>

III.1 Détermination du délai ionosphérique

L'analyse du timing-délai repose nécessairement sur la connaissance du modèle physique de propagation des ondes électromagnétiques au sein de la structure des couches ionosphériques et en adoptant le modèle d'une couche sphérique mince dite 'SLM' (*Single Layer Model*), Fig. (III.1). La réfraction ionosphérique est donnée par l'équation suivante (Leick et al., 2015) :

$$\Delta_i^{iono} = \pm \frac{40.3}{f_i^2} TEC ; \quad i = 1; 2 \quad (3 - 1)$$

Cette équation montre que la réfraction ionosphérique des observations GPS est obtenue par le nombre des électrons libres, contenu dans l'ionosphère terrestre, sur le chemin du signal radioélectrique entre le satellite GPS et le récepteur au sol (station).

L'intersection entre la ligne de visée du satellite et cette couche est appelée le point ionosphérique (*IP* ou *IPPs*, *Ionospheric Pierce Point*). La projection du point ionosphérique sur la surface de la Terre s'appelle le point sub-ionosphérique (*SIP*, *Subionospheric point*).

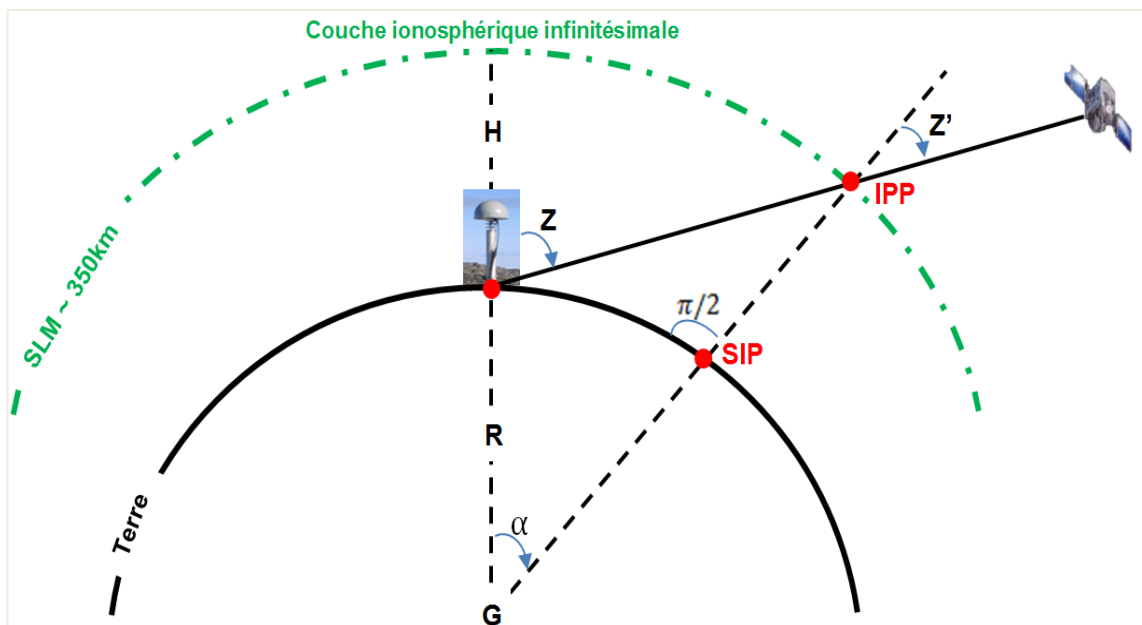


Figure III.1 : Approximation sphérique du modèle ionosphérique monocouche avec définition des points ionosphériques (*IP*) et sub-ionosphériques (*SIP*) (Seeber, 2003; Tachema, 2012, modifiée).

Signalant que le système GPS fournit fondamentalement des mesures de TEC oblique (*STEC*, *Slant Total Electron Content*) ; car le satellite GPS ne se trouve pas à la verticale du lieu d'observation. A cet effet, le TEC mesuré le long de cette ligne de visée est ramené à la verticale.

On effectue ainsi une transformation trigonométrique au VTEC (contenu électronique total vertical), par ailleurs les directions non zénithales donnent :

$$\Delta_i^{iono} = \pm (\cos z')^{-1} \frac{40.3}{f^2} VTEC \quad (3-2)$$

Où :

- z' : distance zénithale de l'intersection du point ionosphérique IPP du signal venant du satellite avec la couche ionosphérique (à la verticale locale) ;
- $VTEC$: contenu vertical total en électrons, c'est la densité en surface des électrons libres sur la couche ionosphérique au point IPP ;
- $F = (\cos z')^{-1} = TEC/VTEC$: fonction de projection ou facteur d'obliquité, avec $VTEC=TEC$ (à $z=0$) ;
- \pm signifie l'influence ionosphérique de code ($+\Delta^{iono}$) et de phase ($-\Delta^{iono}$).

On a selon la figure III.1 (Todorova et al., 2005) :

$$\sin z' = \frac{R}{R+H} \sin z \quad (3-3)$$

Où :

- $R \approx 6378$ Km : rayon moyen de la Terre ;
- H : hauteur moyenne de l'ionosphère au-dessus de la Terre ;
- z' et z : angles zénithaux au point ionosphérique IP et au site de l'observation, respectivement.

L'angle zénithal z peut être calculé à condition de connaître les coordonnées du site d'observation et la position du satellite observé. On utilisant les lois du triangle sphérique formé par le pôle Nord N, le récepteur R et le point IP (Fig. III.2) :

$$\cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi_{IP}\right) = \cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi_R\right) \cos \Delta z + \sin\left(\frac{\pi}{2} - \varphi_R\right) \sin \Delta z \cos Az \quad (3-4)$$

$$\frac{\sin Az}{\sin\left(\frac{\pi}{2} - \varphi_{IP}\right)} = \frac{\sin(\lambda_{IP} - \lambda_R)}{\sin \Delta z} \quad (3-5)$$

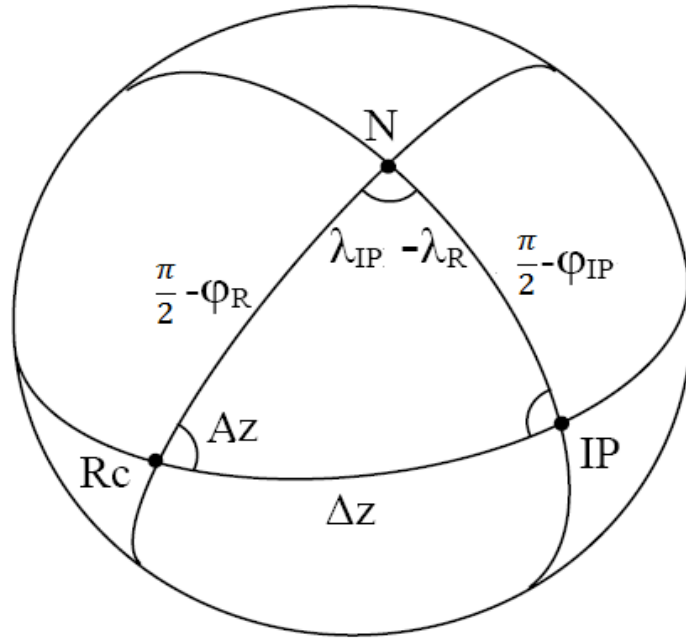


Figure III.2 : Triangle sphérique formé par le Pôle Nord N , le récepteur R_c et le point IP (Tachema, 2012)

D'où les coordonnées géographiques du point ionosphérique IP s'écrivent comme suit :

$$\varphi_{IP} = \sin^{-1}(\sin \varphi_R \cos \Delta Z + \cos \varphi_R \sin \Delta Z \cos Az) \quad (3 - 6)$$

Et :

$$\lambda_{IP} = \lambda_R + \sin^{-1} \left(\frac{\sin Az \sin \Delta Z}{\cos \varphi_{IP}} \right) \quad (3 - 7)$$

Le TEC vertical est modélisé par un polynôme en latitude, Φ , et en angle horaire du Soleil, S , du point subionosphérique (Sammuneh, 2003) :

$$VTEC(S, \Phi) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m E_{ij} (S - S_0)^i (\Phi - \Phi_0)^j \quad (3 - 8)$$

L'angle horaire du Soleil S est l'angle entre le Soleil et le méridien de lieu (positif vers l'ouest).

$$S = LT - 12^h = LT - \pi \quad (3 - 9)$$

$$LT \approx UT + \lambda \quad (3 - 10)$$

Où :

- UT , LT et λ : temps universel, l'heure locale du Soleil et la longitude géographique, respectivement ;
- n , m sont : degrés maximum du développement bidimensionnel en série de Taylor en latitude $\Phi = \varphi_{IP}$ et en angle horaire du Soleil S ;
- Φ_0 , S_0 : origine du développement.

Les variations du TEC présentent un terme diurne prononcé, puisque S dans le modèle local du TEC est lié au temps solaire local LT .

Les E_{ij} du $VTEC(S, \Phi)$ sont des paramètres inconnus qui sont estimés pour chaque satellite et pour chaque récepteur par l'application de la méthode des moindres carrés, sur toutes les observations de tous les satellites à partir d'une ou plusieurs stations.

Le choix des degrés optimaux (n, m) du développement de la série de Taylor de l'équation (3-8), dépend du comportement de l'ionosphère dans le temps et dans l'espace.

III.2 Approche méthodologique de la configuration cartographique du TEC

Le système GPS est un outil unique et sans précédent de mesures ionosphériques, fournissant une couverture globale instantanée, un fonctionnement continu, une haute résolution temporelle et une acquisition de données en temps réel.

La cartographie ionosphérique constitue une tâche importante dans le domaine de la géodésie spatiale et représente la plateforme d'établissement de cartes thématiques représentatives de la densité en électrons libres de la couche ionosphérique. L'aspect cartographique des zones anormales du TEC ont un rapport direct avec l'échelle d'observation et l'échelle des magnitudes jadis exprimées en intensité macrosismique.

Notant que la modélisation bidimensionnelle (2D) et tridimensionnelle (tomographie) des perturbations ionosphérique sont basée notamment sur la méthode du développement en harmoniques sphériques (Spherical Harmonics Functions, SHF's) et les Fonctions Empiriques Orthogonale (Empirical Orthogonal Functions, EOF's) qui donnent en conséquence une cartographie thématique performante de l'état d'activité séismo-ionosphérique régionale.

III.2.1 Prétraitement des données GPS

Une phase de traitement de données géodésiques utilisant les données d'observations O-files (pseudo-distance) et de navigations N-files (éphémérides : coordonnées et orbites des satellites) d'extension RINEX (Tachema, 2012), doit précéder l'opération de la cartographie du TEC ionosphérique.

Pour notre étude, nous avons exploité le réseau géodésique du service IGS et qui comporte plus de deux-cent stations bi-fréquences GPS/GNSS permanentes, réparties sur les deux rives de la Méditerranée. Ces fichiers d'observations et de navigation, archivés sous le format d'échange RINEX, sont téléchargés à partir de plusieurs sites web officiels et serveurs FTP, à savoir le service IGS, UNAVCO, CORS, etc. (cf. Annexe A).

La méthode de prétraitement consiste en plusieurs étapes :

- Lissage des mesures du code par les observations précises de la phase. Avant d'entamer ce traitement, il est nécessaire de nettoyer les observations des mesures de la phase ; toute en se basant sur les combinaisons linéaires : Melbourne-Wübbena L6 (détection des erreurs et des sauts de cycles), Geometry-Free L4 (détermination de la taille des éventuels sauts de cycle et de concaténer les bonnes observations avant et après le saut

de cycle) et la combinaison Ionosphere-Free de la phase et du code L3-P3 correspondant au filtrage des mauvaises observations par l'utilisation de la différence entre les combinaisons linéaires.

- Calcul des biais d'horloge.
- Calcul du biais différentiel de code $DCB_{\text{satellite/récepteur}}$ (décalage d'émission ou de réception entre les fréquences des signaux GPS qui est inévitable par construction, traité en tant que valeur constante et exprimé en nanosecondes).
- Calcul des coefficients des harmoniques sphériques (estimation des paramètres et ajustement par la méthode des moindres carrés).

III.2.2 Organigramme de calcul du paramètre TEC

La procédure envisagée utilise une démarche algorithmique (Fig. III.3), sous Matlab, relative au calcul de la concentration d'électrons libres et au contenu électronique total 'TEC' de l'ionosphère. Cette démarche est basée sur deux échelles distinctes : locale (la longueur de la ligne de base entre deux stations ne dépasse pas les 500 km) et globale, servant de base à illustrer l'évolution journalière du TEC.

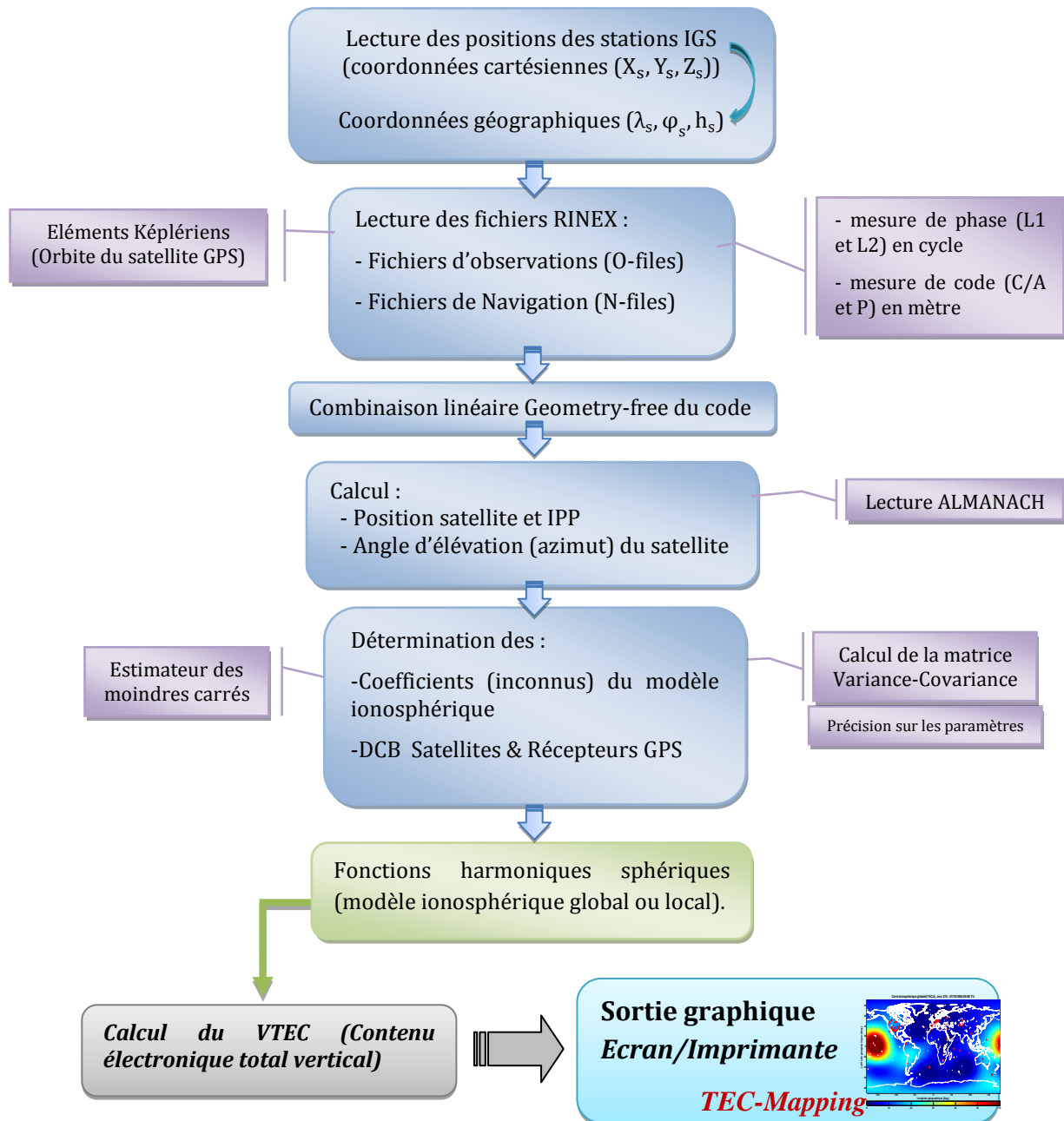


Figure III.3 : Organigramme d'estimation du TEC et d'identification des précurseurs séismo-ionosphériques (Tachema, 2012).

III.2.3 Extraction du TEC sous l'environnement MATLAB®

A l'aide des programmes et sous-programmes développés et exécutés sous Matlab, nous avons développé une nouvelle méthodologie d'établissement des cartes thématiques interprétatives des variations du taux ionosphérique, connue sous le nom du TEC-Mapping. Ces cartes TEC peuvent être utilisées pour corriger le délai induit par la traversée du signal GPS radioélectrique de la couche ionosphérique, étudier l'évolution diurne de l'ionosphère ainsi que différentes perturbations ionosphériques comme les perturbations dues à la météorologie de l'espace, effets des orages géomagnétiques ou encore induites par des séismes. Selon l'algorithme ci-dessus (Fig. III.3), le calcul du TEC vertical passe donc par les étapes suivantes :

Lecture des données de fichiers d'observations et de navigations (fichiers aux formats RINEX), lecture Almanach², calcul des coordonnées du point ionosphérique (IP) et du satellite GPS et enfin estimation des paramètres par les estimateurs statistiques des moindres carrés ou le filtre de Kalman (prédiction).

Après plusieurs tests, les paramètres suivants sont retenus :

- L'angle de masquage (appelé aussi angle de coupure) des satellites GPS est de 10° ;
- La fonction de projection ($1/\cos$) : STEC en VTEC ;
- Le type de modèle ionosphérique appliqué (global et local) ;
- L'altitude de la couche mince (testée pour 100, 350, 450, 1000 km) ;
- Les coordonnées du pôle magnétique (latitude= 79° , longitude= -71°) ;
- Le référentiel géomagnétique a été utilisé ;
- La combinaison linéaire Geometry-Free a été utilisée ;
- L'ordre m et le degré n des harmoniques sphériques ($m=5$ et $n=5$) ;
- Pour une période d'observation de 24 H et un pas d'échantillonnage de 2 H (fréquence d'échantillonnage de 30 secondes), le nombre d'inconnues à déterminer est de 36×12 , (36 est le nombre de coefficients a_{nm} et b_{nm}) ;
- Les DCBs satellites et récepteurs sont estimés aussi comme des coefficients du modèle ;
- Résolution temporelle : intervalle d'échantillonnage (7200 secondes=2 Heures) ;
- Résolution spatiale ($\Delta\lambda = 5^\circ$ et $\Delta\varphi = 2.5^\circ$).

²Données de l'orbite et de la position prédite des satellites GPS.

III.2.3.1 Types de données et programmes utilisés

Afin d'aboutir à une meilleure approche analytique du TEC ionosphérique permettant la détection d'éventuelles variations et d'anomalies ionosphériques associées aux tremblements de terre d'intensité notable ($M \geq 5$), nous avons utilisés les données suivantes : celles des observations GPS dérivées par la mesure de phase, mesure de code et/ou mesure de code lissées par la phase, archivées sous le format d'échange RINEX.

Ces stations IGS ont été choisies de telle sorte qu'elles couvrent la totalité de la surface terrestre (modèle global) ainsi que celle liée à la couverture territoriale ; à une échelle régionale de l'Algérie et d'obtenir une bonne représentation de la couche ionosphérique, cf. Annexe A.

Matlab est considéré parmi les langages de programmation les plus performant, car il interagit selon un système interactif de calcul numérique permettant le traitement de signal et sa visualisation graphique. Par conséquent, l'intégralité du traitement de données géodésiques ainsi que l'exécution de la démarche algorithmique du 'TEC-Mapping' se déroulent sous cet environnement.

III.2.3.2 Interpolation de l'information ionosphérique

Il existe trois méthodes pour calculer l'information ionosphérique TEC en fonction de la latitude géocentrique Φ , la longitude λ et le temps universel UT .

Soit $TEC_i = TEC(T_i)$, $i=1,2,3,\dots,n$ tel que le TEC est l'information ionosphérique.

- Le TEC est compté par la relation suivante : $TEC_i = TEC(T_i)$ à l'époque T_i :

$$TEC(\Phi, \lambda, UT) = TEC_i(\Phi, \lambda) \quad (3 - 11)$$

Où : $|UT - T_i| = \min$

- L'extraction de l'information ionosphérique par la méthode d'interpolation entre deux TEC consécutifs $TEC_i = TEC(T_i)$ et $TEC_{i+1} = TEC(T_{i+1})$ se fait comme suit :

$$TEC(\Phi, \lambda, UT) = \frac{T_{i+1} - UT}{T_{i+1} - T_i} TEC_i(\Phi, \lambda) + \frac{UT - T_i}{T_{i+1} - T_i} TEC_{i+1}(\Phi, \lambda) \quad (3 - 12)$$

Où : $T_i \leq UT \leq T_{i+1}$

- L'extraction de l'information ionosphérique peut être effectuée par la relation suivante (Schaer, 1999) :

$$TEC(\Phi, \lambda, UT) = \frac{T_{i+1} - UT}{T_{i+1} - T_i} TEC_i(\Phi, \lambda'_i) + \frac{UT - T_i}{T_{i+1} - T_i} TEC_{i+1}(\Phi, \lambda'_{i+1}) \quad (3 - 13)$$

Où : $T_i \leq UT \leq T_{i+1}$ et $\lambda'_i = \lambda + (UT - T_i)$

L'information ionosphérique TEC subi une rotation $UT - T_i$ autour de l'axe Z. Cette méthode permet de compenser la grande corrélation qui existe entre l'ionosphère et la position du Soleil.

Après la comparaison et l'analyse de ces trois dernières approches ; la troisième méthode est celle qui est recommandée dans la génération de la grille (Schaer, 1999). La grille d'interpolation est dense et l'extraction du TEC se fait de la manière suivante :

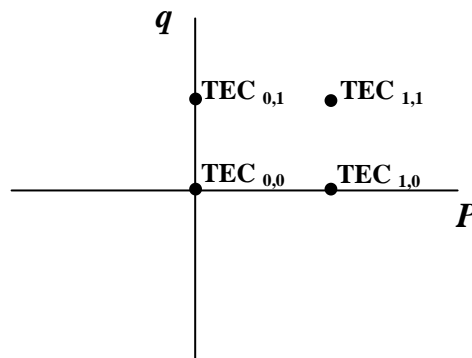


Figure III.4 : Grille d'interpolation utilisant les plus proches valeurs du TEC, $TEC_{i,j}$

$$TEC(\lambda_0 + p\Delta\lambda, \Phi_0 + q\Delta\Phi) = (1-p)(1-q)TEC_{0,0} + p(1-q)TEC_{1,0} + (1-p)qTEC_{0,1} + pqTEC_{1,1} \quad (3 - 14)$$

Dont, $0 \leq p < 1$ et $0 \leq q < 1$. $\Delta\lambda$ et $\Delta\Phi$ représentent respectivement le pas suivant la longitude et la latitude.

III.2.3.3 Cartes thématiques de l'ionosphère à l'échelle locale

En se basant sur les fichiers d'observations (Rinex O-files) et de navigation (Rinex N-files) d'un réseau constitué d'une soixantaine de stations IGS (Annexe A: Tableau A.1), et par le biais des programmes et sous programmes développés et exécutés sous Matlab, la représentation de la variation locale du TEC ionosphérique (au-dessus de l'Algérie) en fonction du temps est illustrée dans la figure (III.5). Il est à noter que, l'absence des stations permanentes IGS sur le territoire national algérien marquera certainement la qualité de résolution et la représentation du TEC ionosphérique.

Sur la base des séries de cartes temporelles (pas de 2 heures), nous pouvons constater que la concentration maximale des ions et des électrons libres que contient la région ionosphérique F2, à 350 km, ce coïncide parfaitement à la période de l'après-midi, c'est-à-dire entre midi et 14H. Cette période correspond au moment où le rayonnement solaire est suffisamment intense, fort ensoleillement, modifiant sérieusement les conditions d'équilibre de l'atmosphère terrestre. Quant au coucher du soleil, coupure nocturne du rayonnement solaire (Tachema, 2012), les électrons libres sont rapidement recapturés produisant ainsi une décroissance rapide de la procédure d'ionisation.

A titre indicatif, prenant le jeu de cartes ci-dessous qui présente les variations locales du contenu électronique total de l'ionosphère, réparties sur le territoire algérien (exprimées en TECU) ; durant la journée du 16 octobre 2016 (Day Of Year 290).

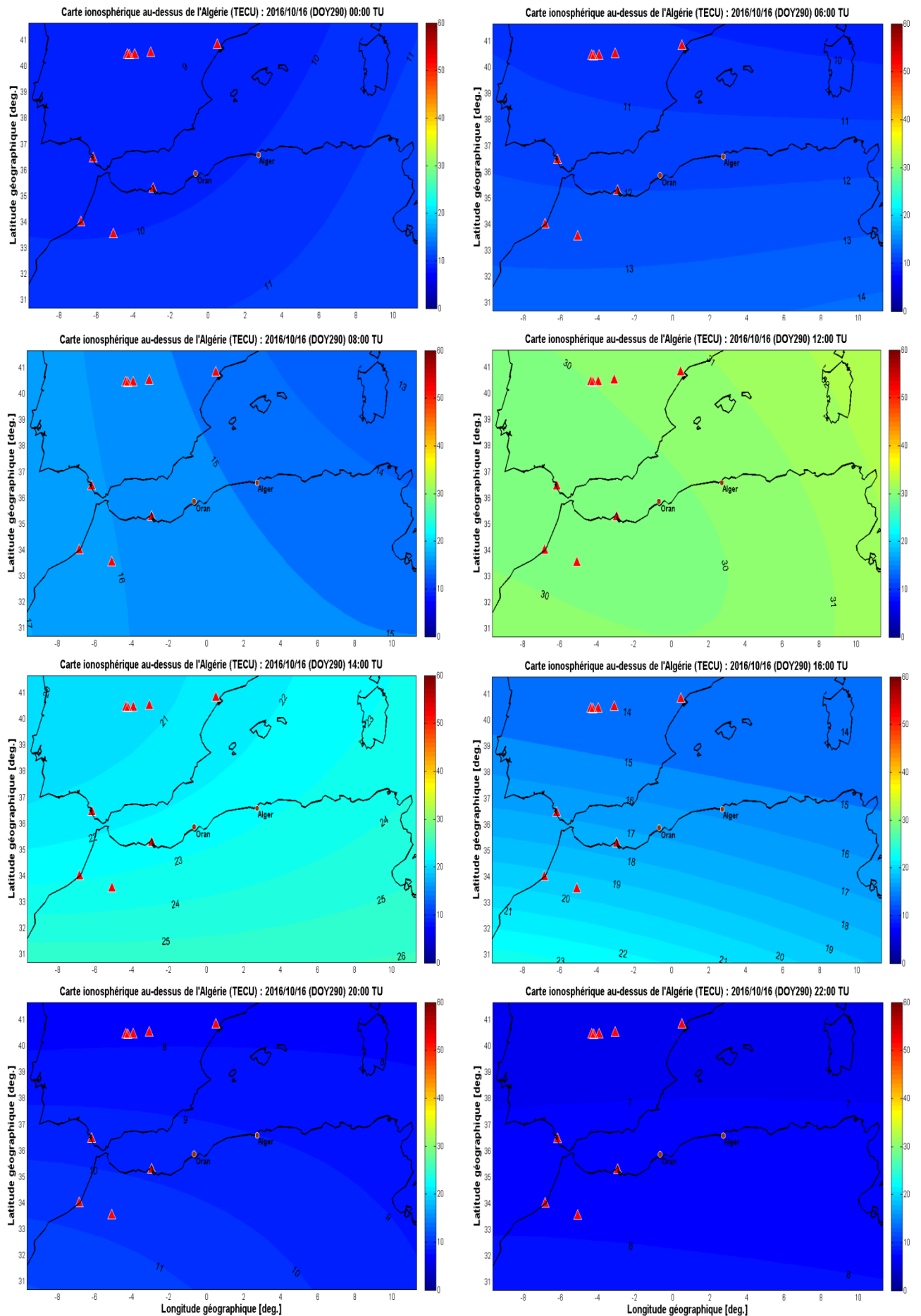


Figure III.5 : Variation diurne et nocturne du TEC ionosphérique au-dessus de l'Algérie, journée du 16 Oct. 2016

Partie II : Détection des précurseurs séismo-ionosphériques par GPS

Étude des évènements sismiques de l'Italie (octobre 2016, $M_w \geq 6.1$)

Cette partie a fait l'objet d'une publication scientifique internationale.

“Tachema, A., Nadji, A., **Geodetic contribution to predict the seismological activity of the Italian metropolis by the ionospheric variant of GPS_TEC**, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics (2019), doi: <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.12.006>.”

Introduction

Au cours des dernières décennies, les mesures géodésiques étudiées via les signaux du système GNSS, sont devenues une technique d'investigation spatio-temporelle largement utilisée à l'observation de la haute atmosphère ionisée (Ionosphère : 60-1000 km d'altitude). L'étude du mécanisme de couplage dynamique 'Lithosphère-Atmosphère-Ionosphère' trouve des applications géodésiques et sismotectoniques importantes (Shalimov et Gokhberg 1998; Liu et al., 2002; Molchanov et al., 2004; Pulinets et al., 2005; Pulinets et Ouzounov, 2011; Kuo et al., 2014; Akhoondzadeh et al., 2019; Tachema et Nadji, 2019). Ces études ont montrées l'existence d'une corrélation entre les déformations structurales, profondes au niveau de la lithosphère, dues aux tremblements de terre et les perturbations ionosphériques enregistrées par les data RINEX. Le support de cette notion de détection des précurseurs sismiques telluriques revient à l'existence d'une membrane ionosphérique F2, située à 350 km au-dessus de la Terre dont la propriété physique jouit d'une concentration en ions-électrons maximale.

Par définition, les anomalies ionosphériques sont identifiées par le biais d'un paramètre physique donnant le contenu total en électrons libres de la zone traversée (TEC, Total Electron Content). A cet effet, nous avons exploité les données de ce paramètre TEC obtenu des stations de références GPS aux formats RINEX (Receiver Independent Exchange Format) avec une fréquence d'échantillonnage évaluée de 30 secondes. De ce fait, la procédure d'échantillonnage et du dépouillement du signal GPS est primordiale. Cette étape nous a permis d'établir les séries chroniques relatives aux perturbations énergétiques de l'asthénosphère afin de dresser des cartes thématiques connues sous le nom du 'TEC-Mapping' (Tachema et Nadji, 2019). Basé sur ces cartes thématiques ionosphériques, locales ou globales, l'analyse minutieuse du signal GPS_TEC met en évidence des singularités contenues dans la signature spectrale GPS. Cette procédure d'analyse servira de base à mieux cerner la détection des précurseurs séismo-ionosphériques, inclus au sein du trace du signal GPS_TEC, qui précèdent les principaux évènements sismiques ayant affectés la péninsule italienne (Italie centrale, $M_w \geq 6.1$, fin octobre 2016).

III.3 Problème de données liées à la couverture géodésique locale

Afin de compléter la démarche analytique, signalant l'énigme d'acquisition et l'indisponibilité des données géodésiques du réseau international IGS dans la région Oranaise de l'Algérie (sismicité modérément active $M \leq 5.7$, cf. Annexe G), qui fait partie du sahel africain. A cet effet, nous devons évoquer l'état d'un disproportionnement dans le nombre de stations IGS permanentes sur les deux rives méditerranéennes où le réseau géodésique IGS est plus dense dans les territoires européens occidentaux que sur la rive méridionale. A l'exception du royaume marocain, qui dispose de deux stations IGS permanentes, indexées par RABT et IFRN (Fig. III.6) ; le territoire national algérien ainsi que ses pays limitrophes (la Tunisie, la Mauritanie, la Libye, l'Égypte, le Mali et le Niger) connaissent une carence accrue en matière de ces stations mondiales.

Devant cette insuffisance en données géodésiques (RINEX : Observation-files et Navigation-files), notre étude ne peut aboutir sans faire intervenir d'autres variantes liées aux magnitudes élevées et à la distribution des provinces géographiques ; dont la surveillance en données GPS/GNSS est quasi-régulière. Ainsi, nous nous sommes orientés vers l'exploitation des stations européennes et celles du Maroc ; qui entourent la rive septentrionale de la Méditerranée.

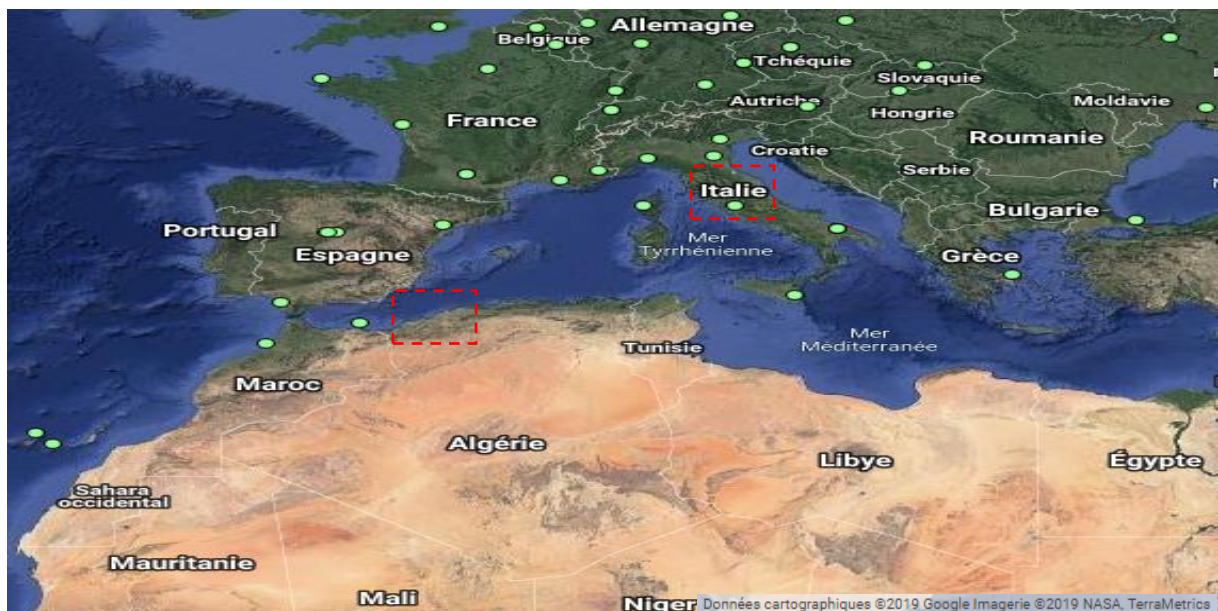


Figure III.6 : Manque accru des références stationnaires (IGS) en continent africain, y compris le territoire algérien. Les zones d'investigation sont indiquées par les rectangles rouges.

Cependant, pour l'acquisition de ces données, en relation avec notre thématique, nous avons opté à étudier la série des évènements telluriques survenus au niveau de la province italienne ; principalement le séisme d'Amatrice (24 août 2016, $M_w = 6.2$), d'Ussita (26 octobre 2016, $M_w = 6.1$) et celui de la ville de Norcia (30 octobre 2016, $M_w = 6.6$). En effet, les enregistrements du GPS_TEC (données RINEX), à l'échelle nationale, sont généralement inexploitable, ce qui nous a amené d'utiliser d'autres données relatives au réseau GPS universel du service IGS. Pour cette opération et afin de traiter la configuration du TEC-Mapping, nous avons utilisé plusieurs fichiers d'acquisition, de stocks et de traitement d'information géodésique liées au 'GPS'. Sachant qu'un seul signal ne peut résoudre l'endroit précis de l'anomalie ionosphérique ; on se trouve contraint d'utiliser plusieurs stations IGS pour l'établissement d'une cartographie thématique régulière du TEC ionosphérique.

III.4 Présentation de la région d'étude et du TEC-Mapping

III.4.1 Situation géographique des évènements sismiques étudiés

En effet, le séisme de l'Italie du 30 octobre 2016 (selon l'USGS³ : $M_w = 6.6$, $P=10\text{Km}$, 06h 40mn 18.3s UTC / HL : +1h) est considéré comme un séisme le plus dévastateur, depuis le séisme de 1980 en Irpinia ($M_w = 6.9$). L'épicentre de ce tremblement de terre est situé au centre d'Italie (Norcia : 42.84° N , 13.11° E) à 110 km au Nord-Est de la capitale Rome (Fig. III.7).

Tableau III.1

Séismes étudiés pour l'analyse des précurseurs séismo-ionosphériques par la variante TEC.

Séisme	Latitude	Longitude	Jour et Temps UTC	Magnitude (M_w)
Amatrice, Italie	42.71° N	13.22° E	Mer. 24 août 2016 01h 36mn 32.3s	6.2
Ussita, Italie	42.92° N	13.13° E	Mer. 26 oct 2016 19h 18mn 07.2s	6.1
Norcia, Italie	42.84° N	13.11° E	Dim. 30 oct 2016 06h 40mn 18.3s	6.6

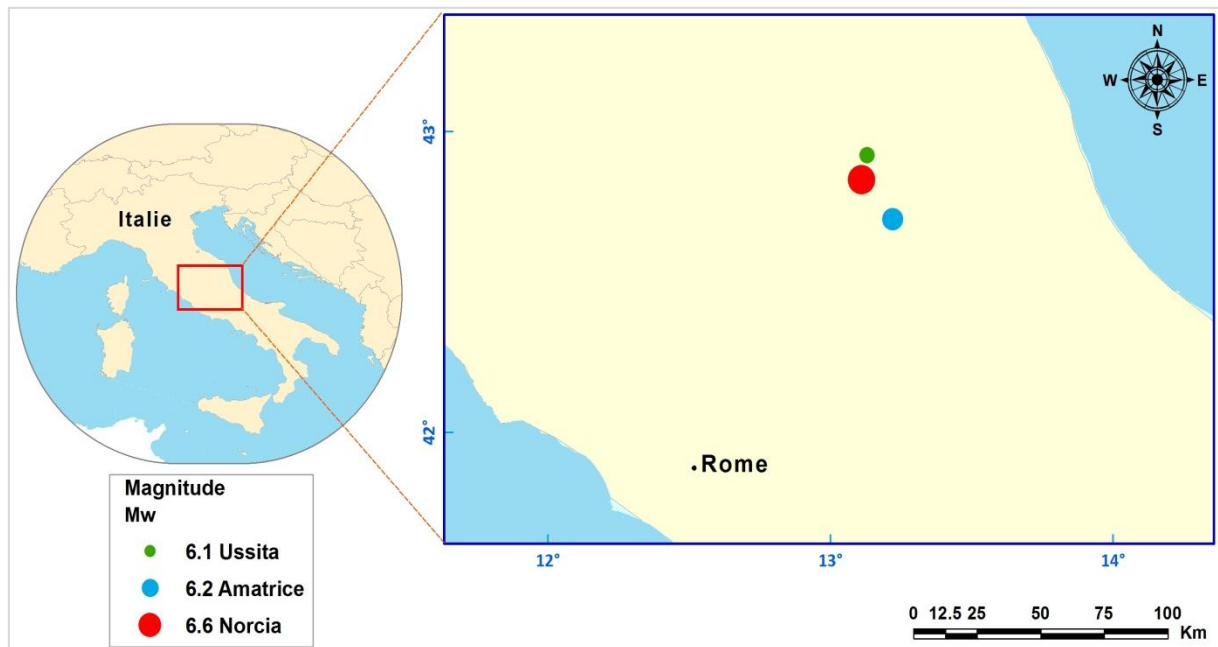


Figure III.7 : Carte épiscopentrale séismique des Apennins centraux (Italie) : Norcia, 30 octobre 2016 ($M_w = 6.6$) ; Ussita, 26 octobre 2016 ($M_w = 6.1$) et Amatrice 24 août 2016 ($M_w = 6.2$). Le foyer principal est indiqué en rouge.

³United States Geological Survey, littéralement: Institut d'études géologiques des États-Unis.

En cette région d'Italie centrale qui constitue une zone charnière des Alpes européenne connue depuis l'antiquité par plusieurs catastrophes naturelles en relation avec l'activité sismique des monts Apennins (à savoir les événements sismiques : 1915 Avezano $M_w = 6.7$, 1997 Umbria et Marche $M_w = 6.1$, 2009 L'Aquila $M_w = 6.3$ et celui de 2012 à Emilia de magnitude 6.1). Notant que cet événement a été précédé par deux puissantes secousses précurseurs (Fig. III.7 et Tab. III.1) : du 24 août 2016 (Amatrice, $M_w = 6.2$) et celui du 26 octobre 2016 (Ussita, $M_w = 6.1$). Au total, plus de 700 répliques dont les $M_w \geq 3$ Richter, ont été enregistrées dans cette région, durant les deux mois qui suivaient l'événement principal du 30 octobre 2016.

III.4.2 Procédé envisagé à la cartographie ionosphérique (TEC-Mapping)

Afin de détecter des éventuelles variations ionosphériques associées au puissant tremblement de terre ($M_{6.6}$) affectant la péninsule italienne (Norcia, 30 octobre 2016 à 06h 40mn 18.3s UTC), nous avons exploité les données du réseau d'observations géodésiques de 220 stations GPS/GNSS permanentes dont une partie est composée de soixantaine stations introduites pour encadrer l'ensemble de cette province géographique (Fig. III.8). Ces stations de référence sont gérées par le service GNSS international (IGS) – assure des produits de données GNSS de haute qualité – et elles sont représentées par des fichiers contenant les données d'observation (IGS_OBS) et les messages de navigation ou d'éphémérides (IGS_NAV) éditées sous le format d'échange standard RINEX. Ces fichiers data sont inventoriés dans une archive au format compressé ZIP (extension:*.Z) pour limiter la capacité d'informations (exemple de nomenclature: brux1580.08d(n).Z⁴). Afin de pouvoir lire les données d'observations (mesures de phase des ondes porteuses L1 et L2, mesures de pseudo-distance des codes C/A, P ou Y) et les messages de navigation (inclut en particulier les éphémérides permettant le calcul de la position des satellites, l'état des satellites, les corrections sur leurs horloges internes ainsi que des données atmosphériques) (El-Rabbany, 2002; Hofmann-Wellenhof et al., 2008; Gurtner et Estey, 2013), nous avons une étape indispensable qui consiste à traiter et à décompresser ces O/N files, à l'aide des deux programmes *GAMIT/GLOBK* de MIT (Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, États-Unis) et *GPS data conversion* de l'ORB (Observatoire Royal de Belgique), est primordiale. Conformément à la structure organisationnelle reproduite à la figure (III.3), et à la faveur de nos propres programmes et sous-programmes développés sous l'environnement Matlab (version R2013a) ; le traitement géodésique de ces données GPS nous a permis d'établir les

⁴ [sitejjs.aat]: Station IGS à Brussels, Day Of Year (DOY) :158 (06 juin de l'année 2008), session 0 (fichier de 24h),
o : fichier_obs, n : fichier_nav.

cartes thématiques 'TEC-Mapping' et de confectionner les diagrammes des séries temporelles du TEC ionosphérique étudié. A noter que les informations liées aux récepteurs GPS stationnaires sont indiquées respectivement dans le tableau (A.1).

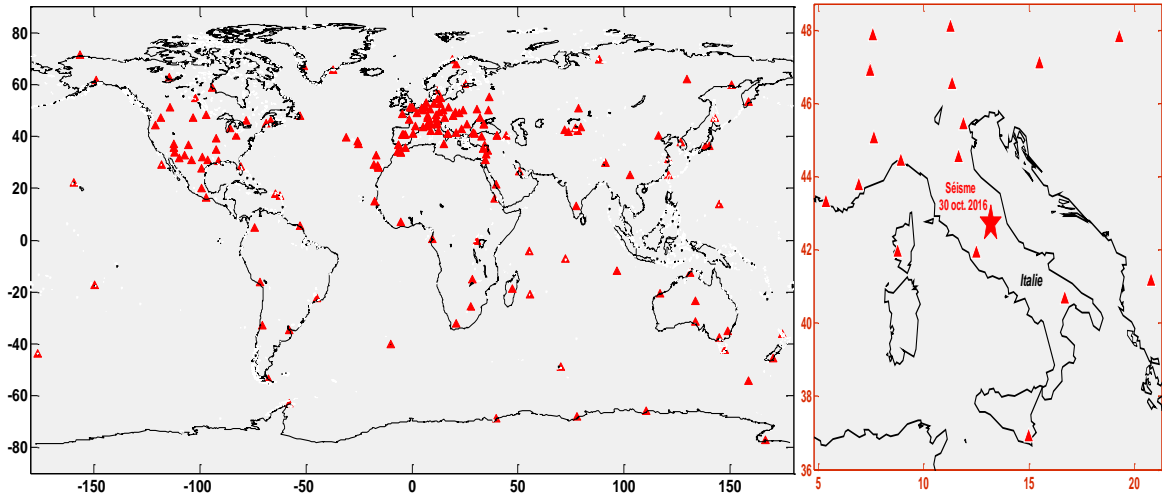


Figure III.8 : Distribution géographique des stations IGS (▲) et la position de l'épicentre du séisme (★)

Le constat de cette thèse, traitant en partie la prévision sismique, est basé notamment sur les relevés des enregistrements ionosphériques et leurs traitements spatiaux qui se répercutent de façon significative sur l'état d'activité sismique d'une région donnée. Compte tenu des difficultés approuvées par les sismologues pour prédire le moment du déclenchement de l'évènement sismique, l'introduction de la variante ionosphérique 'TEC', peut bien résoudre la prévision des précurseurs sismiques. Notant que la crédibilité en termes de stockage d'information sur cette variante entre l'écorce terrestre et l'atmosphère devient actuellement formelle vue l'évolution technologique et la densification des missions spatiales en contexte du GPS et du Demeter.

En domaine de la prévision des précurseurs sismiques, par les perturbations des signaux GPS, on note la dépendance existante entre les effets des vibrations tellurique et le couplage ternaire 'Lithosphère-Atmosphère-Ionosphère' (Molchanov et al., 2004; Pulinets et al., 2005), dont la limite de la résolution peut atteindre un délai de quelques heures à quelques jours près, bien avant l'arrivée de l'évènement principal. On doit préciser cependant que les distorsions des signaux GPS/GNSS et les changements en taux d'amplitudes du TEC sont qualifiés comme étant de vrais précurseurs sismiques relatifs à la membrane ionosphérique.

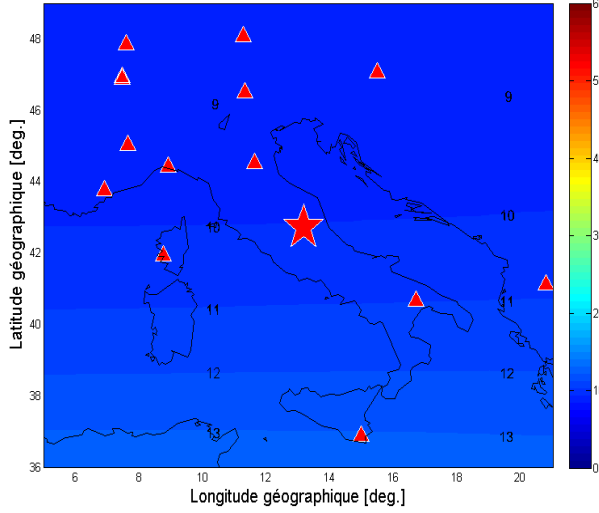
Cette nouvelle approche a constitué l'objet de plusieurs recherches antérieures traitant les perturbations ionosphériques et leurs relations avec les événements sismiques de magnitudes notables ($M_w \geq 5$); tels que Zakharenkova et al., 2007; Namgaladze et al., 2011; Romanovskaya et Namgaladze, 2014.

Le traitement géodésique réservé à cet événement, affectant l'Italie ($M_w = 6.6$), a débuté par une phase d'échantillonnage et d'analyse des valeurs TEC ionosphérique, couvrant une période de 35 jours avant et 11 jours après le séisme du 30 octobre 2016 (du DOY 270 au DOY 315), où ce principal événement a généré un important accident tectonique submergeant la surface topographique. La seconde phase de ce travail consiste à représenter la courbe d'évolution chronique du TEC pour pouvoir analyser l'intégrité du signal GPS_TEC. Les composantes physiques de ce dernier confirment le temps-origine du déclenchement des précurseurs sismiques qui précèdent le choc principal. Les résultats obtenus montrent que le délai qui sépare l'information sismologique de l'information GPS est estimé à plus d'une semaine avant l'arrivée de ce principal événement.

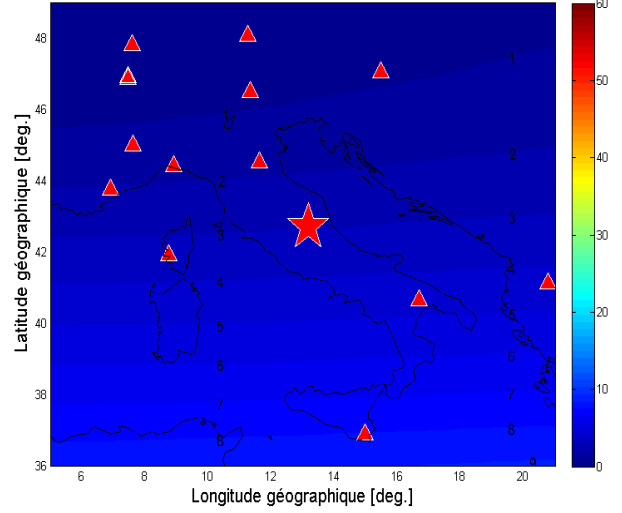
Cette activité sismique notable repère un retentissement remarquable avec les observations liées à l'activité ionosphérique régionale. Les cartes thématiques (Fig. III.9) relatives au contenu en électrons libres 'TEC' et de sa densité électronique ' N_e ' constituent ainsi un support fondamental de surveillance d'activité sismique. Les perturbations en TEC enregistrées reflètent les changements notables de la densité électronique au niveau de la membrane ionosphérique. Les cartes TEC-Mapping ainsi réalisées montrent, à la faveur des changements du comportement du TEC, les variations d'importantes anomalies ionosphériques enregistrées au-dessus de l'Italie centrale. Rappelant que la relation entre le contenu électronique total et la densité électronique ionosphérique est donnée par l'équation (1-2), cf. chap. I § I.4.

Cette approche cartographique met en relief les variations diurnes et nocturnes enregistrées par les données RINEX du 30 octobre 2016 indexé en 'DOY 304 du calendrier GPS'. Ces données GPS_TEC ainsi que leurs perturbations sont matérialisées par un jeu de 12 cartes régulières à un pas de 2 heures d'intervalle ($f=30s$). Notant qu'une seule couche mince idéale du modèle ionosphérique regroupe le maximum de concentration en électrons libres. Afin de modéliser et de représenter le TEC ionosphérique, nous adoptons une approximation de l'ionosphère du modèle à couche unique (SLM, 'Single Layer Model') (Zhizhao, 2004; Tachema, 2012). SLM suppose que tous les électrons libres sont contenus dans une couche d'épaisseur infinitésimale à une altitude $H = 350$ km par rapport à la surface de la Terre (Wielgosz et al., 2003).

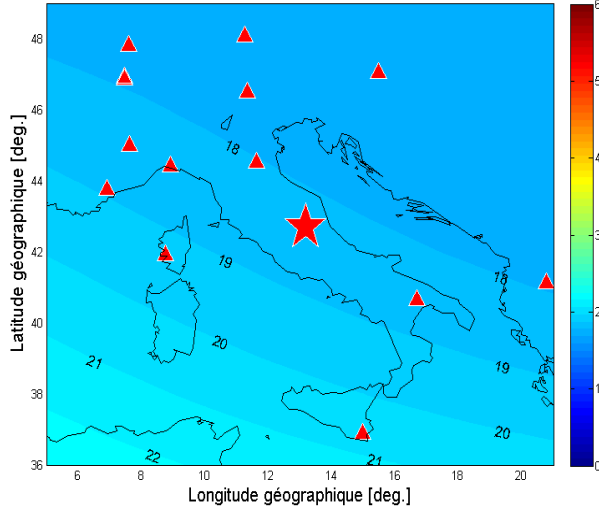
Carte ionosphérique au-dessus de l'Italie (TECU) : 2016/10/01 (J275) 12:00 TU



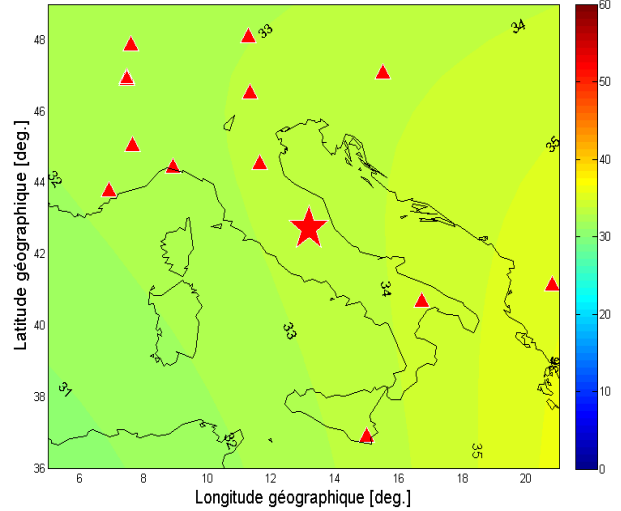
Carte ionosphérique au-dessus de l'Italie (TECU) : 2016/10/09 (J283) 12:00 TU



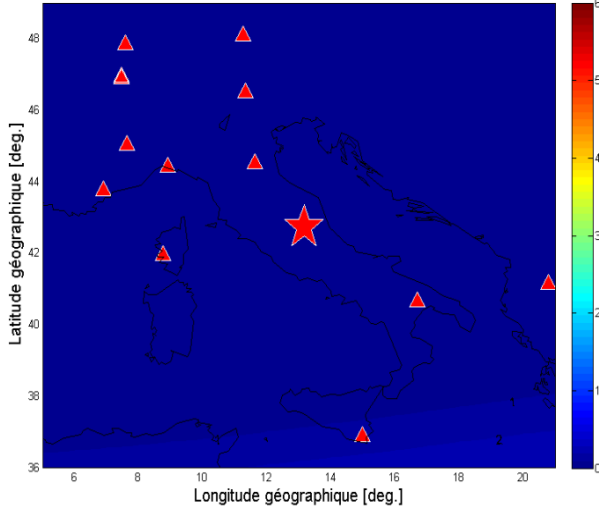
Carte ionosphérique au-dessus de l'Italie (TECU) : 2016/10/13 (J287) 12:00 TU



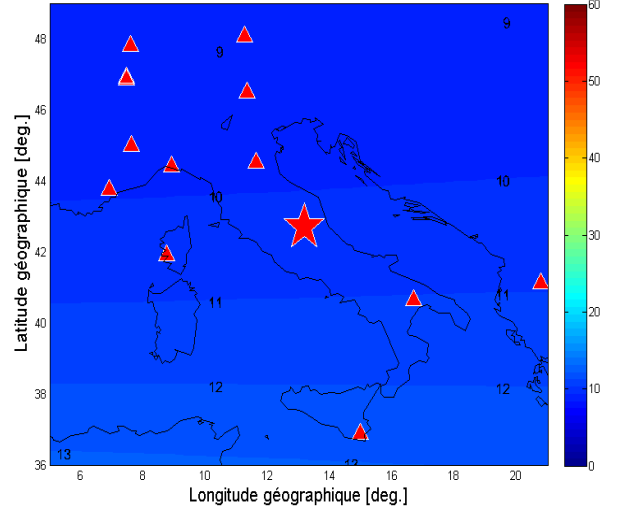
Carte ionosphérique au-dessus de l'Italie (TECU) : 2016/10/16 (J290) 12:00 TU



Carte ionosphérique au-dessus de l'Italie (TECU) : 2016/10/21 (J295) 12:00 TU



Carte ionosphérique au-dessus de l'Italie (TECU) : 2016/10/26 (J300) 12:00 TU



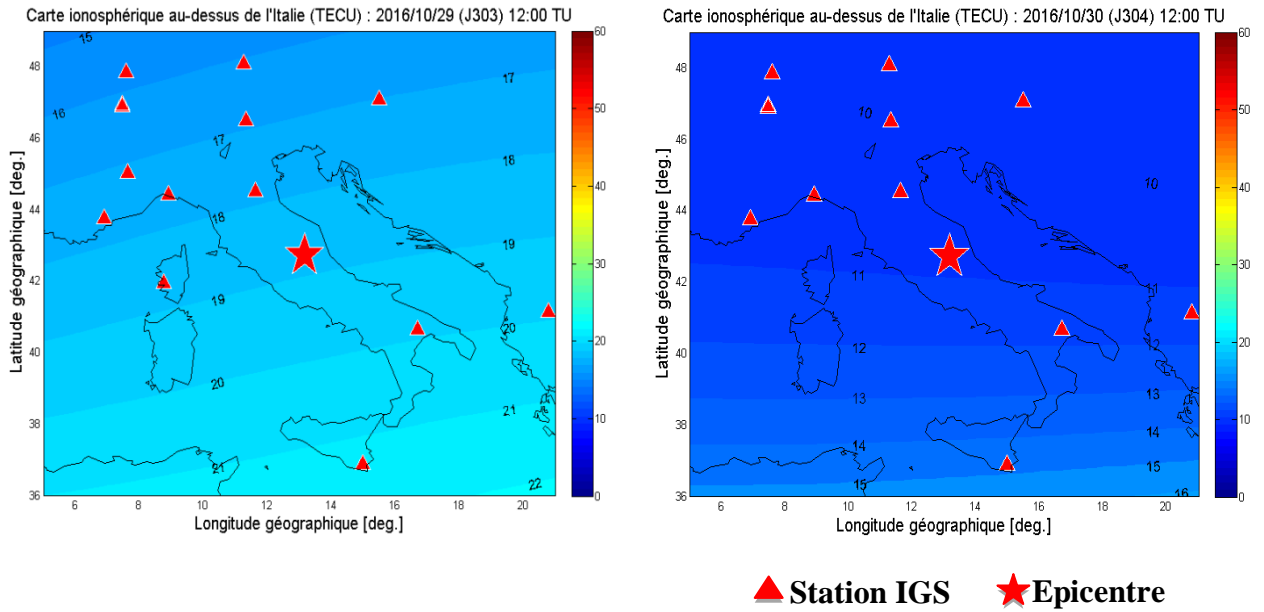


Figure III.9 : Modèle local d'évolution journalière de la cartographie chromatique des valeurs TEC (à 12H), représentative de la période (01-09-13-16-21-26-29-30 octobre 2016) de la péninsule italienne à 350 km d'altitude au-dessus de la Terre. Le triangle rouge représente la position des stations IGS et l'étoile rouge représente la position de l'épicentre du séisme.

III.5 Résultats d'analyse spectrale de la membrane ionosphérique

Pour identifier les différentes échelles d'observations spatio-temporelles et dynamiques du contenu en électron libre (TEC), nous avons utilisé une méthode appropriée en géodésie connue par la cartographie différentielle de la membrane ionosphérique (Zakharenkova et Shagimuratov, 2009). Cette approche utilise différents délais d'observations pour détecter les anomalies et le comportement de la variante TEC. À cet effet, la durée d'observation utilisée pour l'évènement tellurique de l'Italie centrale (Norcia, $M_w = 6.6$, 30 octobre 2016) s'étalait sur une période de 46 jours (26 septembre – 10 novembre 2016), dont le précurseur sismique se prononce sur un délai supérieur à une semaine de l'évènement principal (Fig. III.10).

Variations de la série chronologique du TEC avant et après le séisme de l'Italie (Norcia, M_w 6.6, 30.10.2016)

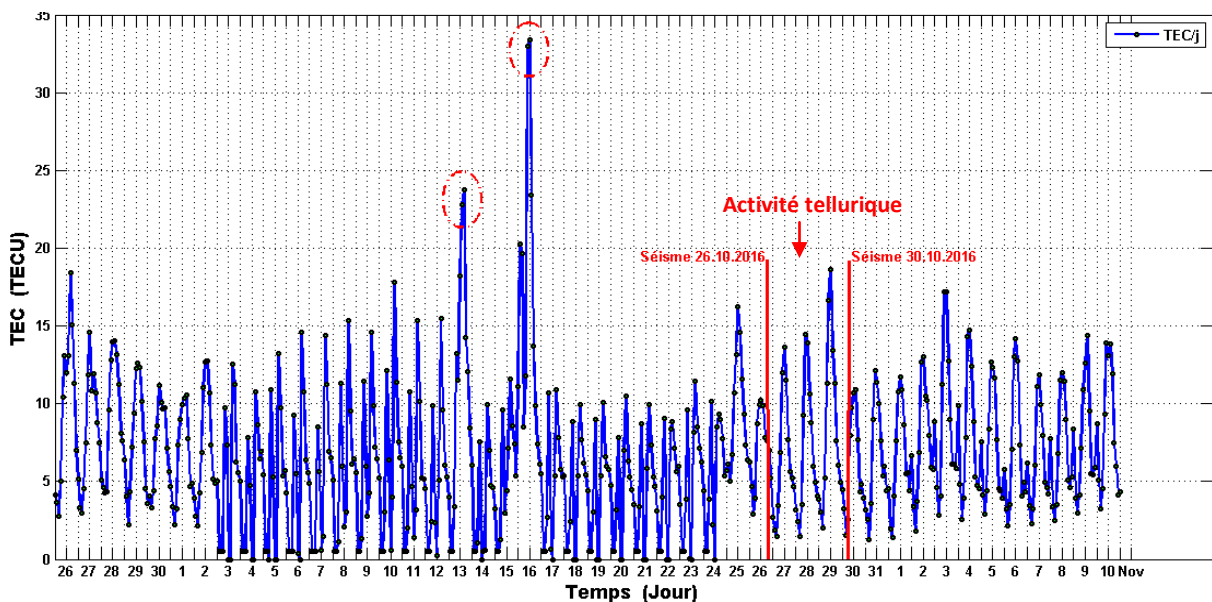


Figure III.10 : Trace des enregistrements physiques (TEC) des précurseurs sismiques (26 sept. 2016 – 10 nov. 2016). Le cercle rouge représente les variations anormales du TEC ; le moment du séisme est désigné par une ligne verticale rouge.

Le traitement géodésique des données GPS (O-files et N-files) de type RINEX, sous l'environnement de programmation (Matlab), nous a permis de tracer la courbe de la variation chronique du TEC ionosphérique. Ainsi, le signal GPS_TEC obtenu montre l'existence de plusieurs phases avec des niveaux différentiels en valeurs TEC. Ces phases sont interprétées en termes de périodes de calme ou de forte activité solaire, où l'intensité du champ magnétique terrestre ont des effets directs sur les variations journalières du TEC (Tachema, 2012). De même, l'activité sismique porte l'empreinte des variations électromagnétiques enregistrées par les signaux sismiques de type longitudinale, transversale et de surface.

La segmentation du signal GPS_TEC, relative au séisme de Norcia ($M_w = 6.6$, 30 octobre 2016), sera donc possible grâce aux traitements des données RINEX_IGS et l'analyse minutieuse du coda du signal séismo-ionosphérique (aléa) ; cette dernière est identifiée et classée par le biais des valeurs d'amplitudes extrêmes du TEC (en TECU) qui se distinguent en trois niveaux différents (Fig. III.11).

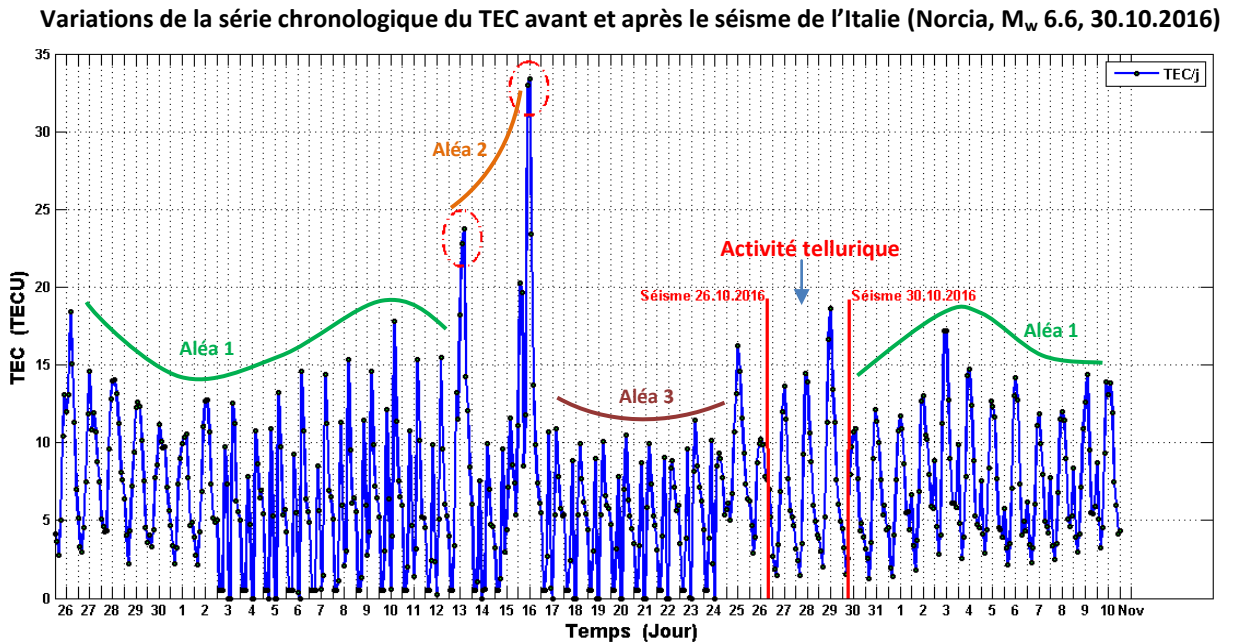


Figure III.11 : Interprétation de la coda du signal ionosphérique relative au séisme de Norcia ($M_w = 6.6$, 30 octobre 2016). Le cercle rouge représente les variations anormales du TEC et le moment du séisme est désigné par une ligne verticale rouge.

D'après cette initiative et sur la base de ces observations, on constate que les valeurs du TEC enregistrés du 17 au 24 octobre 2016 (à midi) sont presque identiques (homogènes) avec une moyenne de 11 TECU, de même pour la période du 01 au 12 octobre 2016 ; qui présente le même aspect. Par ailleurs, les perturbations du TEC enregistrées durant les journées du 13 octobre et du 16 octobre 2016 ont des valeurs notables qui dépassent les 20 TECU et 34 TECU, respectivement (Fig. III.11).

En effet, ces variations d'amplitudes du TEC ionosphérique traduisent des modifications profondes en sismo-tectonique des zones affectées par l'évènement sismique de l'Italie centrale ($M_w = 6.6$, 30 octobre 2016) qui s'est répercuté sur les changements d'état de l'ionosphère avec un passage brusque entre 30% à 55% marquant le passage des journées calmes, en densité électronique, au niveau de l'Italie. En conséquence, les perturbations ionosphériques notables ;

mentionnées sur le signal GPS_TEC reflètent l'état d'une déformation structurale profonde au niveau de la lithosphère.

Parmi les résultats fructueux de cette étude, nous citons la possibilité de prédire les événements sismiques pouvant se manifester au niveau d'une province géographique, de quelques jours près, bien avant le déclenchement du choc principal. Cette technique proposée pourra constituer une démarche analytique dans le processus de la surveillance des catastrophes naturelles au sein des observatoires géodésiques, géophysiques et géodynamiques en zones littorales (Nadji, 2010). Dans ce présent cas, péninsule italienne, les observations effectuées durant la période du 13 au 16 octobre 2016, ont mis l'accent sur des changements notables sur la variante TEC à l'échelle régionale (indiqué par des cercles rouges sur la Fig. III.10). Ainsi, l'empreinte d'un précurseur sismique 10 jours et 14 jours, été bien lisible, déterminé bien avant la manifestation des deux principaux séismes d'Italie : 'Ussita' (26 octobre 2016, $M_w = 6.1$) et 'Norcia' (30 octobre 2016, $M_w = 6.6$), respectivement. De ce fait, on vient de confirmer que grâce à la cartographie assistée par l'outil informatique, utilisant des programmes sous Matlab (Tachema, 2012), nous avons arrêté une configuration de la distribution bidimensionnelle des anomalies ionosphériques pré-sismiques au niveau de la province étudiée.

III.6 Interprétation des résultats obtenus

III.6.1 Mécanismes physiques de pointée des précurseurs séismo-ionosphériques

Les variations journalières et nocturnes reflétant celles de la couche de NmF2 (valeurs maximales de concentration en électrons dans la couche ionosphérique F2) ; alors toutes les perturbations et les anomalies du TEC ionosphérique se produisent dans cette couche. Afin de détecter les causes ou influences possibles sur la relation entre le TEC ionosphérique et un événement sismique, il est nécessaire de séparer l'effet d'une cause à l'autre. Plusieurs études scientifiques récentes ont montré les causes de ces perturbations dans la couche ionosphérique, à savoir : Krasikov, 2001; Fukmoto et al., 2002; Liu et al., 2002; Khagai et al., 2002; Pulinets et Legen'ka, 2003; Dabas et al., 2007; Hurtaud, 2007; Chavez et al., 2011.

Selon l'étude menée par le chercheurs Zolotov et al. (2012), ces causes peuvent être :

- Flux plasmatiques de la plasmasphère le long des lignes du champ géomagnétique ;
- Vents thermosphériques dirigés vers l'équateur ;
- Modifications de la composition neutre (augmentation du rapport entre les concentrations de composants atomiques et moléculaires de la thermosphère) ;
- Transport de plasma zonal par le champ électrique méridional ;
- Transport du plasma vers le haut par le champ électrique zonal (dirigé vers l'Est).

L'interprétation de ces causes est comme suit :

- L'auteur a précisé que les flux dans la plasmasphère devraient être exclus des causes possibles, car ils induisent uniquement une augmentation nocturne de NmF2 mais ne modifient pas le TEC ionosphérique.
- La génération de vents thermosphériques dirigés vers l'équateur nécessite certains gradients de pression de gaz neutre à une altitude de la couche F2 proprement dite, mais cela semble douteux.
- Les modifications de la composition neutre ne doivent pas être exclues, car elles peuvent être provoquées par des modifications du régime de diffusion turbulente dans la basse et la moyenne atmosphère et, par conséquent, par l'altitude de la turbopause dans la région

de l'épicentre. Cependant, cette manière n'explique pas le couplage magnétique observé des effets ionosphériques précédant un événement sismique.

- Les dérives de plasma zonales peuvent augmenter le TEC dans les régions de convergence, où les courants dirigés de manière opposée sont rencontrés. En raison de l'intégration du champ géomagnétique dans le plasma, un tel flux de plasma transversal descendant dans le tube signifiera une compression du plasma avec une augmentation des pressions magnétique et gazeuse. L'effet résultant sur la concentration en électrons sera principalement négatif (diminution) et n'aura aucune influence sur le TEC.
- Les champs électriques peuvent facilement être transférés de la basse vers la haute ionosphère, le long de lignes de champ magnétiques et plus loin dans l'hémisphère opposé, de sorte qu'ils sont facilement considérés comme la cause principale de la formation de précurseurs séismo-ionosphériques (variabilité du TEC) car ils fournissent un couplage géomagnétique des effets ionosphériques. Le plasma ionosphérique dans la couche F2 est magnétisé et se déplace perpendiculairement au champ géomagnétique à la vitesse d'une dérive électromagnétique sous l'effet du champ électrique. Selon l'orientation du champ, le transport de plasma par cette dérive peut à la fois augmenter et diminuer le contenu en électrons dans la couche F2.

Sur la base de ces études et des calculs de modèle de Namgaladze et al. (2009), on peut donc en conclure que le mécanisme physique le plus probable produisant des perturbations pré-séismiques NmF2 et des perturbations du TEC ionosphérique, est la dérive verticale du plasma ionosphérique de la couche F2 sous l'influence du champ électrique zonal d'origine sismogène.

III.6.2 Variations des paramètres de l'atmosphère terrestre

Les observations de l'environnement proche de la Terre pendant les périodes de préparation au séisme, par le biais des données satellitaires ou des instruments au sol, ne se limitent pas seulement à la couche ionosphérique. Différents types de signatures pré-séismiques ont également été détectés dans l'atmosphère et qui se manifestent au cours des périodes allant de plusieurs jours et semaines précédant les chocs, à savoir l'augmentation de l'ionisation et de la

radioactivité sous l'effet des aérosols⁵, des anomalies thermiques et nuageuses (Pulinets et al., 2015; Namgaladze et al., 2018). En comparaison avec le champ électrique par beau temps (~100 V/m), l'événement sismique notable peut générer un fort champ électrique vertical anormal (> 1 KV/m) près de la basse atmosphère terrestre (Vershinin et al., 1999; Pulinets et Boyarchuk, 2004).

Les rejets gazeux -proviennent de sources naturelles et anthropiques- outre leur rôle destructeur pour les groupes neutres, peuvent emporter avec eux des aérosols submicroniques radioactifs et métalliques qui engendreront de l'électricité atmosphérique et augmenteront l'intensité du champ électrique atmosphérique, générant ainsi un champ électrique sismogène (Dabas et al., 2007).

En raison de la rupture et du frottement des particules de poussière et de l'attraction de petits ions sur la poussière, les particules d'aérosol se chargent (Liperovsky et al., 2008). Le transport vertical de ces aérosols chargés par convection atmosphérique et diffusion turbulente forme le courant électrique externe, ce qui permet de les injecter dans la basse atmosphère (Sorokin et al., 2005; Kuo et al., 2018; Namgaladze et al., 2018).

Les rayons cosmiques galactiques, les gaz légers, les aérosols et l'émanation anormale de particules radioactives (principalement le radon) avant le déclenchement des séismes modifieraient les conditions électriques atmosphériques (renforcent la conductivité atmosphérique et l'ionisation de l'air sur la zone séismo-active), ce qui modifie localement le champ électrique du circuit électrique global (GEC) et augmente la résistance atmosphérique en raison de la perte de mobilité des ions (Kim et al., 1994; Harrison et al., 2010; Xu et al., 2015; Denisenko et al., 2019). Par conséquent, la couche atmosphérique proche du sol devient un véritable plasma (gaz ionisé), avec une concentration en particules comparable à celle de certaines régions de l'ionosphère terrestre (Pulinets et Boyarchuk, 2004).

En outre, les auteurs Pulinets et al. (2000) ont montré que le couplage entre la surface de la Terre et la couche ionosphérique est dû essentiellement au champ électrique anormal généré dans la zone de préparation des séismes.

En se référant aux études susmentionnées et aux calculs des auteurs, on peut conclure que tous ces facteurs et mécanismes contribuent à augmenter la conductivité de l'air et l'ionisation de la basse atmosphère (plasma), ce qui permet au champ électrique sismogène de pénétrer de la zone épiscopentrale vers l'ionosphère à travers l'atmosphère neutre sous-jacente.

⁵ Plus fines particules solides et liquides provenant des diverses substances (poussière, aérosol, suie, roches érodées, etc.), flottant dans l'air. La taille des particules peut aller de l'échelle nm à mm, la durée de vie allant de quelques minutes à quelques jours ou même plusieurs semaines.

III.6.3 Réponse du TEC aux activités solaire et géomagnétique

La couche ionosphérique est un milieu dispersif pour les signaux électromagnétiques GPS (Tachema, 2012) et elle est directement influencée par d'autres phénomènes externes, principalement l'activité solaire (ex. Éruption solaire et cyclicité sur 11 ans) et l'activité géomagnétique (ex. Tempête géomagnétique) (Tachema, 2012). Ces influences entraînent des effets et des perturbations sur la variation quotidienne du contenu électronique total dans l'ionosphère. Par conséquent, une question se pose pour séparer la réponse du TEC ionosphérique à l'activité solaire et géomagnétique des précurseurs sismiques. À cet effet et afin d'étudier cette question, nous avons analysé -avec la même approche géodésique que celle décrite ci-dessus pour les séismes de l'Italie centrale 2016- le TEC ionosphérique pour la même période du 26 septembre au 10 novembre 2015 (période de contrôle : à partir de Jour 269 au jour 314 de l'année 2015, Fig. III.12) ; en tenant compte des indices d'activité géomagnétique Kp^6 et Dst^7 et de l'activité solaire de cette période.

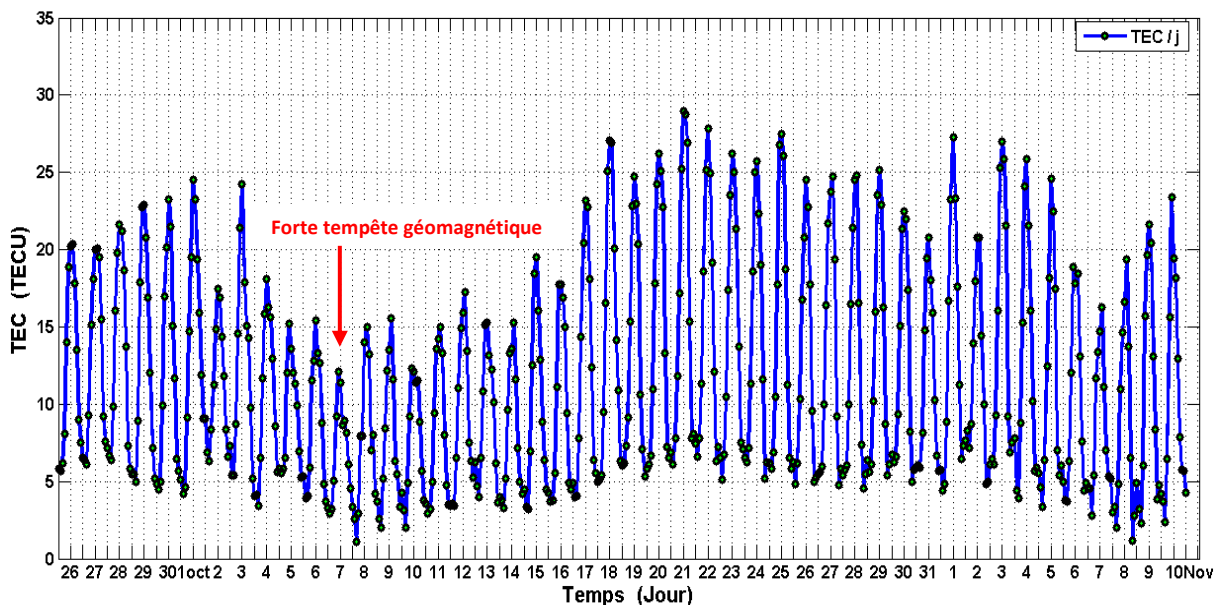


Figure III.12 : Variations de la série chronologique du TEC au-dessus de l'Italie centrale (Norcia : 42,84° N, 13,11° E) sous une activité sismique calme et une activité géomagnétique agitée.

⁶ Le Kp -index est l'indice de tempête géomagnétique global (l'activité géomagnétique).
0 (faible activité géomagnétique) < Kp -index < 9 (tempête géomagnétique extrême).

⁷ L'indice Dst (disturbance) est un indicateur de l'intensité de l'activité géomagnétique (la sévérité des orages magnétiques).
50 < Dst < -400 nanoteslas. (<https://www.spaceweatherlive.com/fr>)

La sismicité de la péninsule italienne indique qu'au cours de l'année 2015, cette zone était sismiquement calme (six tremblements de terre de magnitude $M \leq 4,5$). De plus, tout au long de la période de contrôle (du 26 septembre au 10 novembre 2015), l'état de la couche ionosphérique était agité géomagnétiquement (orage géomagnétique sévère G4 : $7+ < Kp\text{-index} < 8-$ et $-221 < Dst < -124$ nT).

De plus, depuis janvier 1994, l'année 2015 a connu trois puissants orages géomagnétiques : 17/03/2015 ($Dst = -221$ nT, $Kp = 8-$), 23/06/2015 ($Dst = -185$ nT, $Kp = 8-$) et le 07/10/2015 ($Dst = -124$ nT, $Kp = 7+$). Par conséquent, nous concluons que l'excitation de la magnétosphère (champ magnétique terrestre) par les éruptions et les vents solaires n'affecte pas efficacement la variabilité du TEC ionosphérique. Ainsi, nous n'observons (Fig. III.12) aucune modification abrupte du TEC ionosphérique. Contrairement aux événements sismiques se produisant dans la même zone de la péninsule italienne (Norcia $M_w = 6.6$: 30/10/2016, Ussita $M_w = 6.1$: 26/10/2016 et Amatrice $M_w = 6.2$: 24/08/2016) l'état de la membrane ionosphérique était géomagnétiquement calme (tempête géomagnétique G0 basse, $Kp \leq 4$) et l'activité solaire était calme à des niveaux très bas, comme le montre la figure (III.13).

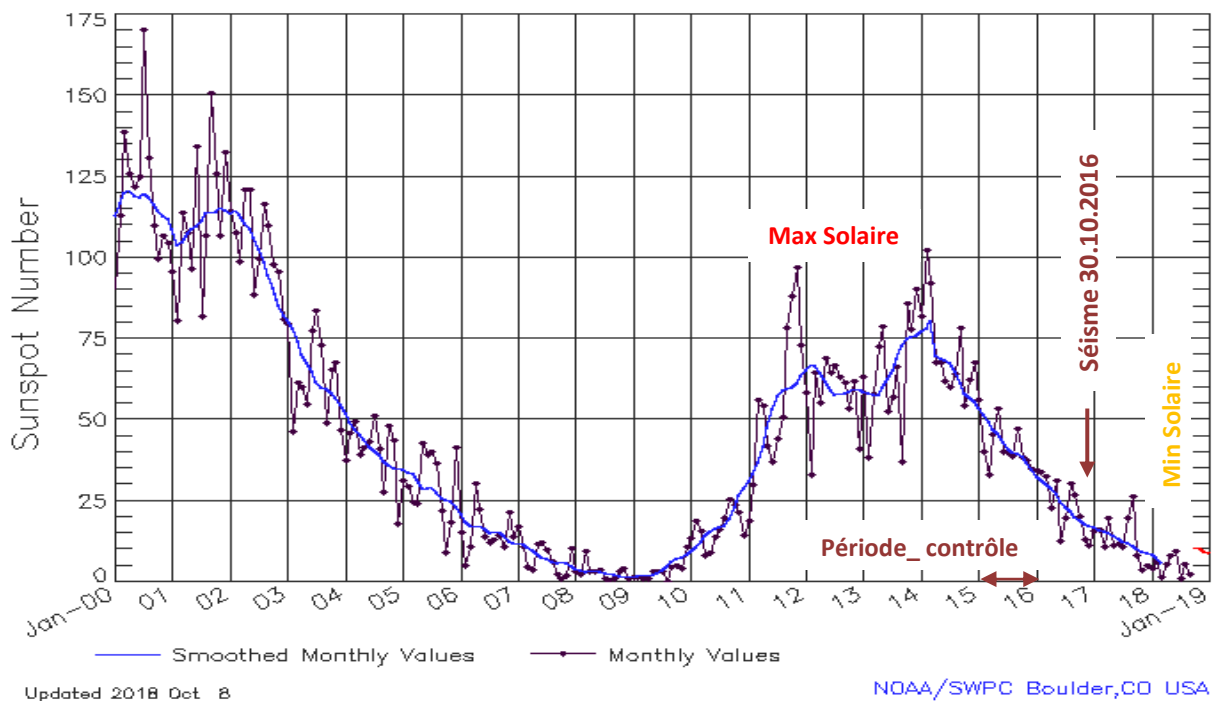


Figure III.13 : Cycle actuel de 11 ans des tâches solaires, de janvier 2000 à janvier 2019.

Les données observées dans la figure ci-dessus montrent un graphique de la progression du nombre de tâches solaires du cycle depuis janvier 2000. Ces tâches indiquent l'état de l'activité solaire (calme ou excité). D'après cette illustration, on peut observer que pendant l'année 2015 (absence d'activité sismique) et l'année 2016 (présence d'activité sismique), l'activité solaire était très calme, ce qui correspond parfaitement à un minimum solaire du cycle de 11 ans. Ces observations permettent de confirmer que les perturbations ionosphériques significatives au-dessus de la région épacentrale du centre de l'Italie (relevées par les mesures GPS_TEC sur la figure III.10) représentent l'état d'une déformation structurale profonde au niveau de la lithosphère et n'ayant absolument aucun lien avec l'activité géomagnétique et/ou l'activité solaire. Ainsi, les variations observées dans le TEC ionosphérique, 14 jours bien avant le séisme de Norcia, les 13 et 16 octobre 2016, étaient sismogènes.

Conclusion

Les techniques de sondage ionosphérique par le biais de mesures géodésiques, basées sur l'exploitation des stations GPS/GNSS permanentes du service IGS, nous ont permis de mettre en évidence les fluctuations du paramètre physique 'TEC', la corrélation entre l'activité pré-sismique des principaux événements telluriques ayant affectés l'Italie centrale ; durant la période de la fin octobre 2016 (M6.1 Ussita et M6.6 Norcia) ainsi que le régime de la variation du taux en électrons libres au niveau de la couche ionosphérique F2.

A cet effet, une étude minutieuse a été focalisée sur les événements affectant la péninsule italienne et les effets constatés au niveau de la haute atmosphère ionisée. Une somme de travaux d'analyse et de traitement géodésique nous ont permis d'obtenir des résultats probantes quant à la prévision sismique par l'intermédiaire des précurseurs séismo-ionosphériques. A noter qu'il existe effectivement certaines variations résultantes des maximas d'éruption solaire et/ou d'agitation géomagnétique, que nous avons volontairement écarté pour mieux cerner l'identification des précurseurs sismiques observés sur la coda du signal GPS_TEC. Cette approche analytique devient pratiquement accessible aux chercheurs géodésiques maîtrisant le TEC-Mapping avec l'investigation des techniques du traitement du signal composite de la chronique prévisionnelle.

Chapitre IV

Étude des évènements séismiques de différentes tailles et validation des résultats

Chapitre
4

**Étude des évènements sismiques de différentes
tailles et validation des résultats**

Introduction	97
IV.1 Zonage sismogénique	97
IV.1.1 Zone I (Oran-Beni Chougrane-Ain Témouchent)	97
IV.1.2 Zone II (Bassin de Cheliff)	98
IV.2 Séisme d’Ain Témouchent, 22 décembre 1999 ($M_w = 5.7$)	99
IV.3 Précurseurs sismo-ionosphériques liés à l’évènement tellurique d’Ain Témouchent	101
IV.3.1 Rapport de la réponse du signal trans-ionosphérique et interprétation sismo-ionosphérique	104
Conclusion	109
IV.4 Activité sismique de l’Oranais, 06 juin 2008 ($M_w = 5.5$)	110
IV.4.1 Mécanismes focaux de l’évènement d’Oran	112
IV.4.2 TEC-Mapping	113
IV.5 Résultats d’analyse spectrale de la membrane ionosphérique	116
Conclusion	122
Conclusion Générale et Perspectives	124
Références Bibliographiques	127
Annexes	148

Introduction

Rappelons que le travail de thèse présenté dans cette étude expose une approche prévisionnelle sismo-géodésique permettant de discerner, à la faveur des paramètres géodésiques et des variations anomaliques de la couche ionosphérique, le temps-origine des précurseurs sismiques d'évènements notables ($M_w \geq 5$). Cette étude est basée essentiellement sur l'investigation géo-spatiale et la cartographie de la membrane ionosphérique 'TEC-Mapping', qui favorisent la surveillance de vibrations spontanées de la couche lithosphérique régionale.

Ainsi, afin de valider et approuver les résultats obtenus lors de notre recherche, nous étudions l'évènement sismique qui a secoué la wilaya d'Ain Témouchent (22 décembre 1999, $M_w = 5.7$).

IV.1 Zonage sismogénique

Le modèle de zones sources, établi par Montilla et al. (2003), situe la partie Nord-occidentale de l'Algérie dans la zone I et la zone II (Fig. IV.1).

IV.1.1 Zone I (Oran-Beni Chougrane-Ain Témouchent)

Localisée dans la partie Ouest de l'Algérie, cette zone est représentée par les montagnes de Beni Chougrane au Sud (Mascara) et le bassin de Merdjajdo au Nord (Oran). Ces monts sont d'origine Crétacé couvert par des plis d'une déposition sédimentaire quaternaire. La bordure Sud-Est de ces montagnes sépare le bassin alluvial de Ghriss par une faille inverse d'une direction NE-SW et d'un pendage de direction NW. Sur la bordure Nord-Ouest du bassin de Beni Chougrane, se trouve le bassin de L'Habra qui est la suite de la partie Ouest du bassin du Cheliff (Bellalem, 2007).

Parmi les tremblements de terre qui ont secoué cette zone : le séisme du 09.10.1790 qui a dévasté la ville d'Oran faisant plus de 3000 victimes. Cette région a connu d'autres évènements sismiques comme celui du 29.11.1887 ($I=X$), et plus récemment, les évènements de Mascara (18.08.1994) d'Ain Témouchent (22.12.1999) et d'Oran (06.06.2008).

IV.1.2 Zone II (Bassin de Cheliff)

Le Bassin de Cheliff est classé comme la zone la plus active dans la Méditerranée occidentale où se sont produits plusieurs séismes de magnitude notable ($M \geq 5$). Cette zone a connu de nombreux évènements sismiques de forte intensité, citons en particulier les séismes de Kherba (09 mars 1858), Orléansville (Chlef) 25 août 1922 et de Carnot (les Attafs) 07 septembre 1934.

D'autre part, cette région a connu le séisme dévastateur d'El Asnam (10 octobre 1980, $M7.3$, $I_0=IX-X$, plus de 3500 victimes) qui a généré d'importantes répliques. Ce séisme est considéré comme le plus violent jamais enregistré en Afrique du Nord. Les effets produits sur le terrain ont été de différentes nature et caractéristique d'où l'appellation 'séisme désastreux' (Benhallou, 1984). L'activité sismique dans cette région est associée à une faille inverse (Bellalem, 2007).

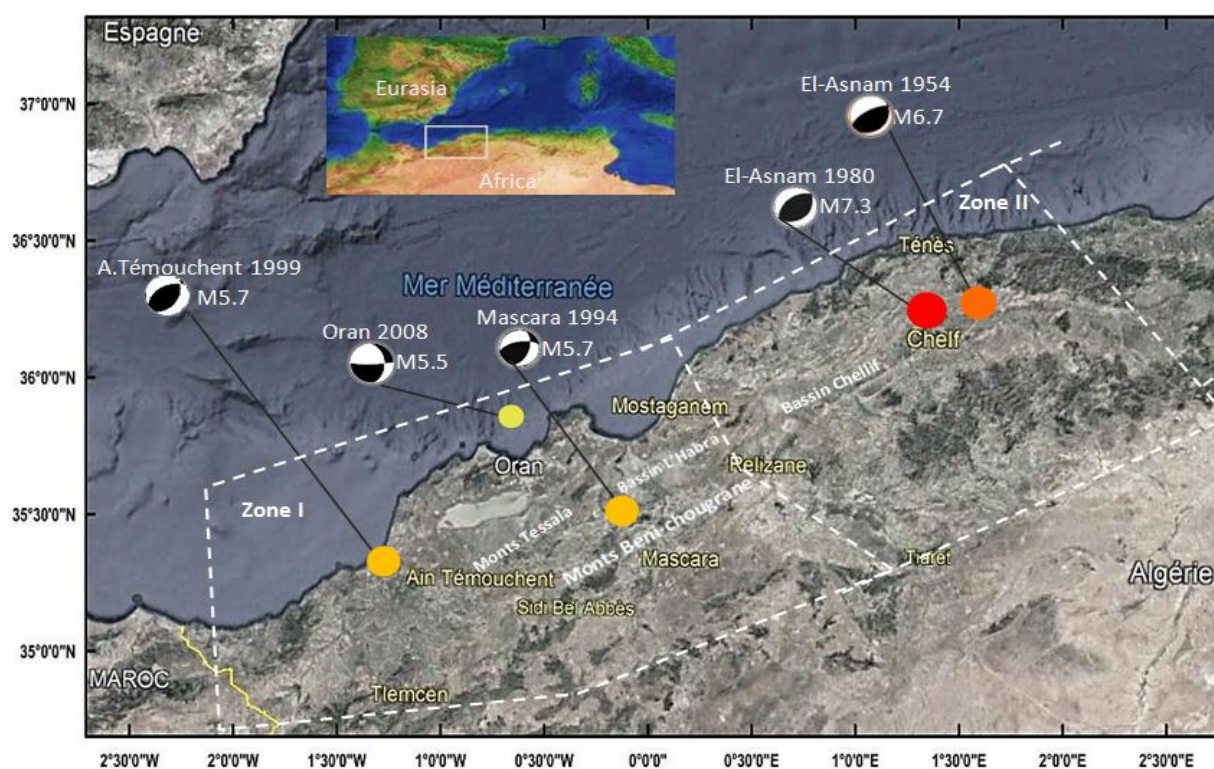


Figure IV.1 : Zonage sismique du Nord-Occidental de l'Algérie (Oranie). Les ballons de plage représentent les solutions des mécanismes focaux des principaux séismes qui ont secoué le littoral (Montilla et al., 2003, modifiée).

IV.2 Séisme d'Ain Témouchent, 22 décembre 1999 ($M_w = 5.7$)

La wilaya d'Ain Témouchent est située à 70km à l'Ouest de la ville d'Oran, cette région du Nord-Ouest de l'Algérie est caractérisée par une activité sismique faible à modérée où peu d'évènements historiques ont été observés. Le premier évènement sismique enregistré à Ain Témouchent a été survenu le 13 mai 1964 (13h 46mn 21s ; 35.50° N 01.50° O ; Région Béni Saf; $M 5.2$, $I_0=VII$) et a causé beaucoup de dommages. L'épicentre de ce tremblement de terre a été localisé au niveau des monts de Tessala à 20 km à l'Est d'Ain Témouchent (Yelles-Chaouche et al., 2004). Le deuxième évènement sismique est celui du 22 décembre 1999, qui a secoué la ville d'Ain Témouchent et ses villages avoisinants. Cette secousse tellurique est de taille modérée ($M_w = 5.7$, intensité maximale VII) mais dommageable (28 victimes et des dizaines de milliers de sans-abri).

Comme montre la figure (IV.2), l'évènement d'Ain Témouchent appartient à la région I (axe : Oran-Ain Témouchent) du zonage sismogénique algérien. En effet, la solution du mécanisme focal principal indique une faille inverse (avec un glissement vers l'Ouest) avec une rupture orientée suivant l'axe atlasique NE-SW (Yelles-Chaouche et al., 2004; Belabbès et al., 2009; Nadji, 2010) comparable à d'autres évènements sismiques majeurs de cette section de la limite de la plaque Afrique-Eurasie.

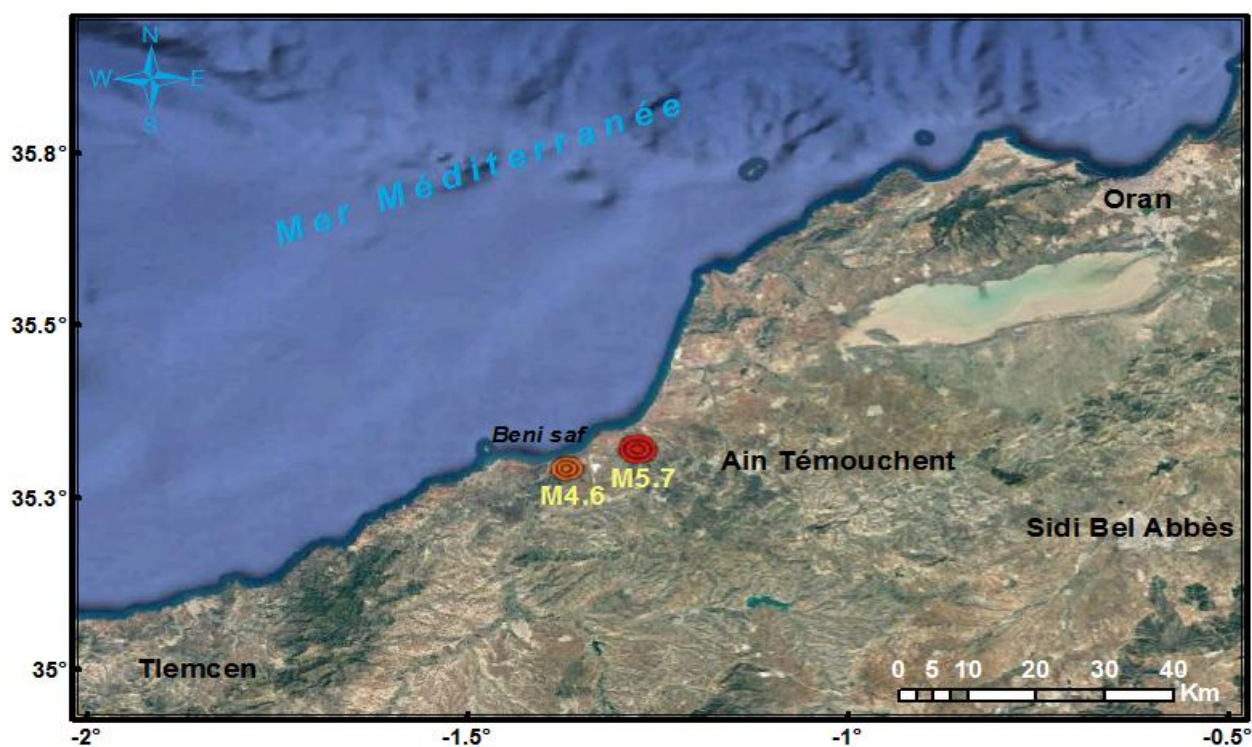


Figure IV.2 : Carte épiscoptrale sismique du séisme d'Ain Témouchent 22 décembre 1999 ($M_w = 5.7$, 17h:57mn:13s UTC / TL : +1H) et sa principale réplique ($M_w = 4.6$).

Selon le centre algérien du géophysique 'CRAAG', l'épicentre du choc principal d'Ain Témouchent (22 décembre 1999, $M_w = 5.7$, 17h 36mn 53s UTC / HL : +1h) est localisé à 1.3° de longitude Ouest, 35.25° de Latitude Nord et à une profondeur de 4 km. Vingt minutes après cet évènement, une réplique sismique de magnitude 4.6 a été localisé (1.374° W ; 35.293° N, source : USGS). (Fig. IV.2)

Tableau IV.1

Informations relatives à l'évènement d'Ain Témouchent (M5.7) recueillies par différentes institutions.

Séisme	Source	Latitude (°N)	Longitude (°W)	Temps UTC Mer. 22/12/1999	Profondeur (km)
Ain Témouchent, Algérie	CRAAG	35.25	1.3	17h 36mn 53,00s	10*
	USGS	35.321	1.281	17h 36mn 56,24s	10
	EMSC	35.23	1.39	17h 36mn 57,00s	10.60
	IGN	35.2290	1.3915	17h 36mn 57,05s	6
	HARV-CMT	35.34	1.45	17h 36mn 56,2s	15
	SED	35.17	1.22	-	12

* une faible profondeur (4 km) a été déterminée par Yelles-Chaouche et al. (2004).

Les catalogues sismiques exploités sont comme suit :

- CRAAG : Centre de Recherche en Astronomie Astrophysique et Géophysique, Algérie.
- USGS : United States Geological Survey
- EMSC: European-Mediterranean Seismological Centre
- HARV-CMT : Harvard, Centroid Moment Tensor
- SED : Service Sismologique Suisse
- IGN : Instituto Geográfico Nacional, Espagne

Il est à noter que pour cet évènement sismique d'Ain Témouchent 1999, l'intervention post-sismique, grâce au réseau algérien de surveillance et d'alerte sismique REALSAS¹ et d'autres stations sismologiques portables du CRAAG, a permis de suivre l'activité microsismique de cette région épiscopentrale. En fait, ces réseaux de surveillance ont révélé l'occurrence d'une trentaine de répliques sismiques sur une période de quatre semaines ; voir tableau (IV.2) et figure (IV.6).

¹ Premier réseau sismologique de surveillance sismique, installé en 1985 (en voie de cessation d'activité en raison de l'obsolescence du matériel). À partir de 2006 un nouveau réseau numérique (ADSN : Algerian Digital Seismic Network) a été installé.

IV.3 Précurseurs séismo-ionosphériques liés à l'évènement tellurique d'Ain Témouchent

Afin de valider notre prototype sismo-géodésique lié à la prévision des évènements sismiques de magnitude notable ($M \geq 5$), nous avons adopté le principe de déphasage de la propagation d'ondes électromagnétiques à travers le couple d'interfaces lithosphère-ionosphère. Notons que la détermination du délai de temps de transition entre la source et les membranes repose sur l'enregistrement différé de la trace séismo-ionosphérique (GNSS) qui conserve toute variation du champ électromagnétique et celle du séismogramme connue par l'anomalie du mouvement tellurique. Compte tenu du présent postulat et la possibilité d'acquérir des données géodésiques relatives aux précurseurs séismo-ionosphériques, il devient ainsi possible d'établir un dispositif de discrétisation de l'évolution chronique du TEC-ionosphérique pour une période d'observation suffisante à la détection d'anomalies ionosphériques précédant le choc principal. Pour illustrer cette approche, il serait donc utile de mieux discerner la période d'observation qui couvre plusieurs mois précédant le séisme envisagé, tel que celui d'Ain Témouchent de magnitude ($M_w = 5.7$) survenu le 22 décembre 1999 ; à l'instant 17h 37mn TU. Cet évènement est bien documenté par les données géodésiques (IGS) et sismologiques (CRAAG) à l'échelle méditerranéenne. Rappelons que la période d'étude couvre effectivement 139 jours répartis respectivement entre le 15 septembre de l'année 1999 et le premier février de l'an 2000. Après traitement de ces données et leur modélisation nous avons pu repérer les principaux précurseurs sismiques se prononçant avec des délais notables de plusieurs jours avant l'évènement principal du 22.12.1999 ; voir (Fig. IV.3 et Fig. IV.4). Le traitement géodésique des données GPS/GNSS, enregistrées dans des fichiers d'observation et de navigation sous le format d'échange (RINEX), nous ont permis d'effectuer malgré le peu de ces données, une analyse concluante du signal séismo-ionosphérique de l'évènement d'Ain Témouchent. Ce dernier montre lisiblement l'endroit des singularités notables au niveau du signal GPS_TEC ; confirmant ainsi l'intrication ou la superposition d'activité sismique sur l'empreinte principale des variations électromagnétiques enregistrées par les précurseurs sismiques. Cette approche semble déterminante quant-aux interprétations géophysiques ; en relation avec la propagation d'ondes électromagnétiques. On constate cependant que les irrégularités du TEC ionosphérique se caractérisent par des variations notables du taux ou densité électronique sous l'excitation de vibrations telluriques (sismiques) pour atteindre le pic 81 TECU à la date du 11 novembre 1999 à midi heure, voir la figure (IV.3).

Variation du TEC : Pré-, Co- et Post sismique (Mw 5.7, 22.12.1999, Ain Témouchent-Algérie)

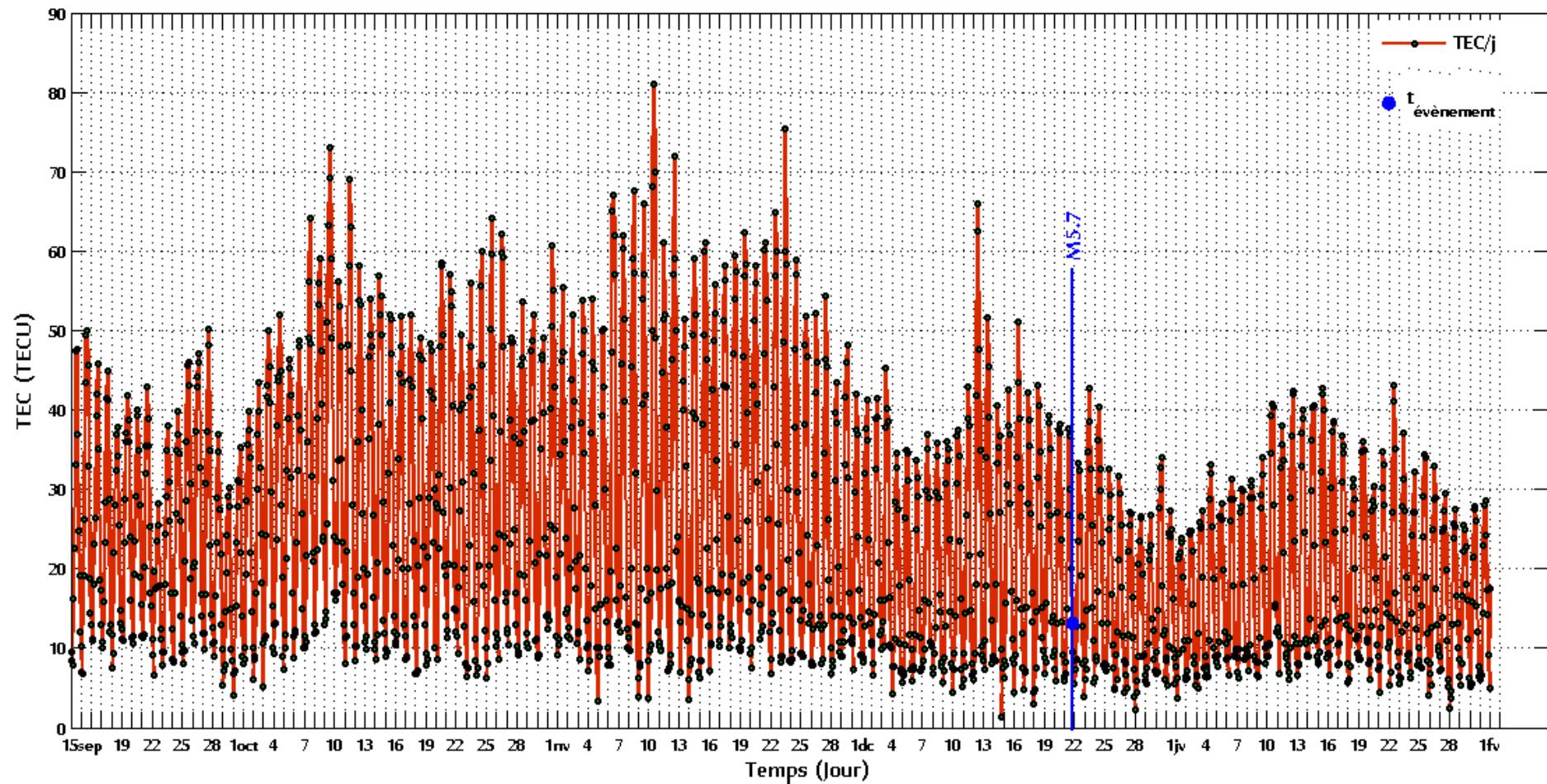


Figure IV.3 : Trace d'enregistrement chronique du TEC (15 sep. 1999 – 01 fév. 2000) relative aux précurseurs sismiques de l'évènement tellurique d'Ain Témouchent (M5.7, 22.12.1999). La ligne verticale bleue désigne l'instant t_0 du séisme.

En conséquence, les variations d'amplitudes du TEC ionosphérique (Fig. IV.3) traduisent des modifications profondes de la trace du mouvement tellurique occasionné par l'évènement sismique étudié en cette zone vulnérable aux évènements notables. Le tremblement de terre d'Ain Témouchent est d'une magnitude modérée (M5.7) qui s'est produit à une faible profondeur (4 Km), répercute manifestement sur les changements de l'état de la couche ionosphérique ; associé à des passages brusques marquant des journées excitées en densité électronique. Ces perturbations ionosphériques marquantes, mentionnées sur le signal GPS_TEC, reliées vraisemblablement à une dynamique structurale peu profonde, focalisée au niveau d'une croûte lithosphérique assez mince.

Parmi les résultats obtenus, nous mentionnons la conjoncture de prédire les évènements sismiques pouvant se manifester au niveau d'une province géographique, de plusieurs jours, bien avant le déclenchement du choc principal (séisme). Cette technique qu'on propose, pourra constituer une démarche analytique dans le processus de la surveillance des catastrophes naturelles à la faveur des observatoires géodésiques, géophysiques et géodynamiques en zones sismotectoniques. Dans la présente étude, la région occidentale du littoral oranais, les observations effectuées durant la période du 15 septembre 1999 au 01 février 2000, ont mis l'accent sur des changements significatifs au niveau de la variante TEC à l'échelle régionale (Fig. IV.3). Ainsi, l'empreinte d'un précurseur séismo-ionosphérique de plusieurs jours est lisible avant l'avènement du séisme d'Ain Témouchent (M5.7, 22 décembre 1999). De ce fait, on vient de certifier que grâce à la cartographie ionosphérique (TEC-Mapping) assistée par l'outil informatique (programmes sous Matlab), nous avons arrêté une configuration propre à la distribution bidimensionnelle des anomalies séismo-ionosphériques au niveau de la province géographique étudiée.

IV.3.1 Rapport de la réponse du signal trans-ionosphérique et interprétation séismo-ionosphérique

De façon générale le nombre des répliques séismiques enregistrées lors des observations géophysique et géodésique montrent que l'amorçage d'un évènement notable suivant une trajectoire rectiligne ; depuis la lithosphère jusqu'à la membrane de l'ionosphère reste bien conservé. En effet, notre étude sur l'évènement principal d'Ain Témouchent du 22.12.1999 ($M_w=5.7$) est déterminant quant à l'inventaire du nombre des précurseurs séismo-ionosphériques qui résulte de notre approche géodésique.

L'interprétation du tableau (IV.2), à référence de l'extrait séismologique du GRAAG (2000), qui révèle l'existence de plusieurs répliques séismiques regroupant un nombre équivalent à celui des précurseurs séismo-ionosphériques, discernées par notre dispositif (décrit en détail dans le chapitre précédent). L'étude des principaux précurseurs séismo-ionosphériques sont comptabilisés en durée de plusieurs jours à des intervalles distincts, établissant ainsi la même remarque par rapport aux enregistrements des répliques séismiques données par le GRAAG. De ce constat nous remarquons qu'il existe une remarquable corrélation entre les délais des précurseurs séismo-ionosphériques et leurs répliques séismiques, mais avec des échelles chroniques différentes (unités de temps).

Dans cette phase d'exercice, en domaine de la prévision sismique, les données instrumentales géodésique et géophysique nous ont permis d'accéder à la modélisation des délais de phases. Les pointées en temps d'arrivée des signaux précurseurs et les magnitudes correspondantes sont en parfaite adéquation avec les dates d'enregistrement des répliques séismiques (Magnitude proche de 4) ; voir la figure (IV.5). Notant que les arrivées de ces signaux pré-séismiques représentent les moments enregistrées par rapport à t_0 , instant initial de déclenchement de l'évènement d'Ain Témouchent ($M5.7$) du 22 décembre 1999 à 18h 36mn 53,00s TL.

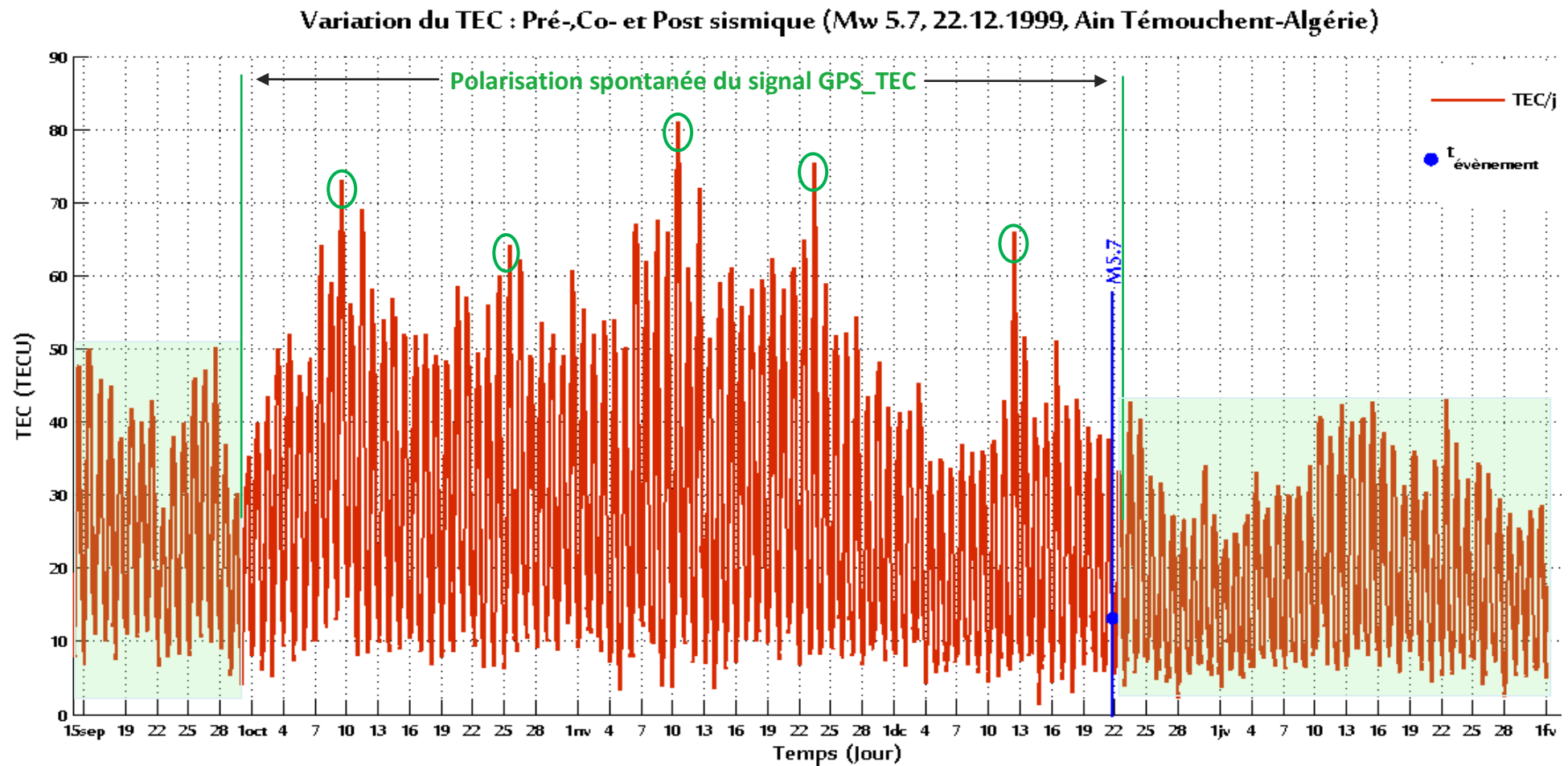


Figure IV.4 : Taux de variation du contenu en électrons libres : Avant, Pendant et Après le séisme d'Ain Témouchent 22 Déc. 1999 (M5.7). Les marques elliptiques et les limites en verts, représentent respectivement les variations anormales du TEC (pics) et la polarisation du signal GPS_TEC.

Dans la pratique de cette approche prévisionnelle, nous avons arrêté cinq principaux précurseurs séismo-ionosphériques exprimant de fortes amplitudes TEC ionosphérique (Fig. IV.4), réparties sur une durée d'observation qui dépasse les 2.5 mois de la phase de polarisation du signal GPS_TEC (déboulement d'amplitude TEC).

D'autre part, nous avons envisagé de saisir les principales répliques sismiques, ayant des magnitudes proches de 4, signalées dans le tableau d'extrait du CRAAG (Tab. IV.2), qui sont également de même nombre en anomalies ionosphériques pré-séismiques. Ce constat semble être utile à la modélisation des délais des précurseurs en fonction du nombre d'évènements sismiques à des magnitudes données. Cette modélisation intervient en domaine de la prévision sismique grâce aux données mixtes géodésique et géophysique.

Ainsi, la modélisation de la prévision sismique relative à cette évènement tellurique, devient possible par l'analyse des données sismo-géodésiques et par l'interprétation de la ligne de régression inverse (Fig. IV.5) relative à la dynamique des magnitudes sismiques en fonction des délais cumulés ; donnant en conséquence deux relations algébriques vraisemblablement corrélable. En conséquence, pour un même séisme, la modélisation des principaux précurseurs séismo-ionosphériques et leurs répliques démontre que les délais en temps de ces précurseurs (techniques spatiales de surveillance ionosphérique) avancent d'un taux important de ceux liés aux répliques (techniques terrestres de surveillance sismique).

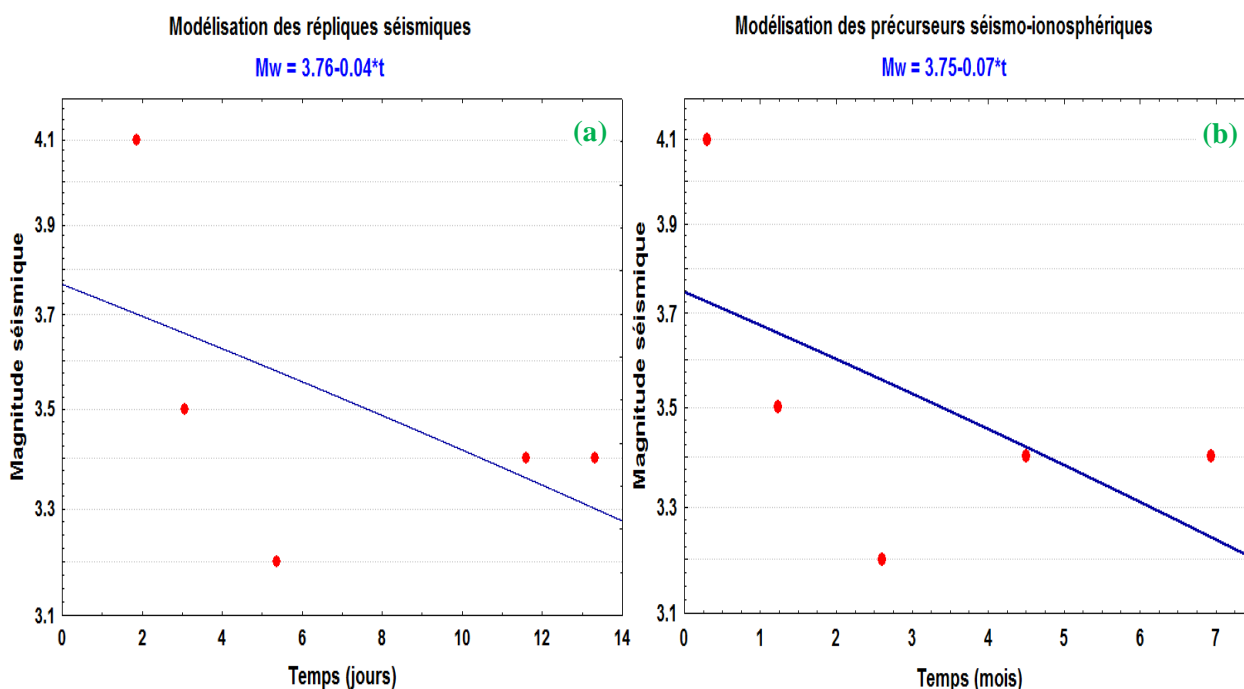


Figure IV.5 : Corrélation entre (a) les mesures terrestres (sismogrammes), et (b) les mesures de la géodésie spatiale (satellites GPS).

Tableau IV.2

Inventaire des principales répliques séismiques (évènement d'Ain Témouchent, M5.7, 22.12.1999), source: CRAAG

N°	Date (jj.mm.aaaa)	Heure Origine	Latitude (Nord)	Longitude (Ouest)	Prof. (km)	Magnitude
01	24.12.1999	14h 25mn 48s	35° 38'	01° 16'	06.00	4.1
02	25.12.1999	19h 24mn 18s	35° 26'	01° 21'	10.47	3.5
03	26.12.1999	11h 47mn 42s	35° 10'	01° 19'	09.03	2.8
04	28.12.1999	02h 17mn 24s	35° 15'	01° 34'	11.86	3.2
05	28.12.1999	19h 45mn 53s	35° 15'	01° 16'	07.69	2.3
06	29.12.1999	16h 40mn 19s	35° 26'	01° 29'	14.35	2.3
07	30.12.1999	00h 50mn 18s	35° 31'	01° 33'	15.34	2.2
08	30.12.1999	01h 21mn 18s	35° 29'	01° 25'	05.99	2.0
09	30.12.1999	20h 15mn 47s	35° 29'	01° 21'	11.42	2.2
10	30.12.1999	22h 43mn 19s	35° 30'	01° 27'	02.90	2.1
11	30.12.1999	23h 56mn 57s	35° 25'	01° 30'	09.48	2.3
12	31.12.1999	01h 20mn 27s	35° 27'	01° 24'	00.56	2.4
13	31.12.1999	08h 19mn 00s	35° 30'	01° 28'	15.56	2.0
14	31.12.1999	18h 03mn 48s	35° 22'	01° 24'	13.53	2.2
15	01.01.2000	03h 35mn 46s	35° 31'	01° 30'	05.95	1.7
16	01.01.2000	11h 55mn 35s	35° 28'	01° 27'	13.81	2.1
17	01.01.2000	15h 57mn 28s	35° 41'	01° 25'	05.41	2.2
18	01.01.2000	21h 05mn 21s	35° 19'	01° 18'	06.01	2.3
19	02.01.2000	07h 05mn 38s	35° 21'	01° 14'	06.00	2.5
20	02.01.2000	16h 53mn 08s	35° 26'	01° 10'	05.87	2.2
21	03.01.2000	07h 50mn 04s	35° 26'	01° 29'	10.49	3.4
22	03.01.2000	23h 35mn 56s	35° 26'	01° 21'	02.30	1.7
23	03.01.2000	23h 46mn 02s	35° 23'	01° 22'	11.91	2.4
24	04.01.2000	18h 09mn 45s	35° 28'	01° 22'	05.51	2.2
25	05.01.2000	01h 13mn 58s	35° 27'	01° 29'	05.85	3.4
26	06.01.2000	07h 10mn 26s	35° 26'	01° 27'	03.98	2.2
27	06.01.2000	11h 56mn 04s	35° 24'	01° 28'	07.93	3.1
28	09.01.2000	15h 33mn 54s	35° 26'	01° 28'	05.24	2.0
29	10.01.2000	22h 37mn 57s	35° 26'	01° 26'	05.74	1.6
30	19.01.2000	01h 54mn 26s	35° 26'	01° 29'	05.33	2.0
31	19.01.2000	13h 54mn 01s	35° 41'	01° 14'	04.60	2.0
32	23.01.2000	01h 01mn 35s	35° 22'	01° 22'	00.22	2.2
33	23.01.2000	14h 57mn 09s	35° 38'	01° 10'	05.41	2.0

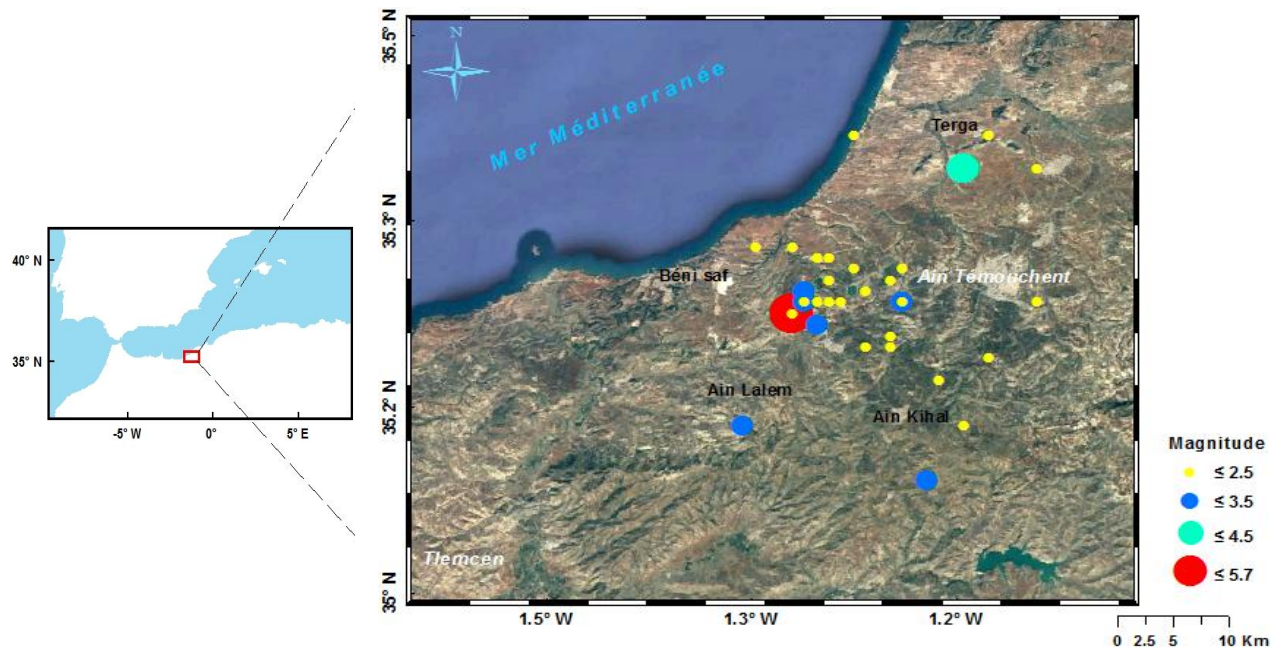


Figure IV.6 : Distribution spatiale des répliques sismiques liées au tremblement de terre d'Ain Témouchent (22.12.1999, $M_w = 5.7$). Le cercle rouge indique l'évènement principal.

Conclusion

Dans cette région littorale de l'Oranais, les observations géodésiques livrées par les données GPS/GNSS du réseau permanent IGS ont permis d'étudier la réponse de la membrane ionosphérique à l'évènement sismique de Ain Témouchent ; survenu le 22 décembre 1999 de magnitude ($M_w = 5.7$). Le chargement des données GPS_TEC dans notre programme 'Matlab/Tec-Mapping', parallèlement à l'échantillonnage des valeurs extrêmes d'amplitudes du signal TEC, nous ont permis de constater l'existence d'une parenté entre les répliques sismiques de la phase post-sismique et les émergences, indexées comme impétus du signal séismo-ionosphérique, enregistrées durant la période : mi-septembre 1999 et début de mois de février 2000. En effet, lors de cette période d'observation, plusieurs aléas se sont empilés avec l'activité sismique de l'évènement principal. Ces perturbations montrent clairement l'aspect d'intrication de la coda-TEC matérialisant ainsi le phénomène de polarisation tellurique ; emportée par les précurseurs sismiques. A cette portée, on vient de souligner un état d'art important lié à l'aspect de la prévision sismique des évènements notables (échelle régionale).

Parmi les résultats acquis, nous évoquons l'occurrence temporelle d'avènements des séismes sur terre, cernée en quelques jours seulement, alors qu'elle soit dilatée d'une durée de quelques semaines bien avant la secousse principale ; au niveau de la couche ionosphérique F2. Par ailleurs, d'autres résultats intéressent la modélisation corrélative entre les pointées des répliques sismiques ; déduites des investigations séismologiques et les délais de temps correspondants aux impétus des précurseurs séismo-ionosphériques livrées par le signal GPS_TEC. Cette initiative vient de soutenir l'hypothèse d'un attachement formel entre la réponse du signal TEC ionosphérique et le délai, en temps spécifique des précurseurs sismiques (Séismologie).

Cette approche prévisionnelle des évènements telluriques aura l'avantage de contribuer manifestement à l'exploitation de l'état dynamique du risque sismique d'une région donnée. Cette dernière semble être en mesure de fournir, par le biais du spectre d'ondes électromagnétiques, la traçabilité des composantes telluriques superposées au sein du signal géodésique GPS ; tout en confirmant la vraisemblance des réponses dues au couplage entre enveloppes lithosphérique ionosphérique assurées par la couche ionosphérique ionisée F2.

IV.4 Activité sismique de l'Oranais, 06 juin 2008 ($M_w = 5.5$)

Cette partie a fait l'objet d'une publication scientifique internationale.

“*Tachema, A., Nadji, A., Contribution of ionospheric TEC anomalies to detecting the seismic precursors related to the 2008 Oran-Algeria event*, *Advances in Space Research* (2020), doi: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.03.007>.”

En cette zone littorale de l'Algérie nord occidentale des chaînes Maghrebides, le contexte structural et orogénique devient complexe depuis les phases paroxysmales du miocène moyen à miocène supérieur. Durant le cénozoïque, il existait deux systèmes orogéniques distincts : le Tell marginal et les zones atlasiques sub-telliennes, où se manifestent actuellement d'importants séismes. En effet, la marge littorale est constituée d'une large bande qui s'étend sur une centaine de kilomètres au nord du Tell algérien ; formant ainsi d'importants massifs côtiers qui délimitent la province nord occidentale de l'Algérie. Le craton africain se trouve coincé au voisinage de la limite méridionale du bassin méditerranéen en forme comprimée (Nadji, 2010). Cette marge littorale est constituée par des relais de massifs côtiers qui s'étendent de l'Ouest en Est jusqu'à la vallée du Chelif, formant ainsi plusieurs segments structuraux majeurs sous forme de reliefs atlasiques telliens. La caractéristique principale de cette province se matérialise par les manifestations sismiques enregistrées sur plusieurs siècles d'observations sismiques.

Parmi les principaux événements affectant cette région, nous évoquerons respectivement les séismes -modérés à très forts- suivants (López-Marinás et Salord, 1990; Bezzeghoud et al., 1995; Yelles-Chaouche et al., 2006; Belabbès et al., 2009; Amir et al., 2012 ; Storchak et al., 2013, 2015; Ayadi et Bezzeghoud, 2015; ISC 2019; Di Giacomo et al., 2018; Buforn et al., 2019) :

Les séismes historiques de la ville d'Oran :

- 1789 (intensité estimée I_0 VII-VIII) ;
- 1790 (magnitude estimée $M = 6.0-6.5$, I_0 IX-X) ;
- 1900 (I_0 VII) ;
- 1959 (I_0 VII).

Et ceux survenus plus récemment en :

- 1954 Orléansville $M = 6.7$;
- 1980 El Asnam $M = 7.3$;
- 1994 Mascara $M = 5.7$;
- 1999 Ain Témouchent $M = 5.7$;
- 2008 Oran $M = 5.5$ (Tableau IV.3, Figures IV.7 et IV.8).

Sur la base des données sismologiques fournies par le consortium IRIS (Incorporated Research Institutions for Seismology: <http://ds.iris.edu/ieib/>), le catalogue de l'Institut d'Etudes Géologiques des États-Unis USGS (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>) et corroborée par des études plus récentes (voir par exemple : Beldjoudi, 2011; Kherroubi, 2011; Chimouni et al., 2018; Benbakhti et al., 2018) reflètent l'activité sismique globale qu'a connue la région d'Oran au cours de l'été 2008.

Il est à noter que les enregistrements sismologiques contemporains au niveau de cette zone, limitée en coordonnées géographiques ($-1.210 \leq \lambda \leq 1.415$; $35.887 \leq \varphi \leq 36.318$), indiquent la présence d'une activité sismique légère à modérée ; où on compte 09 séismes de magnitudes ($4.0 \leq Mag \leq 5.9$). Voir le tableau ci-dessous d'inventaire des répliques sismiques de l'évènement d'Oran 2008.

Tableau IV.3

Sismicité de l'évènement d'Oran avec ses principales répliques.

Séisme	Latitude (°N)	Longitude (°W)	Temps UTC Ven. 06 Juin 2008	Magnitude (M_w)	Profondeur (km)
Oran, Algérie	35.883	0.658	20h 02mn 56,0s	5.5	4.0
	35.80	0.56	21h 10mn 40s	4.5	3.64
	35.63	0.66	21h 18mn 21s	3.4	4.44
	35.78	0.42	22h 48mn 24s	3.9	0.1

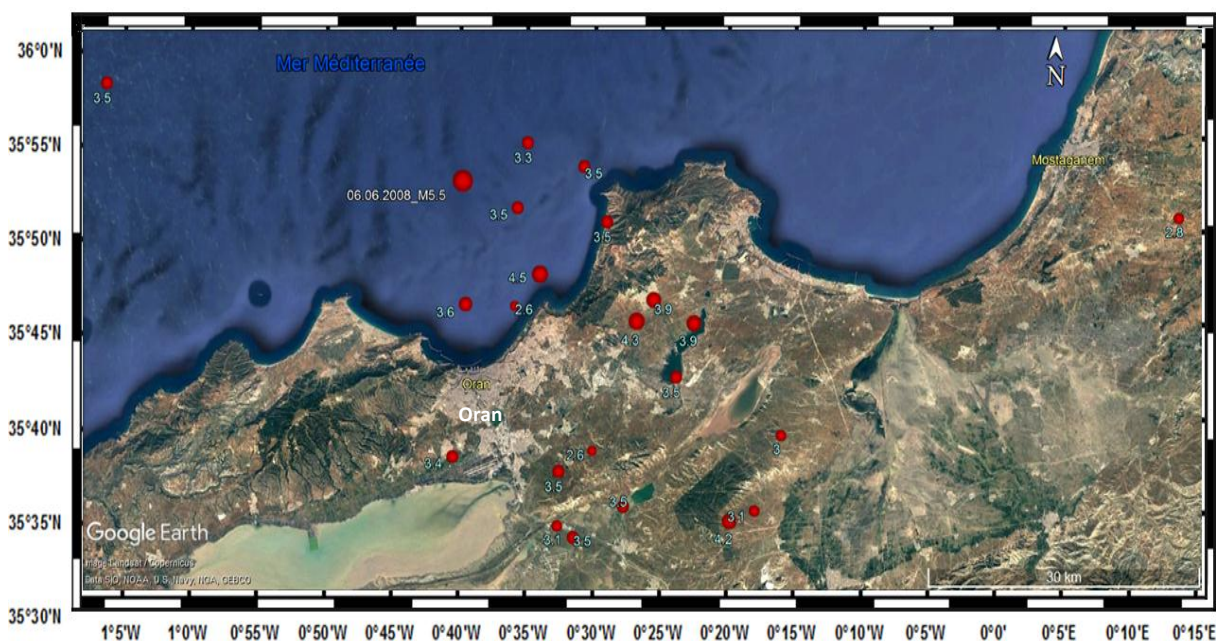


Figure IV.7 : Localisation et distribution des répliques, environ 60 km de long, relatives à l'évènement d'Oran (06.06.2008, $M_w = 5.5$).

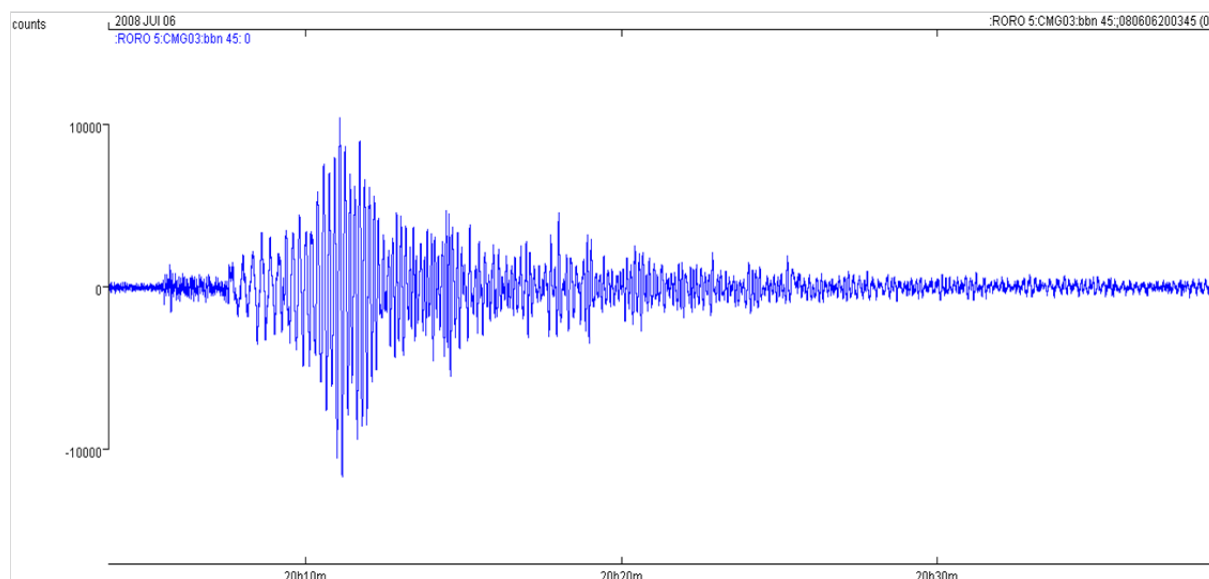


Figure IV.8 : Trace du signal sismique relatif à l'évènement principal $M_w = 5.5$, temps origine : 20h 02mn 56,0s (source : donnée sismologie INGV).

IV.4.1 Mécanismes focaux de l'évènement d'Oran

L'analyse du mécanisme focal du séisme d'Oran : 06 juin 2008 ($M_w = 5.5$) donnée par le réseau de surveillance sismique universel : HARV², USGS³, INGV⁴ et ETHZ⁵ (Fig. IV.9) discerne l'existence d'une source sismique de taille moyenne ($M_w = 5.5$) dont l'interprétation du diagramme mecFOC met en évidence la nature compressive d'un accident tectonique profond (30 km) qui s'accorde parfaitement avec le système de faille de chevauchement directionnel NE-SW (Nadji, 2010; Kherroubi, 2011).

En se référant au catalogue espagnol de l'Institut Géographique National, IGN⁶ (<http://www.ign.es/web/ign/portal/sis-catalogo-terremotos>), ce mécanisme se présente sur la frange littorale de l'Oranais près de 20 km de la côte d'Oran (Fig. IV.9).

Ces mécanismes focaux témoignent le raccourcissement régional de la ride d'Alboran et la marge littorale de l'Oranais selon l'axe (NNW–SSE) d'azimut N140° E. (Bezzeghoud et al., 1996; Stich et al., 2003, 2006; Nadji, 2010; Beldjoudi et al., 2011; Beldjoudi, 2017).

² Harvard University Global Centroid Moment Tensor (www.globalcmt.org/CMTsearch.html)

³ United States Geological Survey

⁴ Italian Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

⁵ Swiss Eidgenössische Technische Hochschule Zürich

⁶ Instituto Geográfico Nacional

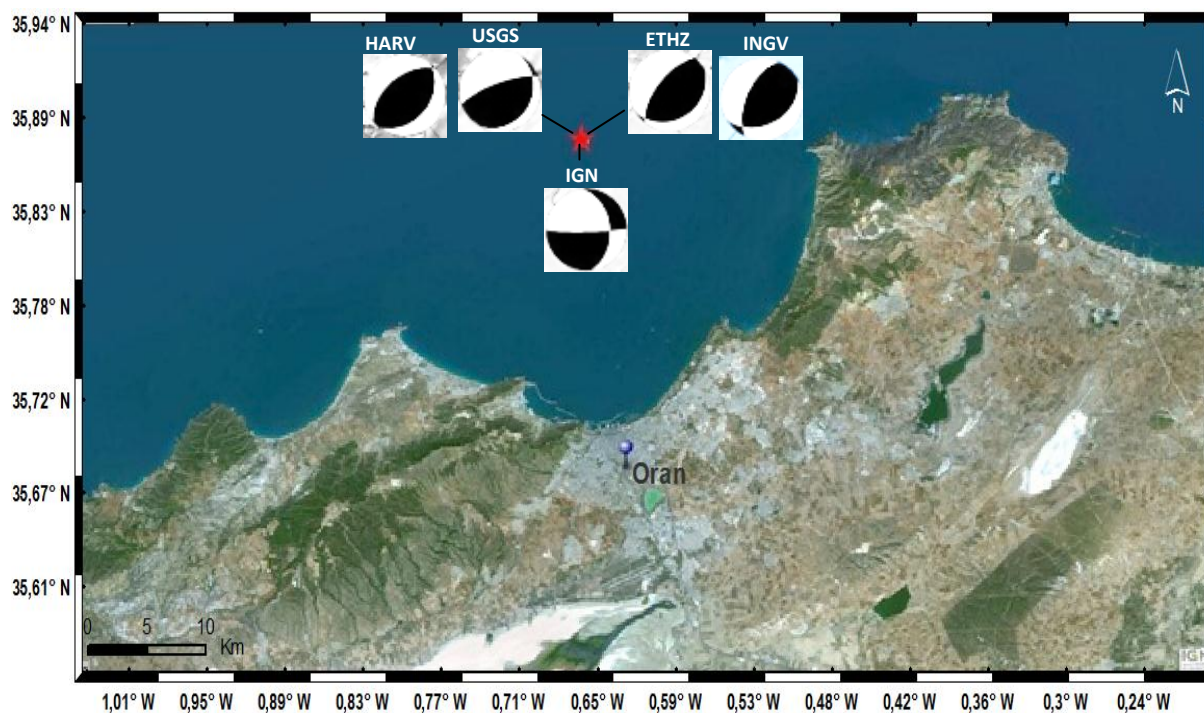


Figure IV.9 : Carte épiscopentrale sismique et mécanismes focaux relatifs à l'évènement d'Oran 2008, le foyer principal est en rouge.

IV.4.2 TEC-Mapping

Rappelant que notre approche, étude des précurseurs ionosphériques liés aux tremblements de terre, est fondée sur le collecte et le traitement géodésique des données d'observation et de navigation sous format RINEX dérivées à partir d'un réseau de stations IGS/GPS permanentes. Il est aussi nécessaire de rappeler que les phases de calcul des coordonnées des satellites GPS et des points ionosphériques (IPP, intersection du signal satellite/récepteur avec la couche ionosphérique) ainsi que l'ajustement et l'estimation des paramètres (à savoir : calcul des coefficients des harmoniques sphériques, biais différentiels de code liés aux satellites et aux récepteurs GPS) par la méthode des moindres carrés, sont primordiales pour le calcul du TEC (cartographie ionosphérique).

Dans le but de discerner d'éventuelles anomalies ionosphériques pré-séismiques relatives à l'activité tellurique, affectant l'Oranais le 06 juin 2008 ($M_w = 5.5$), nous avons traité les données d'une soixantaine de stations issues du réseau GNSS, réparties sur la baie méditerranéenne (Fig. IV.10).

En fait, les stations GNSS permanentes africaines se caractérisent souvent par une déficience de réception régulière de données qui peut atteindre parfois dix jours d'intervalle. Il est à noter que le réseau GNSS permanent algérien est doté de six stations opérationnelles et observent en permanence 24/24 et 7/7 et enregistrent des sessions de 24 heures cadencées à 30 secondes. Ces stations géodésiques, inaccessibles au public, sont gérées par l'Institut National de Cartographie et de Télédétection (INCT) : trois stations déployées tout au long et près du littoral algérien, à savoir Alger (DZAL), Oran (DZOR), Constantine (DZCO) et les trois autres stations disséminées dans le grand sud algérien : Ouargla (OGLA), Bechar (BECH) et Tindouf (TIND).

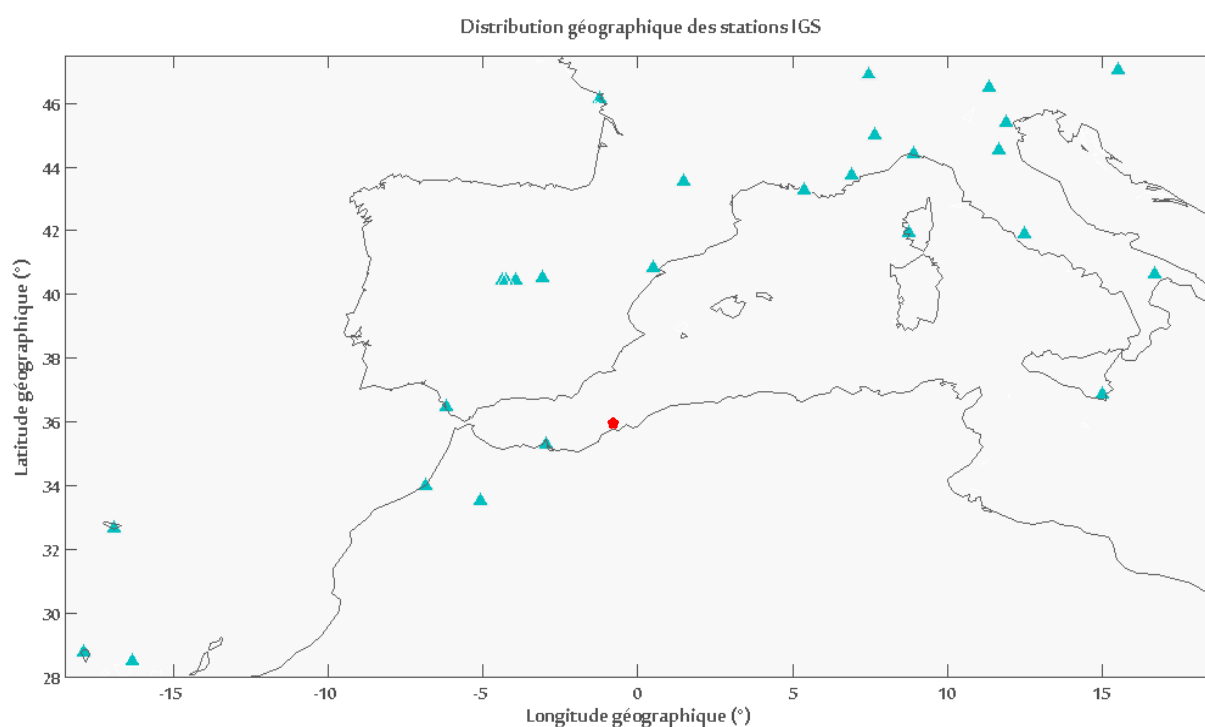
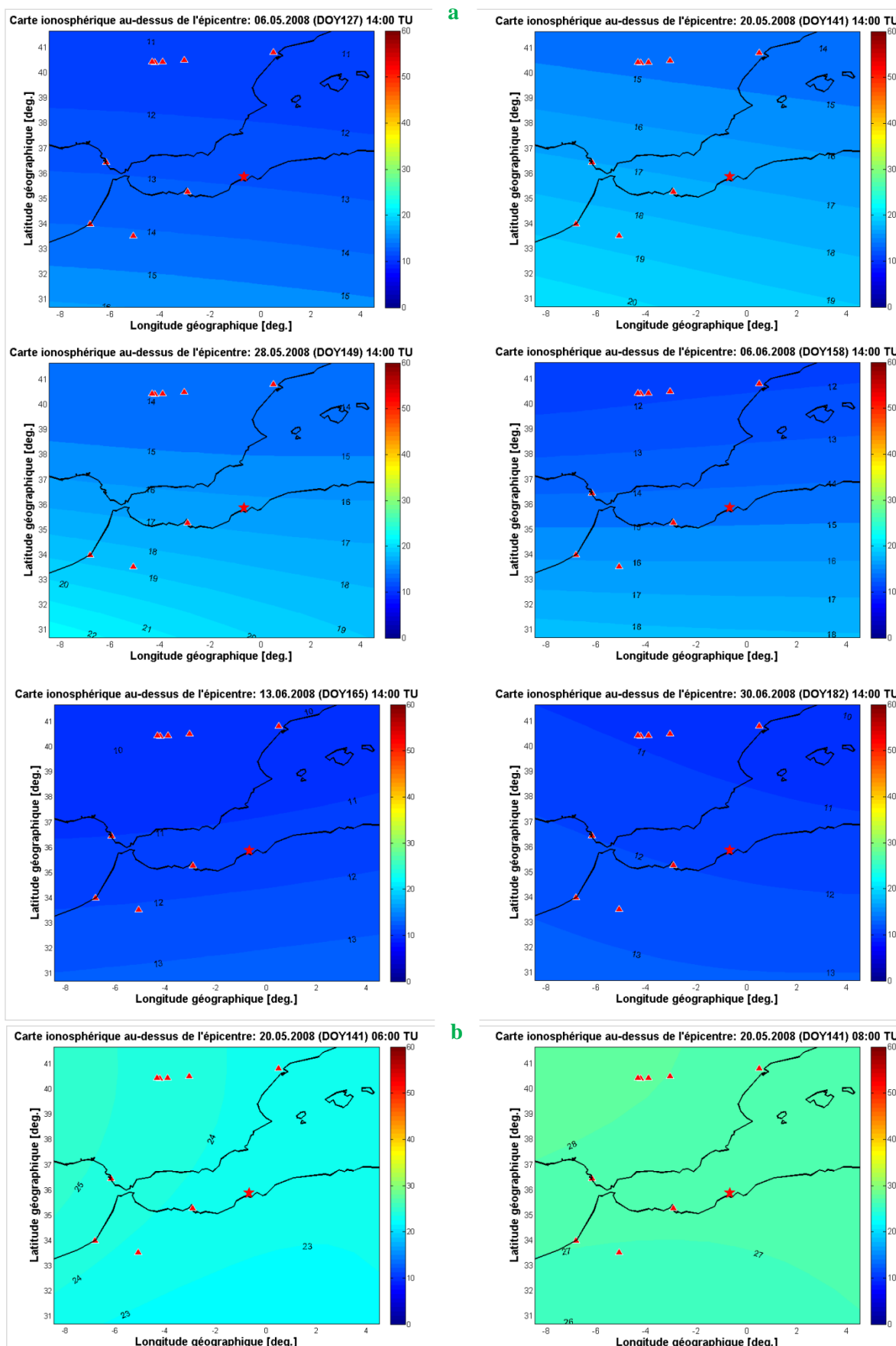


Figure IV.10 : Localisation des stations GNSS méditerranéennes permanentes, près de l'épicentre.

Sur la base de l'organigramme (Fig. III.3, cf. chap. III, § III.2.2), les cartes thématiques ainsi réalisées (Fig. IV.11) illustrent clairement les variations d'importantes anomalies ionosphériques enregistrées au-dessus de la zone épacentrale, relatives au séisme d'Oran 2008. Ces cartes TEC-Mapping constituent donc un support fondamental de contrôle de l'activité ionosphérique et de surveillance d'activité sismique.



IV.5 Résultats d'analyse spectrale de la membrane ionosphérique

La problématique ici envisagée, traitant de la prévision sismique, repose principalement sur la lecture minutieuse des réponses spectrales du TEC ionosphérique et du champ magnétique enregistrés en vue de détecter l'arrivée d'impétus ionosphériques ; relatives aux précurseurs séismo-ionosphériques de l'évènement principal (Oran, 06 juin 2008, $M_w = 5.5$). Notons que le spectre ionosphérique se compose de plusieurs variantes telles que : l'activité solaire (éruption et vent solaire) et l'activité géomagnétique (variation d'intensité du champ magnétique terrestre et tempêtes magnétiques).

Lors d'une comparaison spectrale entre l'exercice d'un évènement sismique sur l'enregistrement de la couche ionosphérique F2 et le cas ordinaire des traces d'ionogramme (absence d'évènement sismique), on constate un phénomène particulier qui affecte l'enregistrement du TEC ionosphérique juste avant (de plusieurs jours à quelques heures : Heki et Enomoto, 2013; Ibanga, 2018; Lim, 2018; Sotomayor-Beltran, 2018; Davidenko et Pulnits, 2019; De Santis et al., 2019; Guo et al., 2019; Sharma et Raju, 2019; Tachema et Nadji, 2019) et pendant le séisme. Ce phénomène semble être dû à une charge excessive en densité électronique de la couche F2, qu'on peut l'indexer par une polarisation spontanée du TEC durant l'activité sismique étudiée. A savoir, qu'une fois l'énergie du tremblement de terre sera dissipée, la coda du TEC ionosphérique reprend ses conditions normales de son enregistrement.

En effet, dans une première situation qui s'intéresse à l'état de calcul et d'enregistrement de la variante 'TEC' avec présence d'évènement sismique (cas du séisme d'Oran 2008, $M_w = 5.5$), on constate des perturbations notables, durant la période d'observation : du 01 mai au 01 juillet 2008, amplifiant le signal de la couche ionosphérique qui précèdent le temps origine de l'évènement principal (Fig. IV.14). Par contre, dans la seconde situation (sans activité sismique : du 01 mai au 01 juillet 2005) où le signal GPS_TEC avec ses deux composantes électrique et magnétique se comporte en harmonie sur le long de cette période de comparaison (Fig. IV.12).

De cet effet, nous proposons une démarche analytique qui peut intervenir dans l'étude de la prévision sismique. Partant des étapes successives ; à savoir l'acquisition des données RINEX, la représentation du signal GPS_TEC en diagramme chronique $f(t)$ et du discernement du champ (polarisation spontanée du TEC) relatif à la période co-séismique, la détection des impétus des précurseurs sismiques sera possible (Fig. IV.14).

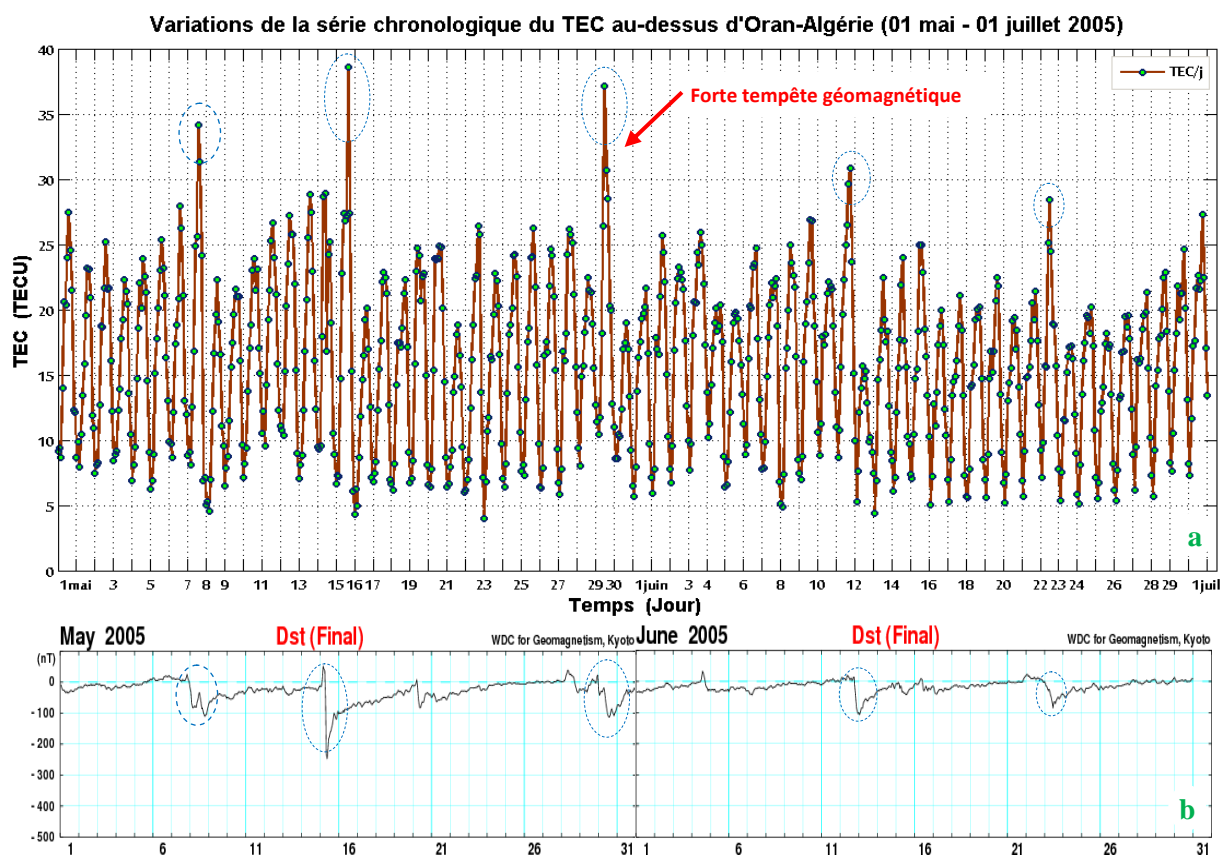


Figure IV.12: Variations de la série chronologique du TEC au-dessus de la ville d'Oran (Séisme d'Oran: $35.883^\circ N$, $0.658^\circ W$) sous (a) une activité sismique calme et (b) une activité géomagnétique agitée.

Concernant ce diagramme où il n'existe aucune activité sismique, le signal GPS_TEC, avec ses deux composantes électrique et magnétique, se comporte en conformité avec les perturbations en électricité et en magnétisme sur le long de la période de comparaison de nos observations (01 mai – 01 juillet 2005). Les observations sismotectonique sur la marge Nord Occidentale de l'Algérie indique que cette zone était relativement calme à l'exception d'un seul évènement qui s'est manifesté durant cette période. Par ailleurs, de fortes tempêtes géomagnétiques, dues aux vents solaires extrêmes ($-176.5 < Dst_{\text{moy}} < 42.5$, $\sum Kp=18$, $Ap=15.5$), se sont proclamées durant cette période (Fig. IV.12) :

- 08 mai 2005 : $Dst = -110$ nT, $Kp = 8+$
- 15 mai 2005 : $Dst = -247$ nT, $Kp = 8+$
- 30 mai 2005 : $Dst = -113$ nT, $Kp = 8-$ (nT : nano Tesla). cf. Annexe C.

Ainsi, nous venons de confirmer que les modifications évidentes du TEC ionosphérique (Fig. IV.12) ne concernent que les moments où la terre a connue de fortes tempêtes géomagnétiques.

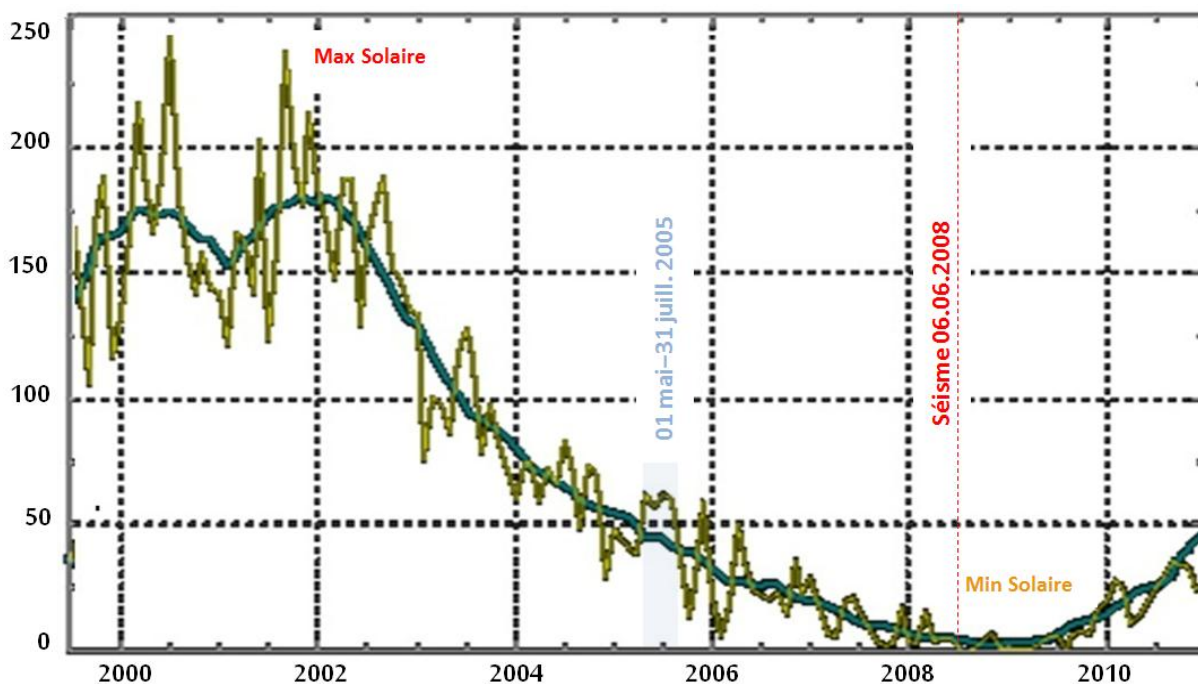


Figure IV.13 : Les taches solaires et le cycle d'activité solaire durant la période 2000-2010 (sidc.oma.be/silso/home). La ligne rouge en pointillée indique le jour de l'évènement sismique étudié.

Le graphique ci-dessus présente l'évolution mensuelle (23^{ème} cycle solaire : 2000-2010), du nombre de taches solaires (visibles vu qu'elles forment des zones plus sombres à la surface du soleil). Ces taches correspondent à d'énormes conglomerats de concentration de flux magnétiques (énergie) et à une activité solaire magnétique élevée qui suit un changement périodique connu sous le nom de cycle solaire de 11 ans (Solanki et al., 2004; Usoskin et al., 2007; Potgieter, 2013; Hathaway, 2015; Kopp et al., 2016; Ryutova 2018).

Ce diagramme (Fig. IV.13) présente le détail d'un cycle solaire complet qui inclut les deux périodes d'études : année 2005 (calme activité sismique et forte activité magnétique) ainsi que l'année 2008 (forte activité sismique et faible activité magnétique), qui correspond à une phase minimale de l'activité solaire dont le nombre de taches solaires varié de 3 à 40.

À la lumière de ce constat, nous venons de confirmer que les variations anomaliques du TEC ionosphérique, précèdent d'une quinzaine à une vingtaine de jours la date d'évènement tellurique affectant Oran le 06 juin 2008 (Fig. IV.14). En contexte structural, on doit noter que l'effet d'une déformation crustale est dû à la cinématique des microplaques tectoniques de la marge occidentale de l'Algérie. La nature du mouvement principal de cette déformation est une distension subverticale suivie d'un second mouvement décrochant inverse qui s'est développé durant l'évènement sismique. Quant au contexte géodésique, on doit noter que les variations

notables du contenu électronique total de la couche ionosphérique sont la conséquence de l'excitation de la membrane F2 (située à 350 km d'altitude avec un maximum d'ionisation, connue sous le nom Single Layer Model : Norsuzila et al., 2008; Tachema, 2012; Huang et Yuan, 2013; Martin et al., 2015; Malins et al., 2018; Xiang et Gao, 2019) suite aux vibrations lithosphériques évènementielles. Cette corrélation entre les séismes et les perturbations de la haute atmosphère est la conséquence des liens physiques entre les différentes variations géochimiques, atmosphériques, ionosphériques et l'activité tectonique, fournissent à travers le mécanisme du couplage dynamique Lithosphère-Atmosphère-Ionosphère ; quand vient de les proposer dans cette thèse.

Dans une nouvelle perspective, on doit mentionner que la membrane ionosphérique est considérée comme étant une zone de perturbation des ondes radioélectriques du signal GPS/GNSS qui influence essentiellement la charge électronique (électrons libres) de l'écran relatif à la zone considérée (Kintner et Ledvina, 2005; Hofmann-Wellenhof et al., 2008; Hernández-Pajares et al., 2011; Spit, 2011; Tachema, 2012; Jin et al., 2015; Leick et al., 2015). L'interprétation du spectre électromagnétique de la membrane ionosphérique de l'évènement d'Oran 2008 est basée sur l'analyse de la coda relative au TEC ionosphérique qui fait apparaître plusieurs perturbations liées aux vibrations des sources sismiques. Ces dernières vont servir à détecter les précurseurs sismiques relatifs au séisme principal. Les indices de cette prévision sismique sont notifiés sur le diagramme des enregistrements électromagnétique et sismique indispensable en cette tâche de dépouillement et de mise en valeur du phénomène étudié.

A cet effet, la lecture du spectre ionosphérique de l'évènement sismique d'Oran 2008 devient possible, à la faveur du graphe établi (Fig. IV.14) qui répond fidèlement à l'information conservée dans le signal GPS_TEC.

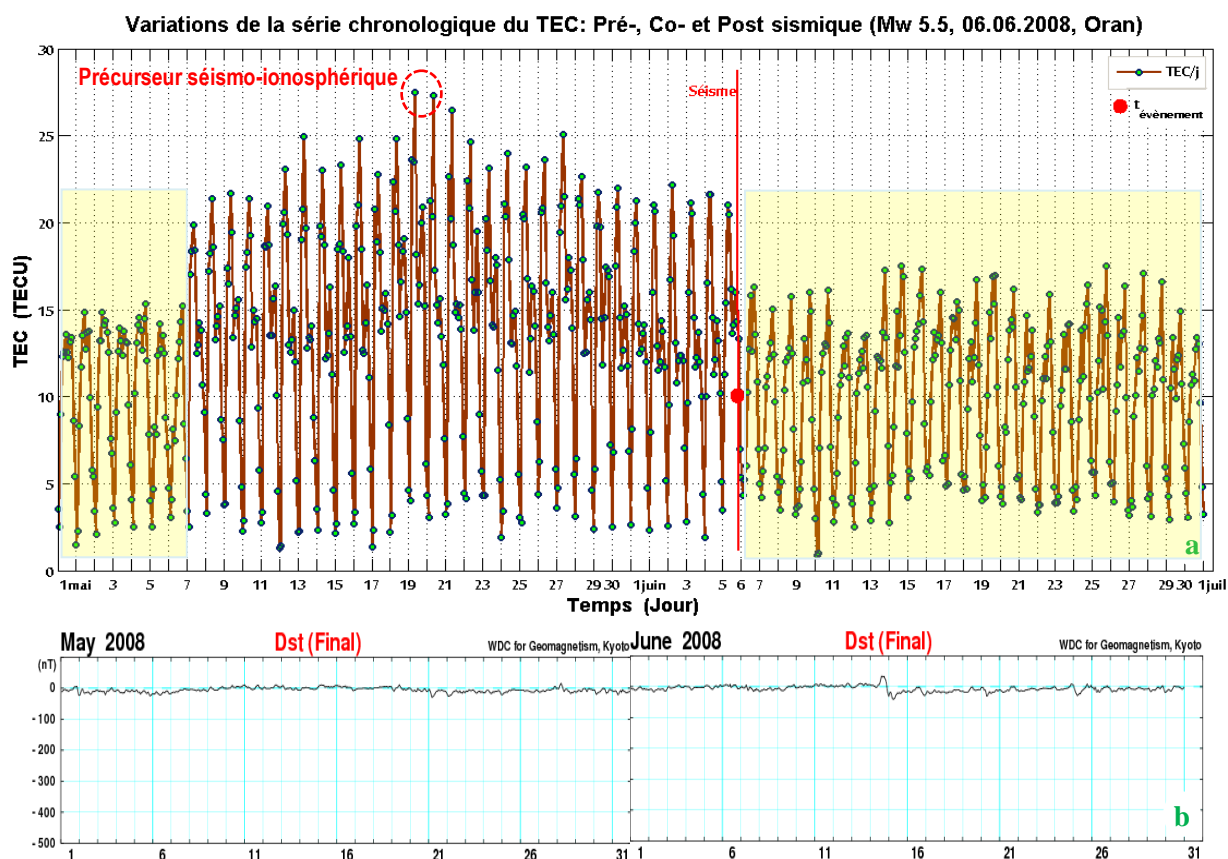


Figure IV.14 : (a) Diagramme de variation de la série chronologique du TEC de l'évènement d'Oran ($35.883^\circ N$, $0.658^\circ W$). (b) Activité géomagnétique extrêmement faible (Phase minimale solaire).

Suivons l'organigramme (Fig. III.3, cf. chap. III, § III.2.2), l'utilisation de la gamme de signaux bi-fréquences ($L1=1\ 575,42\ \text{MHz}$ et $L2=1\ 227,60\ \text{MHz}$) des satellites GPS réceptionnés par une soixantaine de stations de références IGS d'enregistrement continu (Annexe A : Fig. A.3 et Tab. A.1), nous a permis de développer une approche basée essentiellement sur le calcul paramétrique du TEC et de la densité en électrons libres du niveau ionosphérique F2. La reconstitution en temps réel du signal GPS_TEC (Fig. IV.14) est élaboré par les data RINEX, fichiers d'observations et de navigation, qui ont permis l'établissement d'une cartographie systématique du contenu électronique 'TEC-Mapping' (Fig. IV.11). La lecture de ces cartes thématiques nous ont facilité d'observer des perturbations et des irrégularités ionosphériques générées par les ondes sismiques de l'évènement d'Oran 2008 ($M_w = 5.5$). Ainsi, les résultats obtenus font paraître la période où la couche ionosphérique a connu des perturbations et irrégularités anormales entre le 8 mai et le 06 juin 2008, soit 28 jours bien avant le choc principal.

Comme l'indique la figure (IV.14), on peut constater que les fluctuations ionosphériques (polarisation spontanée du TEC) sont apparues le 20 mai 2008 vers 08h00 TU ; le TEC a atteint

une valeur maximale de 27.5 TECu ($1\text{TECU} = 1 \times 10^{16} \text{ e}^-/\text{m}^2$). En fait, la date du 8 mai 2008 marque le début de la perturbation globale suite à des événements sismotectoniques majeurs.

En conséquence, l'observation minutieuse de la configuration ionosphérique du TEC (Fig IV.11. (a) et (b)) fait apparaître des perturbations significatives sur la trace du signal physique du TEC ionosphérique traduisant ainsi les impétus prononcées des précurseurs séismo-ionosphériques de l'ordre de plusieurs semaines avant le choc principal d'Oran (06.06.2008, M5.5).

En outre, le comportement du rayonnement solaire dépend de la source mère qui influence considérablement sur l'ionisation de la haute atmosphère. En conséquence, le pic du contenu électronique est observé souvent en période du jour (de l'après-midi à 14H00). Alors que le contraire est constaté, selon la (Fig. IV.11.b) le maximum d'ionisation a débuté dès 04H00 du matin avec une valeur de TEC relativement très élevée, de l'ordre de 23.62 TECU. Il est à noter que les valeurs du TEC atteignent ses minimales, de l'ordre de 3 à 5 TECU, pendant la période nocturne et à la matinale.

On se basant sur les figures (IV.13) et (IV.14), l'activité solaire et géomagnétique se sont atténuées pour atteindre les valeurs minimales (année_2008 : activité séismique d'Oran) ; qui coïncide avec la période d'ionosphère calme, abaissant ainsi largement les valeurs de TEC à leurs minima d'environ 2–3 TECU en moyenne.

En complément, nous soulignons que les valeurs moyennes des indices⁷ magnétique et solaire, durant la période d'observation du 01 mai 2008 au 01 juillet 2008, sont données comme suit (cf. Annexe C) :

- Indices géomagnétiques : $-35 < \text{Dst} < 25.5$, $\sum Kp = 12$, $A_p = 6.5$
- Indices solaires : Nombre de taches solaires = 3.3, Flux solaire radio : $F_{10.7} = 69 \text{ sfu}$

Ce constat, argumente notre propos, qui discute la liaison entre le phénomène de polarisation spontanée du contenu TEC (Atmosphère) et l'amarce d'un évènement sismique (Terre), ainsi de préciser l'interaction du couplage ternaire : Lithosphère-Atmosphère-Ionosphère, et du couplage dynamique Terre solide-Atmosphère qui gouvernent l'activité tellurique en ces propres composantes (énergie thermique du séisme, les champs électrique et magnétique). En conséquence, les irrégularités de la trace physique des mesures ionosphériques -environ quinze jours avant l'évènement principal comme précurseurs séismo-ionosphériques- se voient bien corrélée avec l'activité séismique de l'évènement d'Oran (06 juin 2008, $M_w = 5.5$).

⁷ <http://www.geomag.bgs.ac.uk/>
<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>

Conclusion

Sur la base des connaissances géodésiques et sismotectoniques, nous avons proposé une démarche analytique qui permet de détecter les précurseurs sismiques à partir des données d'enregistrement géodésique RINEX et sismologique couvrant une province géographique qui s'étend sur le bassin méditerranéen (le littoral Oranais à l'Ouest Algérien).

Le principe de notre approche géodésique consiste à traiter et à modéliser des données relatives au contenu d'électrons, en particulier dans la partie haute atmosphère (couche ionosphérique F2). Cette couche se comporte comme une membrane réfléchissante des ondes électromagnétiques générées pendant les processus pré-sismiques sur Terre. Les effets de vibration du sol enregistrés au niveau des sismogrammes trouvent un enregistrement conforme et cohérent au niveau de la couche ionosphérique F2 située à 350 km au-dessus de la surface terrestre. Nous avons constaté que la gamme des séismes de magnitude modérée ($M \geq 5$) semblait répondre favorablement à notre démarche proposée afin d'identifier les précurseurs sismiques, plusieurs jours ou quelques semaines, bien avant le choc principal, comme dans les cas étudiés (événements sismiques de : Oran, 06 juin 2008 ($M_w = 5.5$) ; Ain Témouchent, 22 décembre 1999 ($M_w = 5.7$) et Italie Centrale : 24 août et fin octobre 2016 ($6.1 \leq M_w \leq 6.6$)).

Dans la pratique, les données géodésiques (fichiers RINEX : observations/navigation) sont obtenues à travers le réseau géodésique international (stations IGS) et les données sismologiques (magnitude, intensité, profondeur, etc.) sont issues des catalogues globaux et régionaux. Ainsi :

- Une reconstitution systématique des signaux a été réalisée au sein de notre laboratoire de recherche (Georen) avec le tracé chronique qui couvre plusieurs mois d'observations.
- Une phase de dépouillement et de traitement du signal est ensuite réalisée par différents logiciels tels que Matlab et SeisGram2K qui ont permis d'obtenir davantage d'informations et mieux visualiser les paramètres géophysique et géodésique de ce phénomène de vibration tellurique qui se propage à travers le couplage dynamique ternaire Lithosphère-Atmosphère-Ionosphère.

En fait, les ondes acoustiques et de gravité, en tant que précurseurs sismiques, ont la particularité de se propager à travers l'atmosphère jusqu'à la couche ionosphérique chargée (fortement en électrons) et qui se polarise spontanément lors du déclenchement d'un séisme notable tel que les évènements telluriques affectant l'Oranie (Ain Témouchent 1999 $M_{5.7}$ et Oran 2008 $M_{5.5}$). Ainsi, l'identification des précurseurs sismiques par la voie du contenu électronique de l'ionosphère devient accessible en utilisant la bande passante du TEC amplifié ;

par la perception des pics marquants les valeurs maximales au niveau de la zone de haute densité électronique.

Comme résultats obtenus, nous mentionnons la concordance des réponses spectrales entre les données électromagnétiques et sismiques ainsi que la démarcation des délais entre l'arrivée des précurseurs séismo-ionosphérique et le temps origine de l'évènement.

Enfin, nous constatons que notre contribution en ce domaine en prévision sismique permet de mettre en valeur le traitement de signal pour résoudre les différents paramètres physiques en terme de fréquence d'occurrence de l'objet évènement (failles) et les réponses spectrales entre : électromagnétiques et sismiques.

L'efficacité de l'approche géodésique proposée et ses résultats facilite la compréhension du phénomène du tremblement de terre et ses propres anomalies qui leur associées (mouvement du sol, perturbations ionosphériques, etc.) et au développement des systèmes de surveillance et d'alerte précoce liées aux précurseurs séismo-ionosphériques. La prévision sismique reste malgré toutes ces recherches intensives l'un des domaines les plus complexes même obscures et doit encore être étudiée.

Conclusion Générale et Perspectives

Dans cette thèse, l'élaboration d'une synthèse relative aux variations du paramètre physique TEC en domaine de la prévision séismo-ionosphérique nécessite plusieurs étapes d'investigations et d'auscultations. Un travail consistant en domaine de la systématique des évènements séismiques, en échantillonnage des fichiers RINEX et de dépouillement du signal GPS/GNSS a été élaboré. Dans une phase bien avancée relative à la cartographie thématique du contenu électronique de la couche ionosphérique 'TEC-Mapping', nous avons restitué la série temporelle des taux de variations du TEC qui nous a permis la discrétisation des aléas évènementielles (signal GPS) relatifs aux évènements séismiques ayant affectés la région Oranaise en décembre 1999 et juin 2008 ainsi que la métropole italienne en août/octobre 2016. L'établissement de cette cartographie à variante ionosphérique 'TEC', nous a servi à étudier les notables anomalies constatées à différentes échelles de la distribution spatio-temporelle de la membrane ionosphérique.

Rappelant que l'approche analytique, ici envisagée, se base sur l'estimation des délais de temps relatifs aux réponses séismiques depuis le déclenchement (source sismique lithosphérique) jusqu'à leur enregistrement en data RINEX (stations GPS permanentes) à la faveur du système de réflexion des ondes électromagnétiques sur la couche ionosphérique.

Nous signalons que les principaux résultats obtenus de notre approche géodésique sont :

- L'allure et le comportement du signal GPS_TEC utilisé ; porte l'empreinte d'édifications du paramètre TEC en relation avec la prévision séismique.
- Le nombre des aléas enregistrés en termes d'amplitude 'TEC' correspond respectivement au nombre des évènements séismiques.
- La lecture minutieuse de la chronique du signal GPS_TEC fait apparaître l'émergence d'une distorsion à plusieurs niveaux ainsi des pics maximaux enregistrés dans des délais de l'ordre de quelques jours avant l'arrivée de l'évènement principal.
- La modélisation d'occurrence des répliques séismiques ont révélé l'existence d'une corrélation entre les précurseurs séismo-ionosphériques et les répliques.
- La réponse du signal GPS_TEC avec l'activité séismique associée, révèle l'existence d'une conformité spectrale entre le champ géomagnétique et celui du TEC ionosphérique (polarisation spontanée du TEC).

En effet, et après la procédure de séparation des effets et influences des activités solaire et géomagnétique sur le TEC ionosphérique, la configuration cartographique du TEC se montre fidèle aux changements constatés des effets pré et co-séismiques. Ce fait confirme l'efficacité de notre approche en domaine de la prévision des risques sismiques quant à l'enregistrement de la variante 'TEC' qui traduit la réponse de l'activité ionosphérique réelle vis-à-vis aux manifestations mantelliques régionale. On note qu'au niveau de l'atmosphère terrestre, la zone ionisée est située à 350 km au-dessus du sol (couche ionosphérique F2), constituant ainsi une membrane réelle (plasma) qui détecte les variations du champ magnétique relatif aux évènements sismiques.

Notons que les anomalies étudiées ont des délais qui varient entre quelques heures à quelques jours bien avant le déclenchement de l'évènement principal (entre 7 à 28 jours). Par ce travail, on vient d'annoncer que les séismes sont souvent précédés d'une importante augmentation en densité d'ionisation de la membrane ionosphérique par rapport à leur environnement naturel (condition ionosphérique stable). Nous soulignons aussi à travers notre étude, que l'établissement d'un jeu de cartes thématiques du TEC est toujours utile pour la préparation des missions de positionnement géodésique et pour étudier l'activité sismotectonique à l'échelle régionale. L'écho ionosphérique tiré par les data GPS constitue une donnée fondamentale dans l'étude des précurseurs séismiques à la faveur du TEC. Ainsi, la cartographie chronique de ce paramètre permet d'établir un outil performant qui, parallèlement à l'enregistrement sismique au sol, contribue à débattre la question de prédiction des tremblements de terre de magnitude moyens à forts ($M_w \geq 5$). Enfin, ce travail semble servir efficacement à la prévision sismique à travers l'étude du mécanisme de couplage dynamique 'Terre-Atmosphère ionisée'.

Au terme de cette thèse, les perspectives envisageables sont diverses. En ce qui concerne notre territoire national (y compris la région nord-ouest de l'Algérie), il serait d'autant plus efficace de combler le retard en matière des données/observations géodésiques et géophysiques :

- Installation de réseaux denses de stations GNSS fonctionnant en permanence (récepteurs GPS denses et continus) et leurs manipulations précises.
- Installation de réseaux denses de sismomètres large bande en Algérie.
- Déploiement de capteurs de déformation très sensibles dans les régions les plus actives de notre territoire (en particulier le littoral Oranais), avec des forages scientifiques profonds dans les zones de failles (zones sismogènes).

- Installation d'un observatoire équipé d'un Ionosonde Numérique (Digital Ionosonde), des radiomètres et autres équipements afin d'intégrer les données historiques de l'ionosphère avec le paramètre TEC, permettant ainsi d'identifier les singularités et les distorsions du signal GPS_TEC.
- Réalisation d'un système informatique (équipements et logiciels) de bases de données ionosphériques pour standardiser les observations historiques et temps réel.

Ces efforts colossaux en matière d'instrumentation est la condition requise pour progresser encore sur tous les fronts en domaine de la prédiction des évènements telluriques. Enfin, nous espérons avoir posé la première pierre dans cette branche de prévision sismique ce qui donnera une impulsion à la recherche scientifique locale.

Références Bibliographiques

- Akhoondzadeh, M., De Santis, A., Marchetti, D., Piscini, A., et Jin, S., 2019** « Anomalous seismo-LAI variations potentially associated with the 2017 Mw=7.3 Sarpol-e Zahab (Iran) earthquake from Swarm satellites, GPS TEC and climatological data » *Adv. Space Res.*, 64, 143–158. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.03.020>.
- Almqvist, B.S.G., et Mainprice, D., 2017** « Seismic properties and anisotropy of the continental crust: Predictions based on mineral texture and rock microstructure » *Rev. Geophys.*, 55, 367–433, [doi:10.1002/2016RG000552](https://doi.org/10.1002/2016RG000552).
- Altamimi, Z., Rebischung, P., Métivier, L., et Collilieux, X., 2016** « ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions » *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 121, 6109–6131, [doi:10.1002/2016JB013098](https://doi.org/10.1002/2016JB013098).
- Altamimi, Z., Rebischung, P., Collilieux, X., Métivier, L., et Chanard, K., 2019** « Review of Reference Frame Representations for a Deformable Earth International Association of Geodesy Symposia » Springer Nature Switzerland, https://doi.org/10.1007/1345_2019_66.
- Amir, L., Cisternas, A., Vignerese, J.-L., Dudley, W., et Mc Adoo, B., 2012** « Algeria's vulnerability to tsunamis from near field seismic sources » *Science of Tsunami Hazards*, 31:1, 82–98.
- Angling, M.J., Elvidge, S., et Healy, S.B., 2018** « Improved model for correcting the ionospheric impact on bending angle in radio occultation measurements » *Atmospheric Measurement Techniques*, 11(4), 2213–2224. [doi:10.5194/amt-11-2213-2018](https://doi.org/10.5194/amt-11-2213-2018).
- Artru, J., 1998** « Etude des perturbations ionosphériques post-sismiques » Rapport DEA-Institut de Physique du Globe de Paris, IPGP, France.
- Ayadi, A., et Bezzeghoud, M., 2015** « Seismicity of Algeria from 1365 to 2013: Maximum Observed Intensity Map (MOI2014) » *Seism. Res. Lett.*, 86, 1, 237–244, <http://dx.doi.org/10.1785/0220140075>.
- Barman, C., Ghose, D., Sinha, B., et Deb, A., 2016** « Detection of earthquake induced radon precursors by Hilbert Huang Transform » *Journal of Applied Geophysics*, 133, 123–131. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2016.08.004>.
- Bartels, J., 1949** « The standardized index, ks, and the planetary index, kp » *IATME Bull.* 12b 97, 2010–2021.
- Bayet, M., et Quemada, D., 1955** « La recombinaison entre électrons et ions positifs » *J. Phys. Radium*, Vol. 16 (4), ff10.1051/jphysrad:01955001604033401ff. ffjpa-00235152f. pp. 334–338.

- Belabbès, S., Meghraoui, M., Cakir, Z., et Bouhadad, Y., 2009** « InSAR analysis of a blind thrust rupture and related active folding: the 1999 Ain Temouchent earthquake (M w 5.7, Algeria) case study » *Journal of Seismology*, 13(4), 421–432. [doi:10.1007/s10950-008-9135-x](https://doi.org/10.1007/s10950-008-9135-x).
- Belayadi, I., Bezzeghoud, M., Nadji, A., et Fontiela, J., 2017** « North occidental algeria seismicity between 1790 and 2016: Seismic catalog » *Comunicações Geológicas* 104, 1, 97–110.
- Beldjoudi, H., 2011** « Etude de la sismicité du Nord Algérien » Thèse de Doctorat, Université Abou Bekr Belkaid-Tlemcen, Algérie.
- Beldjoudi, H., Delouis, B., Heddar, A., Nouar, O.B., et Yelles-Chaouche, A., 2011** « The Tadjena Earthquake (Mw = 5.0) of December 16, 2006 in the Cheliff Region (Northern Algeria): Waveform Modelling, Regional Stresses, and Relation with the Boukadir Fault » *Pure and Applied Geophysics*, 169(4), 677–691. [doi:10.1007/s00024-011-0337-8](https://doi.org/10.1007/s00024-011-0337-8).
- Beldjoudi, H., 2017** « Modélisation de la source des séismes par inversion des données sismologiques et géodésiques: application aux séismes du Nord de l'Algérie » Thèse de Doctorat. Sciences de la Terre. Université Côte d'Azur. Français. NNT: 2017AZUR4053.
- Bellalem, F., 2007** « Aléa sismique en un site, méthodologie et application » Mémoire de Magister en Géophysique, Université de M'Hamed Bougara, Boumerdes, Algérie.
- Benbakhti, I.M., Maouche, S., Belhai, D., Harbi, A., Ritz, J.-F., Rabai, G., Rezouk, A., et Doumaz, F., 2018** « Characterizing the active tectonics in the Oran region (Algeria) and recasting the 1790 earthquake » *Journal of Seismology*. [doi:10.1007/s10950-018-9784-3](https://doi.org/10.1007/s10950-018-9784-3).
- Benghanem, K., 2013** « Recherche de corrélations entre les séismes puissants et les perturbations ionosphériques à partir des données de géodésie spatiale (satellite DEMETER) et des données géophysiques » Thèse de Doctorat, université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene (USTHB), Alger, Algérie.
- Bernard, P., 2003** « Qu'est-ce qui fait trembler la Terre? A l'origine des catastrophes sismiques » Edition EDP Sciences, 287 pp., ISBN : 2-86883-629-1.
- Bezrodny, V.G., Charkina, O.V., Yampolski, Y.M., Watkins, B., et Groves, K., 2010** « Application of an Imaging Riometer to Investigating Stimulated Ionospheric Scintillations and Absorption of Radiation from Discrete Cosmic Sources » *Radio Physics and Radio Astronomy*, Begell House, Inc., 1(4).
- Bezzeghoud, M., Dimitrov, D., Ruegg, J.C., et Lammali, K., 1995** « Faulting mechanism of the El Asnam 1954 and 1980 earthquakes from modeling of vertical movements » *Tectonophysics*, 249, 249–266.
- Bezzeghoud, M., Ayadi, A., Sebai, A., Ait Messaoud, M., Mokrane, A., et Benhallou, H., 1996** « Seismicity of Algeria between 1365 and 1989: Map of Maximum Observed Intensities (MOI) » in: *Avances en Geofisica y Geodesia* 1, ano 1, Ministerio de Obras Publicas, transportes y Medio Ambiente, Instituto Geografico Nacional España, pp. 107–114.

Bhattacharya, S., Sarkar, S., Gwal, A.K., et Parrot, M., 2007 « Observation of ULF/ELF anomalies detected by DEMETER satellite prior to earthquakes » *Indian Journal of Radio & Space Physics*, 36, 103–113.

Blanc, E., 1985 « Observations in the upper atmosphere of infrasonic waves from natural or artificial sources - A summary » *Annales Geophysicae*, 3, 673–679, 1985.

Blanc, E. et Jacobson, A.R., 1989 « Observation of ionospheric disturbances following a 5-kt chemical explosion 2. Prolonged anomalies and stratifications in the lower thermosphere aftershock passage » *Radio Sci.*, 24 (6), 739–746.

Böhm, J., et Schuh, H., (Eds.) 2013 « Atmospheric Effects in Space Geodesy » Springer, ISBN: 978-3-642-36932-2.

Bolt, B.A., 1964 « Seismic air waves from the great 1964 Alaskan earthquake » *Nature*, 202(4937), 1095–1096.

Bonchkovsky, V.F., 1954 « Changing of the atmospheric electric potential gradient as one of possible precursor of earthquakes » *Proceedings of the Geophysical Institution N° 25 (152)*: 192–206.

Boscher, D., Bougeret, J-L., Breton, J., Lantos, P., Prado, J-Y., Romero M., et Orru M., 1998 « Météorologie de l'environnement spatial 'météo de l'espace' » Document CNES/DP/CM n° 98-252, Centre National d'Etudes Spatiales, France.

Boutiouta, S., Belbachir, A.H., et Dekkich, H., 2006 « Contrôle de l'activité ionosphérique à partir des données GPS » *Téledétection*, Vol. 5, N°4, pp. 325–338.

Brissaud, Q., 2017 « Modélisation numérique des ondes atmosphériques issues des couplages solide/océan/atmosphère et applications » Thèse de Doctorat, Université Toulouse, Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace, France.

Bufo, E., Bezzeghoud, M., UDÍAS, A., et Pro, C., 2004 « Seismic Sources on the Iberia-African Plate Boundary and their Tectonic Implications » *Pure and Applied Geophysics*, 161(3), 623–646. [doi:10.1007/s00024-003-2466-1](https://doi.org/10.1007/s00024-003-2466-1).

Bufo, E., Coca, P., Bezzeghoud, M., Udías, A., Bouhadad, Y., et Mattesini, M., 2019 « The destructive 1790 Oran (NW Algeria) earthquake in a region of low seismicity » *Tectonophysics*. [doi:10.1016/j.tecto.2019.03.008](https://doi.org/10.1016/j.tecto.2019.03.008).

Chadha, R.K., Pandey, A.P., et Kuempel, H.J., 2003 « Search for earthquake precursors in well water levels in a localized seismically active area of reservoir triggered earthquakes in India » *Geophys Res Lett* 30:642. <https://doi.org/10.1029/2002GL016694>.

Chavez, O., Pérez-Enriquez, R., Cruz-Abeyro, J.A., Millan-Almaraz, J.R., Kotsarenko, A., et Rojas, E., 2011 « Detection of electromagnetic anomalies of three earthquakes in Mexico with an improved statistical method » *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 11, 2021–2027, [doi:10.5194/nhess-11-2021-2011](https://doi.org/10.5194/nhess-11-2021-2011).

Chen, Y.I., Chuo, Y.J., Liu, J.-Y., et Pulinets, S.A., 1999 « A Statistical study of ionospheric precursors of strong earthquake at taiwan area » XXVth General Ass. URSI 745.

Chernyavski, E.A., 1955 « The atmosphere-electric precursors of earthquakes in Meteorology and hydrology in Uzbekistan, Tashkent » 317–327.

Chimouni, R., Harbi, A., Boughacha, M.S., Hamidatou, M., Kherchouche, R., et Sebaï A., 2018 « The 1790 Oran Earthquake, a Seismic Event in Times of Conflict along the Algerian Coast: A Critical Review from Western and Local Source Materials » Seism. Res. Lett. 89, 2392–2403, [doi:10.1785/0220180175](https://doi.org/10.1785/0220180175).

China Satellite Navigation Office, 2020 « BeiDou Navigation Satellite System Signal In Space Interface Control Document Open Service Signal B2b (Version 1.0) » BDS-SIS-ICD-B2b-1.0.

Chmyrev, V., Smith, A., Kataria, D., Nesterov, B., Owen, C., Sammonds, P., Sorokin V., et Vallianatos, F., 2013 « Detection and monitoring of earthquake precursors: TwinSat, a Russia-UK satellite project » Advances in Space Research, 52(6), 1135–1145. [doi:10.1016/j.asr.2013.06.017](https://doi.org/10.1016/j.asr.2013.06.017).

Chuo, Y.J., Chen, Y.I., Liu, J.Y., et Pulinets, S.A., 2001 « Ionospheric foF2 variations prior to strong earthquakes in Taiwan area » Advances in Space Research. 27, 1305–1310.

Coburn, A., et Spence, R., 2002 « Earthquake protection » Second Edition. John Wiley & Sons, Ltd. ISBN: 0-471-49614-6.

Commission of the European Communities 2000 « Commission Communication to the European Parliament and the Council on GALILEO » Brussels, Belgium, November 22.

Crampin, S., Evans, R., et Atkinson, B.K., 1984 « Earthquake prediction: a new physical basis » Geophys. J. R. astr. Soc., 76, 147–156.

Dabas, R.S., Das, R.M., Sharma, K., et Pillai, K.G.M., 2007 « Ionospheric pre-cursors observed over low latitudes during some of the recent major earthquakes » Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 69(15), 1813–1824. [doi:10.1016/j.jastp.2007.09.005](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2007.09.005).

Danzer, J., Healy, S.B., et Culverwell, I.D., 2015 « A simulation study with a new residual ionospheric error model for GPS radio occultation climatologies » Atmos. Meas. Tech., 8, 3395–3404, <https://doi.org/10.5194/amt-8-3395-2015>.

Davidenko, D.V., et Pulinets, S.A., 2019 « Deterministic variability of the ionosphere on the eve of strong ($M \geq 6$) earthquakes in the regions of greece and italy according to long-term measurements data » Geomagnet. Aeronomy 59 (4), 493–508. [doi:10.1134/S001679321904008X](https://doi.org/10.1134/S001679321904008X).

Davies, K., et Baker, D.M., 1965 « Ionospheric effects observed around the time of the Alaskan earthquake of March 28 1964 » J. Geophys. Res. 70: 2251–2253.

De Santis A., 2009 « Geosystemics » Proc. 3rd IASME/WSEAS Int. Conf. Geology and Seismology (GES'09), pp. 36–40.

De Santis, A., Marchetti, D., Spogli, L., Cianchini, G., Pavón-Carrasco, F.J., Franceschi, G.D., Di Giovambattista, R., Perrone, L., Qamili, E., Cesaroni, C., De Santis, A., Ippolito, A., Piscini, A., Campuzano, S.A., Sabbagh, D., Amoroso, L., Carbone, M., Santoro, F., Abbattista, C., Drimaco, D., 2019 « Magnetic field and electron density data analysis from swarm satellites searching for ionospheric effects by great earthquakes: 12 case studies from 2014 to 2016 » Atmosphere 10 (7), 371. [doi:10.3390/atmos10070371](https://doi.org/10.3390/atmos10070371).

Denisenko, V.V., Rycroft, M.J., et Harrison, R.G., 2019 « Mathematical Simulation of the Ionospheric Electric Field as a Part of the Global Electric Circuit » Surv Geophys 40, 1–35. <https://doi.org/10.1007/s10712-018-9499-6>.

Dettmering, D., Limberger, M., et Schmidt, M., 2014 « Using DORIS measurements for modeling the vertical total electron content of the Earth's ionosphere » Journal of Geodesy, 88(12), 1131–1143. [doi:10.1007/s00190-014-0748-2](https://doi.org/10.1007/s00190-014-0748-2).

Di Giacomo, D., Engdahl E.R., et Storchak, D.A., 2018 « The ISC-GEM Earthquake Catalogue (1904–2014): status after the Extension Project » Earth Syst. Sci. Data, 10, 1877–1899, [doi: 10.5194/essd-10-1877-2018](https://doi.org/10.5194/essd-10-1877-2018).

Diggelen, F.V., 2009 « A-GPS: Assisted GPS, GNSS and SBAS » Norwood, MA, USA : Artech House, ISBN-13: 978-1-59693-374-3.

Dobrovolsky, I.R., Zubkov, S.I., et Myachkin, V.I., 1979 « Estimation of the size of earthquake preparation zones » Pure and Applied Geophysics, 117 (5), 1025–1044.

Dominique, P., 2000 « Bilan des actions réalisées en 1999 pour la fiche de service public N° 99H017 - Sismicité instrumentale: acquisition et exploitation des données » Rapport BRGM/RP-50298-FR, 15 p., 1 annexe.

Donn, W., et Posmentier, E.S., 1964 « Ground-coupled air waves from the great Alaskan earthquake » J. Geophys. Res., 69, 5357–5361.

Duquenne, F., 2018 « Les systèmes de référence terrestre et leurs réalisations: Cas des territoires français » Revue XYZ n°154, page 46-54, www.aftopo.org.

Durand, S., 2003 « Amélioration de la précision de la localisation différentielle temps réel par mesure de phase des systèmes GNSS : étude détaillée des équations d'observation et du problème de résolution des ambiguïtés entières » Astrophysique. Observatoire de Paris, <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-02071408>.

Eftaxias, K., Kopanas, J., Bogris, N., Kapiris, P., Antonopoulos, G., et Varotsos, P., 2000 « Detection of electromagnetic earthquake precursory signals in Greece » Proc. Japan Acad., 76(B), 45–50.

El-Rabbany, A., 2002 « Introduction to GPS: The Global Positioning System » ISBN 1-58053-183-0, Artech House, Boston, London.

European GNSS 2016 « European GNSS (Galileo) open service, signal-in-space » Interface control document. Document subject to terms of use and disclaimers, p. i-ii, OS SIS ICD.: © European Union 2016, December 2016. Issue 1.3.

Fernandez, M.G., 2004 « Contributions to the 3D ionospheric sounding with GPS data » Thèse de Doctorat, Université polytechniques de Catalogne, Espagne.

Flechtner, F., Bedrich, S., et Teubel, A., 1998 « First results of comparisons of PRARE TEC with TOPEX measurements and with ionospheric models » *Advances in Space Research*, 22(6), 815–818. [doi:10.1016/s0273-1177\(98\)00104-5](https://doi.org/10.1016/s0273-1177(98)00104-5).

Fleitout, L., 1991 « Origine des contraintes tectoniques déviatoriques dans la lithosphère terrestre The sources of lithospheric tectonic stresses » *Rev. Franç. Géotech.* N° 56, pp. 43–50.

Fujiwara, H., Kamogawa, M., Ikeda, M., Liu, J.Y., Sakata, H., Chen, Y.I., Ofuruton, H., Muramatsu, S., Chuo, Y.J., et Ohtsuki, Y.H., 2004 « Atmospheric anomalies observed during earthquake occurrences » *Geophys. Res. Lett.*, 31, L17110, [doi:10.1029/2004GL019865](https://doi.org/10.1029/2004GL019865).

Fukmoto, Y., Hayakawa, M., et Yasuda, H., 2002 « Reception of over-horizon FM signals associated with earthquakes » In *Atmospheric and Ionospheric electromagnetic phenomena associated with earthquakes*. Eds. M. Hayakawa and O.A. Molchanov, TERRAPUB, Tokyo. pp. 263–266.

Gaivoronskaya, T.V., 1991 « The seismic activity effects on the ionosphere » *The Review*. Preprint IZMIRAN N° 36 (983) Moscow, 25 p.

Galileo ESA 2008 « Galileo Open Service Signal in Space » Interface Control Document OS SIS ICD: Draft 1. European Space Agency/European GNSS Supervisory Authority.

Garcia, R.F., Bruinsma, S., Lognonné, P., Doornbos, E., et Cachoux, F., 2013 « GOCE: The first seismometer in orbit around the Earth » *Geophysical Research Letters*, 40 (5), 1015–1020, [doi:10.1002/grl.50205](https://doi.org/10.1002/grl.50205).

Gebre-Egziabher D., et Gleason, S., 2009 « GNSS Applications and Methods » Norwood, MA, USA : Artech House, ISBN-13: 978-1-59693-329-3.

Gokhberg, M.B., Morgounov, V.A., Yoshino, T., et Tomizawa, I., 1982 « Experimental measurement of electromagnetic emissions possibly related to earthquakes in Japan » *Journal of Geophysical Research*, 87(B9), 7824. [doi:10.1029/jb087ib09p07824](https://doi.org/10.1029/jb087ib09p07824).

Gokhberg, M.B., Morgounov, V.A., et Pokhotelov, O.A., 1995 « Earthquake prediction: Seismo-electromagnetic phenomena » Reading-Philadelphia., Gordon and Breach Science Publishers, 287.

Grant, R.A., Halliday, T., Balderer, W.P., Leuenberger, F., Newcomer, M., Cyr, G., et Freund, F.T., 2011 « Ground Water Chemistry Changes before Major Earthquakes and Possible Effects on Animals » *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 8(6), 1936–1956. [doi:10.3390/ijerph8061936](https://doi.org/10.3390/ijerph8061936).

Grewal, M.S., Andrews, A.P., et Bartone, C.G., 2020 « Global navigation satellite systems, inertial navigation, and integration » Fourth Edition. John Wiley & Sons, ISBN 9781119547846.

Groves, P.D., 2013 « Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems » Norwood, MA, USA : Artech House, ISBN-13: 978-1-58053-255-6.

Gufeld, I.L., Rozhnoi, A.A., Tyumensev, S.N., Sherstuk, S.V., et Yampolsky, V.S., 1992 « Radiowave disturbances in period to Rudber and Rachinsk earthquakes » *Phys. Solid Earth*, 28, 267–270.

Guo, J., Shi, K., Liu, X., Sun, Y., Li, W., Kong, Q., 2019 « Singular spectrum analysis of ionospheric anomalies preceding great earthquakes: case Studies of Kaikoura and Fukushima Earthquakes » *J. Geodyn.* [doi:10.1016/j.jog.2019.01.005](https://doi.org/10.1016/j.jog.2019.01.005).

Gurtner, W., et Estey, L., 2007 « RINEX: The Receiver Independent Exchange Format Version 3.00 » Astronomical Institute of the University of Bern, Switzerland and UNAVCO, Boulder Colorado, USA.

Gurtner, W., et Estey, L., 2013 « RINEX: The Receiver Independent Exchange Format Version 3.02 » <ftp://igs.org/pub/data/format/rinex302.pdf>. International GNSS Service (IGS), RINEX Working Group and Radio Technical Commission for Maritime Services Special Committee 104 (RTCM-SC104), April 3, 2013. Astronomical Institute of the University of Bern, Switzerland and UNAVCO, Boulder Colorado, USA.

Hamilton, D.C., Gloeckler, G., Ipavich, F.M., Stüdemann, W., Wilken, B., et Kremser, G., 1988 « Ring current development during the great geomagnetic storm of February 1986 » *Journal of Geophysical Research*. Vol. 93, N° A12, pp. 14,343– 4,355.

Harrison, R.G., Aplin, K.L., et Rycroft, M.J., 2010 « Atmospheric electricity coupling between earthquake regions and the ionosphere » *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 72(5-6), 376–381. [doi:10.1016/j.jastp.2009.12.004](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2009.12.004).

Hathaway, D.H., 2015 « The Solar Cycle » *Living Reviews in Solar Physics*, 12(1). [doi:10.1007/lrsp-2015-4](https://doi.org/10.1007/lrsp-2015-4).

Hayakawa, M., Ohta, K., Maekawa, S., Yamauchi, T., Ida, Y., Gotoh, T., Yonaiguchi, N., Sasaki, H., et Nakamura, T., 2006 « Electromagnetic precursors to the 2004 Mid Niigata Prefecture earthquake » *Physics and Chemistry of the Earth*. 31: 356–364.

He, F., Hu, H., Hu, Z., et Liu, R., 2014 « A new technique for deriving the quiet day curve from imaging riometer data at Zhongshan Station, Antarctic » *Science China Technological Sciences*, 57(10), 1967–1976. [doi:10.1007/s11431-014-5616-z](https://doi.org/10.1007/s11431-014-5616-z).

Heki, K., et Enomoto, Y., 2013 « Preseismic ionospheric electron enhancements revisited » *J. Geophys. Res. Space Phys.* 118 (10), 6618–6626.

Hernández-Pajares, M., Juan, J.M., Sanz, J., Aragón-Àngel, À., García-Rigo, A., Salazar, D., et Escudero, M., 2011 « The ionosphere: effects, GPS modeling and the benefits for space geodetic techniques » *Journal of Geodesy*, 85(12), 887–907. [doi:10.1007/s00190-011-0508-5](https://doi.org/10.1007/s00190-011-0508-5).

Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger H., et Wasle, E., 2008 « GNSS – Global Navigation Satellite Systems GPS, GLONASS, Galileo, and more » ISBN 978-3-211-73012-6 Springer Wien New York.

Huang, Z., et Yuan, H., 2013 « Analysis and improvement of ionospheric thin shell model used in SBAS for China region » *Advances in Space Research*, 51(11), 2035–2042. [doi:10.1016/j.asr.2012.12.018](https://doi.org/10.1016/j.asr.2012.12.018).

Hurtaud, Y., 2007 « Modélisation de la dynamique couplée des plasmas magnétosphérique et ionosphérique » Thèse de Doctorat, Université Toulouse III - Paul SABATIER (U.F.R. Physique, Chimie, Automatique), France.

Ibanga, J.I., Akpan, A.E., George, N.J., Ekanem, A.M., et George, A.M., 2018 « Unusual ionospheric variations before the strong Auckland Islands, New Zealand earthquake of 30th September, 2007 » *NRIAG J. Astron. Geophys.* 7 (1), 149–154. [doi:10.1016/j.nrjag.2017.12.007](https://doi.org/10.1016/j.nrjag.2017.12.007).

Igarashi, G., Saeki, S., Takahata, N., Sumikawa, K., Tasaka, S., Sasaki, Y., Takahashi, M., et Sano, Y., 1995 « Ground-water radon anomaly before the Kobe earthquake in Japan » *Science* 269(5220), 60–61.

Ikeya, M., 2004 « Earthquakes and Animals: from Folk Legends to Science » World Scientific Pub. Co, p. 296.

ISC 2019 « International Seismological Centre, ISC-GEM Earthquake Catalogue » <https://doi.org/10.31905/d808b825>.

Jehle, M., Rüegg, M., Small, D., Meier, E., et Nüesch, D., 2005 « Estimation of ionospheric TEC and Faraday rotation for L-band SAR » *Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere X*. <https://doi.org/10.1117/12.627618>.

Jehle, M., Ruegg, M., Zuberbuhler, L., Small, D., et Meier, E., 2009 « Measurement of Ionospheric Faraday Rotation in Simulated and Real Spaceborne SAR Data » *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(5), 1512–1523. [doi:10.1109/tgrs.2008.2004710](https://doi.org/10.1109/tgrs.2008.2004710).

Jin, S., Occhipinti, G., et Jin, R., 2015 « GNSS ionospheric seismology: Recent observation evidences and characteristics » *Earth-Science Reviews*, 147, 54–64. [doi:10.1016/j.earscirev.2015.05.003](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.05.003).

Jin, S., Jin, R., et Liu, X., 2019 « GNSS Atmospheric Seismology - Theory, Observations and Modeling » Springer Nature Singapore Pte Ltd. ISBN 978-981-10-3176-2

Jousset, P., Vong, C., Lemoine, A., et Gal, F., 2009 « Précurseurs de séismes majeurs : un état de l'art et étude bibliographique » Rapport final BRGM/RP-58282-FR, pp. 134, 36 fig., 2 tabl., 4 ann.

Jousset, P., « Les précurseurs dans la prévision du risque sismique: état des connaissances » *Géologues* n°169.

Kamogawa, M., 2006 « Preseismic lithosphere-atmosphere-ionosphere coupling » *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 87(40), 417. [doi:10.1029/2006eo400002](https://doi.org/10.1029/2006eo400002).

Kanamori, H., 2009 « Treatise on Geophysics, Volume 4: Earthquake Seismology » Elsevier, Broché: 7000 pp, ISBN-13: 978-0444534637.

Kaplan, E.D., et Hegarty, C.J., 2017 « Understanding GPS/GNSS. Principles and Applications» Third edition. London : Artech House, ISBN: 978-1-63081-058-0.

Karaboga, T., Canyilmaz, M., et Ozcan, O., 2018 « Investigation of the relationship between ionospheric foF2 and earthquakes » *Advances in Space Research*, 61(8), 2022–2030. [doi:10.1016/j.asr.2018.01.015](https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.01.015).

Kayal, J.R., 2008 « Microearthquake seismology and seismotectonics of South Asia » Dordrecht : Springer, pp. XX, 503. ISBN: 978-1-4020-8179-8.

Kelley, M.C., 2009 « The Earth's Ionosphere : Plasma Physics and Electrodynamics » Second Edition. Elsevier, ISBN-13: 978-0-12-088425-4.

Khegai, V., Legen'ka, A., Pulinets, S., et Kim, V., 2002 « Variations in the ionospheric F2 region prior to the catastrophic earthquake in Alaska on March 28, 1964, according to the data of the ground-based stations of the ionospheric vertical sounding » *Geomagn. Aeron.*, 42, 344–349.

Kherroubi, A., 2011 « Etude de la sismicité de l'offshore algérien » Thèse Doctorat, Université de Tlemcen, Algérie, 141 p.

Kim, V.P., Hegai, V.V., et Illich-Svitych, P.V., 1994 « On one possible ionospheric precursor of Earthquakes » *Physics Solid Earth*, 30, 3, 223-226.

King, C.-Y., Evans, W.C., Presser, T., et Husk, R., 1981 « Anomalous chemical changes in well water and possible relation to earthquakes » *Geophys Res Lett* 8:425–428.

- King, C.-Y., 1986** « Gas geochemistry applied to earthquake prediction: An overview » *J. Geophys. Res.* 91, B12, 12,269-12,281.
- King, C.-Y., Zhang, W., et King, B.-S., 1993** « Radon anomalies on three kinds of faults in California » *Pure Appl. Geophys.* 141, 111–124.
- Kintner, P.M., et Ledvina, B.M., 2005** « The ionosphere, radio navigation, and global navigation satellite systems » *Advances in Space Research*, 35(5), 788–811. [doi:10.1016/j.asr.2004.12.076](https://doi.org/10.1016/j.asr.2004.12.076).
- Kleusberg, A., 1990** « Comparing GPS and GLONASS » *GPS World*, November/December 1990. Vol. 1 N° 6, pp. 52–54.
- Kleusberg, A. et Teunissen, P.J.G., 1996** « GPS for geodesy » Springer-Verlag Berlin Heidelberg, ISBN 3-540-60785-4.
- Komjathy, A., 1997** « Global ionospheric total electron content mapping using the Global Positioning System » Thèse de Doctorat, Technical Report N° 188, University of New Brunswick, Canada.
- Kopp, G., Krivova, N., Wu, C.J., et Lean, J., 2016** « The Impact of the Revised Sunspot Record on Solar Irradiance Reconstructions » *Solar Physics*, 291(9-10), 2951–2965. [doi:10.1007/s11207-016-0853-x](https://doi.org/10.1007/s11207-016-0853-x).
- Krasikov, N.N., 2001** « The Characteristic of Electricity in Lower Layers of the Atmosphere. Doklady » *Earth Sciences*. 377(2): 263–265.
- Kuo, C.L., Lee, L.C., et Huba, J.D., 2014** « An improved coupling model for the lithosphere-atmosphere-ionosphere system » *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 119 (4), 3189–3205. <https://doi.org/10.1002/2013ja019392>.
- Lakshmi, K.R., Nagesh, Y., et Krishna, M.V., 2014** « Analysis on Predicting Earthquakes through an Abnormal Behavior of Animals » *International Journal of Scientific & Engineering Research*, Volume 5, Issue 4.
- Langley, R.B., 1997** « GLONASS: Review and Update » *GPS World*, Vol. 8 N° 7, pp. 46–51.
- Larkina, V.I., Migulin, V.V., Nalivaiko, A.V., Gershenzon, N.I., Gokhberg, M.B., Li, J., Meng, G., You, X., Zhang, R., Shi, H., et Han, Y., 2015** « Ionospheric total electron content disturbance associated with May 12, 2008, Wenchuan earthquake » *Geodesy and Geodynamics*, 6(2), 126–134. [doi:10.1016/j.geog.2015.01.003](https://doi.org/10.1016/j.geog.2015.01.003).
- Lassudrie – Duchesne P., Béniguel, Y., Bourdillon, A., Fleury, R., Valette, J.J., Le Huy, M., et Tran Thi, L., 2010** « Les effets de la scintillation ionosphérique sur le GPS » Paris : *Revue de Navigation*.

Leick, A., 2004 « GPS Satellite Surveying » Third edition. Hoboken, New Jersey : John Wiley & Sons, Inc., pp. 237–243.

Leick, A., Rapoport, L., et Tatarnikov, D., 2015 « GPS satellite surveying » 4th edn. Wiley, Hoboken, New Jersey, ISBN 978-1-118-67557-1.

Li, F., 2007 « Etude dans l'ionosphère de la densité électronique et de la turbulence électrostatique en fonction de l'activité séismique » Thèse de Doctorat, Université d'Orléans, France.

Lim, B.J.M., et Leong, E.C., 2018 « On the detection of anomalous seismo-ionospheric behavior in the presence of space weather stimuli for large earthquakes » *Adv. Space Res.* [doi:10.1016/j.asr.2018.10.020](https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.10.020).

Liperovsky, V.A., et Shalimov, S.L., 1983 « Observation of VLF emissions, related with seismic activity, on the Intercosmos-19 satellite » *Geomagn. Aeronom.* 23: 684–687.

Liperovsky, V.A., Pokhotelov, O.A., Liperovskaya, E.V., Parrot, M., Meister, C.-V., et Alimov, O.A., 2000 « Modification of sporadic E-layers caused by seismic activity » *S. Geophys.* 21, 449–486.

Liperovsky, V.A., Meister, C.-V., Liperovskaya, E.V., et Bogdanov, V.V., 2008 « On the generation of electric field and infrared radiation in aerosol clouds due to radon emanation in the atmosphere before earthquakes » *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 8(5), 1199–1205. [doi:10.5194/nhess-8-1199-2008](https://doi.org/10.5194/nhess-8-1199-2008).

Liperovsky, V.A., Pokhotelov, O.A., Meister, C.-V., et Liperovskaya, E.V., 2008 « Physical models of coupling in the lithosphere-atmosphere-ionosphere system before earthquakes » *Geomagnetism and Aeronomy*, 48(6), 795–806. [doi:10.1134/s0016793208060133](https://doi.org/10.1134/s0016793208060133).

Liu, J.Y., Chen, Y.I., Pulinets, S.A., Tsai, Y.B., et Chuo, Y.J., 2000 « Seismo-ionospheric signatures prior to $M \geq 6.0$ Taiwan earthquakes » *Geophysical Research Letters*, 27(19), 3113–3116. [doi:10.1029/2000gl011395](https://doi.org/10.1029/2000gl011395).

Liu, J.Y., Chuo, Y.J., Pulinets, S.A., Tsai, H.F., et Zeng, X., 2002 « A study on the TEC perturbations prior to the Rei-Li, Chi-Chi and Chia-Yi earthquakes » In "Seismo-Electromagnetics: Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling", Eds. Hayakawa M and Molchanov OA, TERRAPUB, Tokyo, pp. 297–301.

Liu, J.Y., Chen, Y.I., Chen, C.H., Liu, C.Y., Chen, C.Y., Nishihashi, M., Li, J.Z., Xia, Y.Q., Oyama, K.I., Hattori, K., et Lin, C.H., 2009 « Seismoionospheric GPS total electron content anomalies observed before the 12 May 2008 $M_w 7.9$ Wenchuan earthquake » *J. Geophys. Res.* 114: A04320.

Lognonné, P., Karakostas, F., Rolland, L., et Nishikawa, Y., 2016 « Modeling of atmospheric-coupled Rayleigh waves on planets with atmosphere: From Earth observation to

Mars and Venus perspectives » *The Journal of the Acoustical Society of America*, 140 (2), 1447–1468, [doi:10.1121/1.4960788](https://doi.org/10.1121/1.4960788).

Lomnitz, C., 1994 « *Fundamentals of Earthquake Prediction* » Wiley, New York, 326 pp.

López-Marinas, J.M., et Salord, R., 1990 « El periodo sísmico oranes de 1790 a la luz de la documentación de los archivos españoles » MOPU Instituto Geográfico Nacional, Madrid, Spain, 64 pp. (in Spanish).

Maget, V., 2007 « Développement et comparaison de méthodes d'assimilation de données appliquées à la restitution de la dynamique des ceintures de radiation terrestres » Thèse de Doctorat, Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace, Université de Toulouse, France.

Malins, J.B., White, S.M., Taylor, G.B., Stovall, K., et Dowell, J., 2018 « Modeling the Ionosphere with GPS and Rotation Measure Observations » *Radio Science*, 53(6), 724–738. [doi:10.1029/2018rs006559](https://doi.org/10.1029/2018rs006559).

Mareev, E.A., Iudin, D.I., et Molchanov, O.A., 2002 « Mosaic source of internal gravity waves associated with seismic activity. In "Seismo-Electromagnetics: Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling » Eds. Hayakawa M and Molchanov OA, TERRAPUB, Tokyo, pp. 335–342.

Martin, P.L., Bray, J.D., et Scaife, A.M.M., 2016 « Limits on the validity of the thin-layer model of the ionosphere for radio interferometric calibration » *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 459(4), 3525–3531. [doi:10.1093/mnras/stw853](https://doi.org/10.1093/mnras/stw853).

Martire, L., Brissaud, Q., Lai, V.H., Garcia, R.F., Martin, R., Krishnamoorthy, S., Komjathy, A., Cadu, A., Cutts, J.A., Jackson J.M., Mimoun, D., Pauken M.T., et Sournac, A., 2018 « Numerical Simulation of the Atmospheric Signature of Artificial and Natural Seismic Events » *Geophysical Research Letters*. [doi:10.1029/2018gl080485](https://doi.org/10.1029/2018gl080485).

Mekebret, I., 2017 « Synthèse hydrogéologique et origine de la salinité des eaux thermo-minérales du littoral oranais par les méthodes géochimiques et isotopiques » Mémoire de Magister, Université d'Oran 2, Algérie.

Memarzadeh, Y., 2009 « Ionospheric modeling for precise GNSS applications » Thèse de Doctorat, Delft University of Technology, Holland.

Miklavcic, I., Radolic, V., Vukovic, B., Poje, M., Varga, M., Stanic, D., et Planinic, J., 2008 « Radon anomaly in soil gas as an earthquake precursor » *Appl. Radiat. Isot.* 66, 1459–1466.

Molchanov, O.A., Hayakawa, M., et Rafalsky, V.A., 1995 « Penetration characteristics of electromagnetic emissions from underground seismic source into the atmosphere, ionosphere and magnetosphere » *J. Geophys. Res.*, 100, 1691–1712, 1995.

Molchanov, O., Fedorov, E., Schekotov, A., Gordeev, E., Chebrov, V., Surkov, V., Rozhnoi, A., Andreevsky, S., Iudin, D., Yunga, S., Lutikov, A., Hayakawa, M., et Biagi, P.F., 2004

« Lithosphere-atmosphere-ionosphere coupling as governing mechanism for preseismic short-term events in atmosphere and ionosphere » *Natural Hazards and Earth System Science*, 4(5/6), 757–767. [doi:10.5194/nhess-4-757-2004](https://doi.org/10.5194/nhess-4-757-2004).

Montilla, J.A.P, Hamdache M., et Casado, C.L., 2003 « Seismic hazard in Northern Algeria using spatially smoothed seismicity. Results for peak ground acceleration » *Tectonophysics* 372:105–119. [doi:10.1016/S0040-1951\(03\)00234-8](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(03)00234-8).

Mutschlecner, J.P., et Whitaker, R.W., 2005 « Infrasound from earthquakes » *Journal of Geophysical Research D: Atmospheres*, 110 (1), 1–11. [doi:10.1029/2004JD005067](https://doi.org/10.1029/2004JD005067).

Nadji, A., 2010 « Etude sismotectonique du littoral oranais contribution des méthodes géophysiques à la définition de l'aléa sismique de la région Oran » Thèse de Doctorat, université d'Oran, Algérie.

Namgaladze, A.A., Zolotov, O.V., Zakharenkova, I.E., Shagimuratov, I.I. et Martynenko, O.V., 2009 « Ionospheric total electron content variations observed before earthquakes: Possible physical mechanism and modeling » *Proceedings of the MSTU*, 12, 308–315. <http://goo.gl/A8cLx>.

Namgaladze, A.A., Zolotov, O.V., et Prockhorov, B.E., 2011 « The TEC signatures as strong seismic event precursors » *Proceedings of the XXX URSI General Assembly and Scientific Symposium, Istanbul, 13-20 August 2011*, 1-4. [doi:10.1109/URSIGASS.2011.6051048](https://doi.org/10.1109/URSIGASS.2011.6051048).

Namgaladze, A., Karpov, M., et Knyazeva, M., 2018 « Aerosols and seismo-ionosphere coupling: A review » *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 171, 83–93. [doi:10.1016/j.jastp.2018.01.014](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.01.014).

Nasyrov, G.A., 1978 « Correlation between night sky emissions and seismic activity » *Izvestiya Acad. Sci. Tadjh. SSR, N° 2*, pp. 119–122.

Nekrasov, A. K., Shalimov, S. L., Shukla, P. K., et Stenflo, L., 1995 « Nonlinear disturbances in the ionosphere due to acoustic gravity waves » *J. Atmos. Terr. Phys.*, 57, 737–741.

Nicolas, M., 2009 « Ondes et électromagnétisme » *Parcours ingénieur*, Dunod, P.230, ISBN 978-2-10-054276-5.

Nohutcu, M., 2009 « Development of a MATLAB based software package for ionosphere modeling » Thèse de Doctorat, The Graduate School of Natural and Applied Sciences of the Middle East Technical University.

Norsuzila, Y., Abdullah M., et Ismail, M., 2008 « Leveling Process of Total Electron Content (TEC) Using Malaysian Global Positioning System (GPS) Data » *American J. of Engineering and Applied Sciences* 1 (3): 223-229, 2008 ISSN 1941–7020, [DOI: 10.3844/ajeassp.2008.223.229](https://doi.org/10.3844/ajeassp.2008.223.229).

Occhipinti, G., 2006 « Observations multi-paramètres et modélisation de la signature ionosphérique du grand séisme de Sumatra » Thèse de Doctorat, Institut de Physique du Globe de Paris. <https://www.gps.caltech.edu/~ninto>.

Ondoh, T., 2004 « Anomalous sporadic-E ionization before a great earthquake » *Advances in Space Research*, 34(8), 1830–1835. [doi:10.1016/j.asr.2003.05.044](https://doi.org/10.1016/j.asr.2003.05.044).

Opperman, B.D.L., 2007 « Reconstructing ionospheric TEC over south Africa using signals from a regional GPS network » Thèse de Doctorat, Rhodes University.

Orús, R.P., Hernández-Pajares, M., Juan, J.M., et Sanz, J., 2005 « Improvement of global ionospheric VTEC maps by using kriging interpolation technique » *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 67(16), 1598–1609. [doi:10.1016/j.jastp.2005.07.017](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2005.07.017).

Parrot, M., Achache, J., Berthelier, J.J., Blanc, E., Deschamp, A., Lefeuvre, F., Menvielle, M., Plantet, J.L., Tarits, P., et Vilain, J.P., 1993 « High Frequency seismo-electromagnetic effects » *Physics of Earth and Planetary Interiors* 77: 65–83.

Parrot, M., 2002 « The micro-satellite DEMETER » *Journal of Geodynamics*, 33(4-5), 535–541. [doi:10.1016/s0264-3707\(02\)00014-5](https://doi.org/10.1016/s0264-3707(02)00014-5).

Parrot, M., Berthelier, J.J., Lebreton, J.P., Sauvaud, J.A., Santolík, O., et Blecki, J., 2006 « Examples of unusual ionospheric observations made by the Demeter satellite over seismic regions » *Physics and Chemistry of the Earth*. 31 : 486–495.

Parrot, M., 2012 « Statistical analysis of automatically detected ion density variations recorded by DEMETER and their relation to seismic activity » *Ann. Geophys.*, 55(1), 149–155, [doi:10.4401/5270](https://doi.org/10.4401/5270).

Pasquet, S., 2014 « Apport des méthodes sismiques à l'hydrogéophysique : importance du rapport Vp/Vs et contribution des ondes de surface » Thèse de Doctorat, Géophysique. Université Pierre et Marie Curie, France. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01099300>.

Paudel, S.R., Banjara, S.P., Wagle, A., et Freund, F.T., 2018 « Earthquake chemical precursors in groundwater: a review » *Journal of Seismology*. [doi:10.1007/s10950-018-9739-8](https://doi.org/10.1007/s10950-018-9739-8).

Pavelyev, A.G., Liou, Y.A., Wickert, J., Schmidt, T., Pavelyev, A.A., et Liu, S.F., 2007 « Effects of the ionosphere and solar activity on radio occultation signals: Application to CHALLENGING Minisatellite Payload satellite observations » *J. Geophys. Res.*, 112, A06326, [doi:10.1029/2006JA011625](https://doi.org/10.1029/2006JA011625).

Pérez, N.M., Hernández-del-Valle, G., Igarashi, G., Trujillo, I., Nakai, S., Sumino, H., et Wakita, H., 2008 « Searching and detecting earthquake geochemical precursors in CO₂-rich groundwaters from Galicia, Spain » *Geochem. J.* 2008, 42, 75–83.

Petrović, J., et Dragović, S., 2019 « Radon as potential earthquake precursor » (Integrations of satellite and ground-based observations and multi-disciplinarity in research and prediction of

different types of hazards in Solar system). Book of Abstracts, Eds. Aleksandra Nina, Milan Radovanović and Vladimir A. Srećković.

Pham, T.T.H., 2012 « Analyse et interprétation de la variation régulière du champ magnétique terrestre au Vietnam et modélisation de l'ionosphère » Thèse de Doctorat, Géophysique. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00834192>

Pierce, E.T., 1976 « Atmospheric electricity and earthquake prediction » *Geophys. Res. Lett.*, 3, 185–188.

Pisa, D.E., Němec, F., Parrot, M.J., et Santolík, O., 2017 « Attenuation of electromagnetic waves at the frequency approximately 1.7 kHz in the upper ionosphere observed by the DEMETER satellite in the vicinity of earthquakes » *Annals of Geophysics, INGV*, 2012, 55, 7 p. 157–163. 10.4401/ag-5276. insu-01295634.

Potgieter, M., 2013 « Solar Modulation of Cosmic Rays » *Living Reviews in Solar Physics*, 10. [doi:10.12942/lrsp-2013-3](https://doi.org/10.12942/lrsp-2013-3).

Priyadarshi, S., Kumar, S., et Singh, A.K., 2011 « Changes in total electron content associated with earthquakes ($M > 5$) observed from GPS station, Varanasi, India » *Geomatics, Natural Hazards and Risk*. 2(2), pp. 123–139.

Pulinets, S.A., Legen'ka, A.D., et Alekseev, V.A., 1994 « Pre-earthquakes effects and their possible mechanisms in "Dusty and Dirty Plasmas, Noise and Chaos in Space and in the Laboratory » Plenum Publishing, New York, pp. 545–557.

Pulinets, S.A., Boyarchuk, K.A., Khegai, V.V., Kim, V.P., et Lomonosov, A.M., 2000 « Quasielectrostatic model of Atmosphere-Thermosphere-Ionosphere Coupling » *Advances in Space Research* 26 (8), 1209–1218.

Pulinets, S.A., Boyarchuk K.A., Lomonosov, A.M., Khegai, V.V., et Liu, J.Y., 2002 « Ionospheric Precursors to Earthquakes: A Preliminary Analysis of the foF2 Critical Frequencies at Chung-Li Ground-Based Station for Vertical Sounding of the Ionosphere (Taiwan Island) » *Geomagnetism and Aeronomy*, 42, 508–513.

Pulinets, S.A., et Legen'ka, A.D., 2003 « Spatial-Temporal Characteristics of the Large Scale Disturbances of Electron Concentration Observed in the F-Region of the Ionosphere before Strong Earthquakes » *Cosmic Research*, 41, 221–229. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1024046814173>.

Pulinets, S.A., 2004 « Ionospheric Precursors of Earthquakes : Recent Advaces in Theory and Practical Applications » *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences. TAO* 15(3), 413–435.

Pulinets, S.A., et Boyarchuk, K., 2004 « Ionospheric Precursors of Earthquakes » Springer Berlin Heidelberg New York. ISBN 3-540-20839-9.

Pulinets, S.A., Leyva-Contreras, A., Bisiacchi-Giraldi, G., et Ciruolo, L., 2005 « Total electron content variations in the ionosphere before the Colima, Mexico, earthquake of 21 January 2003 » *Geofísica Internacional* (2005), Vol. 44, Num. 4, pp. 369-377.

Pulinets, S.A., et Ouzounov, D., 2011 « Lithosphere–Atmosphere–Ionosphere Coupling (LAIC) model – An unified concept for earthquake precursors validation » *Journal of Asian Earth Sciences*, 41(4-5), 371–382. [doi:10.1016/j.jseas.2010.03.005](https://doi.org/10.1016/j.jseas.2010.03.005).

Pulinets, S.A., Ouzounov, D.P., Karelin, A.V., et Davidenko, D.V., 2015 « Physical bases of the generation of short-term earthquake precursors: A complex model of ionization-induced geophysical processes in the lithosphere-atmosphere-ionosphere-magnetosphere system » *Geomagnetism and Aeronomy*, 55(4), 521–538. [doi:10.1134/s0016793215040131](https://doi.org/10.1134/s0016793215040131).

PZ-90.11, 2014 « PARAMETRY ZEMLI 1990 » Moscow : Military Topographic Department of the General Staff of Armed Forces of the Russian Federation.

PZ-90.11, 2018 « System of Geodetic Parameters “Parametry Zemli 1990” » PZ-90.11_v.1.2_04.11.2018_GUSEV_I.V.

Ray, S., 2018 « Study of Seismo-Ionosphere Coupling Using Perturbation in Very Low Frequency Radio Signal » *Exploring the Universe: From Near Space to Extra-Galactic*, 597–609. [doi:10.1007/978-3-319-94607-8_46](https://doi.org/10.1007/978-3-319-94607-8_46).

Rifa, E., 2011 « Études des relations entre activités solaire et géomagnétique » Intership report / UPS ; CNES, Toulouse, France. hal-01295599.

Riggio, A. et Santulin, M., 2015 « Earthquake forecasting: a review of radon as seismic precursor » *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata* [DOI 10.4430/bgta0148](https://doi.org/10.4430/bgta0148).

Ritter, P., Lühr, H., Maus, S., et Viljanen, A., 2004 « High-latitude ionospheric currents during very quiet times: their characteristics and predictability » *Annales Geophysicae*, 2004. © European Geosciences Union 200. SRef-ID: 1432-0576/ag/2004-22-2001.

Romanovskaya, Y.V., et Namgaladze, A.A., 2014 « Seismo-ionospheric precursors of strong earthquakes: analysis of total electron content observations » *Proceedings of the 10th Intl Conf. “Problems of Geocosmos”* (Oct 6-10, 2014, St. Petersburg, Russia).

Rong, Y., Jackson, D.D., et Kagan, Y.Y., 2003 « Seismic gaps and earthquakes » *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108(B10). [doi:10.1029/2002jb002334](https://doi.org/10.1029/2002jb002334).

Röttger, J., 2004 « Ionosphere and atmosphere research with radars » Paris: UNESCO Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), Geophysics and Geochemistry.

Ryutova, M., 2018 « Physics of Magnetic Flux Tubes » 2nd edn. ISBN 978-3-319-96360-0, *Astrophysics and Space Science Library* 455, Springer, Berlin.

Sadovsky, M.A., Nersesov, I.L., Nigmatullaev, S.K., Latynina, L.A., Lukk, A.A., Semenov, A.N., Simbireva, I.G. et Ulomov, V.I., 1972 « The processes preceding strong earthquakes in some regions of Middle Asia » In: E.F. Savarensky and T. Rikitake (Editors), Forerunners of Strong Earthquakes. Tectonophysics, 14(3/4): 295–307.

Sammuneh, M.A., 2003 « Contribution au positionnement en temps réel par GPS, prédiction de la correction ionosphérique » Thèse de Doctorat, Observatoire de paris, France.

Sarkar, S., Gwal, A.K., et Parrot, M. 2007 « Ionospheric variations observed by the DEMETER satellite in the mid-latitude region during strong earthquakes » Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 69(13), 1524–1540. [doi:10.1016/j.jastp.2007.06.006](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2007.06.006).

Schaer, S., 1999 « Mapping and Predicting the Earth's Ionosphere Using the Global Positioning System » Ph.D. Thesis, Astronomical Institute, University of Berne, 205 pp.

Schunk, R.W., et Nagy, A.F., 2000 « Ionospheres - Physics, Plasma Physics, and Chemistry » Cambridge Atmospheric and Space Science Series, pp. 1-554, ISBN 0 521 60770 1.

Seeber, G., 2003 « Satellite geodesy, 2nd completely revised and extended edition » Berlin; New York: Walter de Gruyter.

Shalimov, S., et Gokhberg, M., 1998 « Lithosphere–ionosphere coupling mechanism and its application to the earthquake in Iran on June 20, 1990. A review of ionospheric measurements and basic assumptions » Physics of the Earth and Planetary Interiors, 105(3-4), 211–218. [doi:10.1016/s0031-9201\(97\)00092-7](https://doi.org/10.1016/s0031-9201(97)00092-7).

Sharma, G., et Raju, P.L.N., 2019 « Ionosphere TEC anomaly detection prior to Earthquake using GPS observation data A case study of 2018 Mw 6.2 Tajikistan Earthquake. Coordinates.

Sheldrake, R., 1999 « Dogs That Know When Their Owners Are Coming Home: And Other Unexplained Powers of Animals » Three Rivers Press, p. 368.

Sheldrake, R., 2003 « The Sense of Being Stared at: And Other Unexplained Powers of the Human Mind » Three Rivers Press, p. 384.

Shvets, A.V., Hayakawa, M., Molchanov, O.A., et Ando, Y., 2004 « A study of ionospheric response to regional seismic activity by VLF radio sounding » Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 29(4-9), 627–637. [doi:10.1016/j.pce.2003.08.063](https://doi.org/10.1016/j.pce.2003.08.063).

Sickle, J.V., 2008 « GPS for Land Surveyors » Third Edition, CRC Press Taylor & Francis Group, ISBN-13: 978-0-203-30522-5.

Sierro, M.C., 2010 « Sondages atmosphériques à partir des signaux GNSS » Thèse de Doctorat, Université de Bretagne Occidentale, Brest, France.

Sobolev, G.A., et Husamiddinov, S.S., 1985 « Pulsed electromagnetic Earth and ionospheric field disturbances accompanying strong earthquakes » Earthquake Prediction Res. N°3: 33–45.

Solanki, S.K., Usoskin, I.G., Kromer, B., Schüssler, M., et Beer, J., 2004 « Unusual activity of the Sun during recent decades compared to the previous 11,000 years » *Nature*, 431(7012), 1084–1087. [doi:10.1038/nature02995](https://doi.org/10.1038/nature02995).

Sorokin, V.M., Chmyrev, V.M., et Yaschenko, A.K., 2005 « Theoretical model of DC electric field formation in the ionosphere stimulated by seismic activity » *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 67(14), 1259–1268. [doi:10.1016/j.jastp.2005.07.013](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2005.07.013).

Sotomayor-Beltran, C., 2018 « Ionospheric anomalies preceding the low-latitude earthquake that occurred on April 16, 2016 in Ecuador » *J. Atmos. Solar-Terrestrial Phys.*. [doi:10.1016/j.jastp.2018.11.003](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.11.003).

Spit, J., 2011 « Total electron content reconstruction using triple frequency GNSS signals » Thèse de Doctorat, University of Liege.

Stankov, S.M., Warnant, R., et Stegen, K., 2009 « Trans-ionospheric GPS signal delay gradients observed over mid-latitude Europe during the geomagnetic storms of October–November 2003 » *Advances in Space Research*, 9 : Vol. 43. pp. 1314–1324.

Stefansson, R., 2011 « *Advances in Earthquake Prediction, Research and Risk Mitigation* » Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 300 pp, ISBN: 978- 3-540-47569-9.

Stich, D., Ammon, C.J., et Morales, J., 2003 « Moment tensor solutions for small and moderate earthquakes in the Ibero-Maghreb region » *J. Geophys. Res.*, 108(B3), 2148, [doi:10.1029/2002JB002057](https://doi.org/10.1029/2002JB002057).

Stich, D., Serpelloni, E., Mancilla, F-L., et Morales, J., 2006 « Kinematics of the Iberia–Maghreb plate contact from seismic moment tensors and GPS observations » *Tectonophysics*, 426, 3- 4, 295–317, [doi:10.1016/j.tecto.2006.08.004](https://doi.org/10.1016/j.tecto.2006.08.004).

Storchak, D.A., Di Giacomo, D., Bondár, I., Engdahl, E.R., Harris, J., Lee, W.H.K., Villaseñor A., et Bormann, P., 2013 « Public Release of the ISC-GEM Global Instrumental Earthquake Catalogue (1900-2009) » *Seism. Res. Lett.*, 84, 5, 810–815, [doi: 10.1785/0220130034](https://doi.org/10.1785/0220130034).

Storchak, D.A., Di Giacomo, D., Engdahl, E.R., Harris, J., Bondár, I., Lee, W.H.K., Bormann P., et Villaseñor, A., 2015 « The ISC-GEM Global Instrumental Earthquake Catalogue (1900-2009): Introduction » *Phys. Earth Planet. Int.*, 239, 48–63, [doi: 10.1016/j.pepi.2014.06.009](https://doi.org/10.1016/j.pepi.2014.06.009).

Sugiura, M., et Poros, D., 1969 « An improved model equatorial electrojet with a meridional current system » *Journal of Geophysical Research* 74 (16), 4025–4034.

Sykes, L.R., 1971 « Aftershock zones of great earthquakes, seismicity gaps, and earthquake prediction for Alaska and the Aleutians » *Journal of Geophysical Research*, 76(32), 8021–8041. [doi:10.1029/jb076i032p08021](https://doi.org/10.1029/jb076i032p08021).

- Tachema, A., 2012** « Modélisation en 3D de la couche ionosphérique par des données GPS: utilisation d'estimateurs des moindres carrés et du filtre de Kalman » Mémoire de Magister, Centre des Techniques Spatiales, Oran, Algérie.
- Tachema, A., et Nadji, A., 2019** « Geodetic contribution to predict the seismological activity of the Italian metropolis by the ionospheric variant of GPS_TEC » Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.12.006>.
- Tachema, A., et Nadji, A., 2020** « Contribution of ionospheric TEC anomalies to detecting the seismic precursors related to the 2008 Oran-Algeria event » Advances in Space Research, doi: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.03.007>.
- Teunissen, P.J.G., et Montenbruck, O., 2017** « Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems » Cham : Springer. p. 31–1327. ISBN: 978-3-319-42926-7.
- Todorova, S., Hobiger, T., Weber, R., et Schuh, H., 2005** « Using GPS for determination of the ionosphere » Proceedings of the International Scientific Conference SGEM 2005, June 13-17, Albena, Bulgaria.
- Tomer, A., 2016** « Radon as a Earthquake Precursor: A Review » International Journal of Science, Engineering and Technology, Volume 4 Issue 6: 2016, pp. 815-822.
- Tsunogai, U., et Wakita, H., 1995** « Precursory Chemical Changes in Ground Water: Kobe Earthquake, Japan » Science 269(5220), 61–63.
- Ulomov, V.I., et Mavashev, B.Z., 1967** « On forerunners of strong earthquakes » Doklady Akademii nauk SSSR, Vol. 176, pp. 319–322.
- Ulukavak, M., et Yalçinkaya, M., 2017** « Investigation of the relationship between ionospheric TEC anomaly variations and fault types before the earthquakes » ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., IV-4/W4, 383–388, <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-4-W4-383-2017>.
- Ulukavak, M., Yalçinkaya, M., Kayıkçı, E.T., Öztürk, S., Kandemir, R., et Karlı, H., 2020** « Analysis of Ionospheric TEC Anomalies for Global Earthquakes during 2000-2019 with respect to Earthquake Magnitude ($M_w \geq 6.0$) » Journal of Geodynamics, 101721. [doi:10.1016/j.jog.2020.101721](https://doi.org/10.1016/j.jog.2020.101721).
- Usoskin, I.G., Solanki, S.K., et Kovaltsov, G.A., 2007** « Grand minima and maxima of solar activity: new observational constraints » Astronomy & Astrophysics, 471(1), 301–309. [doi:10.1051/0004-6361:20077704](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20077704).
- Uyeda, S., Nagao, T., et Kamogawa, M., 2009** « Short-term earthquake prediction: Current status of seismo-electromagnetics » Tectonophysics. 470, 205–213.

- Vallée, M., 2007** « Rupture Properties of the Giant Sumatra Earthquake Imaged by Empirical Green's Function Analysis » *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vols. 97 (1A): S103-S114. [doi:10.1785/0120050616](https://doi.org/10.1785/0120050616).
- Vallières, X., 2002** « Les échelles de la turbulence dans l'ionosphère des hautes latitudes et leurs signatures sur les échos des radars HF du réseau SuperDARN » Thèse de Doctorat. Planétologie et astrophysique de la terre. Université d'Orléans. HAL Id: tel-00689878.
- Vershinin, E.F., Buzevich, A.V., Yumoto, K., Saita K., et Tanaka, Y., 1999** « Correlations of seismic activity with electromagnetic emissions and variations in Kamchatka region » In *Atmospheric and Ionospheric Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes*, Ed. by M. Hayakawa. Terra Scientific Publishing Company, Tokyo: 513-517.
- Villiger, A., et Dach, R., (eds.) 2019** « International GNSS Service Technical Report 2018 (IGS Annual Report) » IGS Central Bureau and University of Bern; Bern Open Publishing [DOI: 10.7892/boris.130408](https://doi.org/10.7892/boris.130408).
- Warwick, J.W., Stoker, C., et Meyer, T.R., 1982** « Radio emission associated with rock fracture: Possible application to the Great Chilean Earthquake of May 22, 1960 » *Journal of Geophysical Research*, 87(B4), 2851. [doi: 10.1029/jb087ib04p02851](https://doi.org/10.1029/jb087ib04p02851).
- Wattananikorn, K., Kanaree, M., et Wiboolsake, S., 1998** « Soil gas radon as an earthquake precursor: some considerations on data improvement » *Radiation Measurements*, 29(6), 593–598. [doi: 10.1016/s1350-4487\(98\)00079-1](https://doi.org/10.1016/s1350-4487(98)00079-1).
- Wielgosz, P., Grejner-Brzezinska, D., et Kashani, I., 2003** « Regional Ionosphere Mapping with Kriging and Multiquadric Methods » *Journal of Global Positioning Systems* (2003) Vol. 2, N°.1: 48-55, [DOI: 10.5081/jgps.2.1.48](https://doi.org/10.5081/jgps.2.1.48).
- Wikelski, M., Mueller, U., Scocco, P., Catorci, A., Desinov, L., Belyaev, M., Keim, D., Pohlmeier, W., Fichteler, G., et Mai P.M., 2020** « Potential short-term earthquake forecasting by farm-animal monitoring » *bioRxiv*, doi: <https://doi.org/10.1101/2020.01.19.911313>.
- Willis, P., Soudarin, L., Jayles, C., et Rolland, L., 2007** « DORIS applications for solid Earth and atmospheric sciences » *Compt Rendus Geosci* 339(16):949–959. [doi:10.1016/j.crte.2007.09.015](https://doi.org/10.1016/j.crte.2007.09.015).
- Wyllie, S.J., 2007** « Modelling the Temporal Variation of the Ionosphere in a Network-RTK Environment » Thèse de Doctorat, School of Mathematical and Geospatial Sciences RMIT University, Melbourne, Australia.
- Xiang, Y., et Gao, Y., 2019** « An Enhanced Mapping Function with Ionospheric Varying Height » *Remote Sensing*, 11(12), 1497. [doi:10.3390/rs11121497](https://doi.org/10.3390/rs11121497).

Xu, T., Zhang, H., Hu, Y., et Wu, J., 2015 « Electric field penetration into the ionosphere in the presence of anomalous radon emanation » *Advances in Space Research*, 55(12), 2883–2888. [doi:10.1016/j.asr.2015.03.015](https://doi.org/10.1016/j.asr.2015.03.015).

Yelles-Chaouche, A.K., Djellit, H., Beldjoudi, H., Bezzeghoud, M., et Buforn, E., 2004 « The Ain Temouchent (Algeria) Earthquake of December 22nd, 1999 » *Pure and Applied Geophysics*, 161(3), 607–621. [doi:10.1007/s00024-003-2465-2](https://doi.org/10.1007/s00024-003-2465-2).

Yelles-Chaouche, A.K., Boudiaf, A., Djellit, H., et Bracene, R., 2006 « La tectonique active de la région nord-algérienne » *Comptes Rendus Geoscience*, 338(1-2), 126–139. [doi:10.1016/j.crte.2005.11.002](https://doi.org/10.1016/j.crte.2005.11.002).

Zakharenkova, I.E., Shagimuratov, I.I., Krankowski, A., et Lagovsky, A.F., 2007 « Precursory phenomena observed in the total electron content measurements before great Hokkaido earthquake of September 25, 2003 (M = 8.3) » *Studia Geophysica et Geodaetica*, 51, 267–278. [doi:10.1007/s11200-007-0014-7](https://doi.org/10.1007/s11200-007-0014-7).

Zakharenkova, I.E., et Shagimuratov, I.I., 2009 « Using of global and regional ionospheric maps to study of the preseismic ionosphere modification » Source: IEEE Xplore, West Department of IZMIRAN, Russian Academy of Sciences, conference paper: May 2009, [doi: 10.1049/cp.2009.0025](https://doi.org/10.1049/cp.2009.0025).

Zhang, X., Qian, J., Ouyang, X., Shen, X., Cai, J., et Zhao, S., 2009 « Ionospheric electromagnetic perturbations observed on DEMETER satellite before Chile M7.9 earthquake » *Earthq Sci.* 22: 251–255.

Zhu, R., Yang, D., Jing, F., Yang, J. et Ouyang, X., 2008 « Ionospheric perturbations before Pu'er earthquake observed on Demeter » *Acta Seismologica Sinica*. 21(1): 77–81, 2008.

Zhu, W., Jung, H.-S., et Chen, J.-Y., 2019 « Synthetic Aperture Radar Interferometry (InSAR) Ionospheric Correction Based on Faraday Rotation: Two Case Studies » *Applied Sciences*, 9(18), 3871. [doi:10.3390/app9183871](https://doi.org/10.3390/app9183871).

Zlotnicki, J., Le Mouél, J.L., Kanwar, R., Yvetot, P., Vargemezis, G., Menny, P., et Fauquet, F., 2006 « Ground-based electromagnetic studies combined with remote sensing based on Demeter mission: A way to monitor active faults and volcanoes » *Planet. Space Sci.* 54: 541–557.

Zolotov, O.V., Namgaladze, A.A., Zakharenkova, I.E., Martynenko, O.V., et Shagimuratov, I.I., 2012 « Physical interpretation and mathematical simulation of ionospheric precursors of earthquakes at midlatitudes » *Geomagnetism and Aeronomy*, 52(3), 390–397. [doi:10.1134/s0016793212030152](https://doi.org/10.1134/s0016793212030152).

Annexes

Annexe A. Les stations de référence exploitées

Afin de détecter les perturbations ionosphériques associées à de puissants séismes, il est indispensable de modéliser la couche ionosphérique par le biais d'extraction de sa propre information 'TEC' le long du trajet du signal électromagnétique du satellite GPS jusqu'aux stations de référence permanentes au sol (dans notre étude : stations IGS). Vu le manque accru de ces stations permanentes sur l'ensemble du territoire national, voire même sur le continent africain, nous nous sommes orientés vers l'exploitation de celles de la région de l'Europe occidentale afin de donner une fiable représentation ionosphérique.

Après avoir visité plusieurs sites Web (HTTP et FTP,...) pour le téléchargement des fichiers GPS journaliers (Observations et Navigation Rinex files), nous avons opté aux sites suivants :

- <http://sopac-old.ucsd.edu/dataBrowser.shtml> (site web de l'Université de California San Diego et The Scripps Orbit and Permanent Array Center).
- <ftp://data-out.unavco.org/pub/rinex/> (FTP archivé par le consortium UNAVCO, The University NAVSTAR Consortium, organisation internationale avec plus de 90 universités et institutions de recherche, formée en 1984).
- <ftp://geodesy.noaa.gov/cors/rinex/> ou <ftp://cors.ngs.noaa.gov/cors/rinex/> (FTP archivé par l'Agence américaine d'observation océanique et atmosphérique (NOAA) qui gère le système Continuously Operating Reference Stations, CORS).
- Aussi, afin de télécharger les données d'observations et de navigation GNSS, nous avons utilisé le logiciel RTKLIB (ensemble de programmes pour le positionnement standard et précis par GNSS) et son interface graphique **RTKGET v2.4.3**.

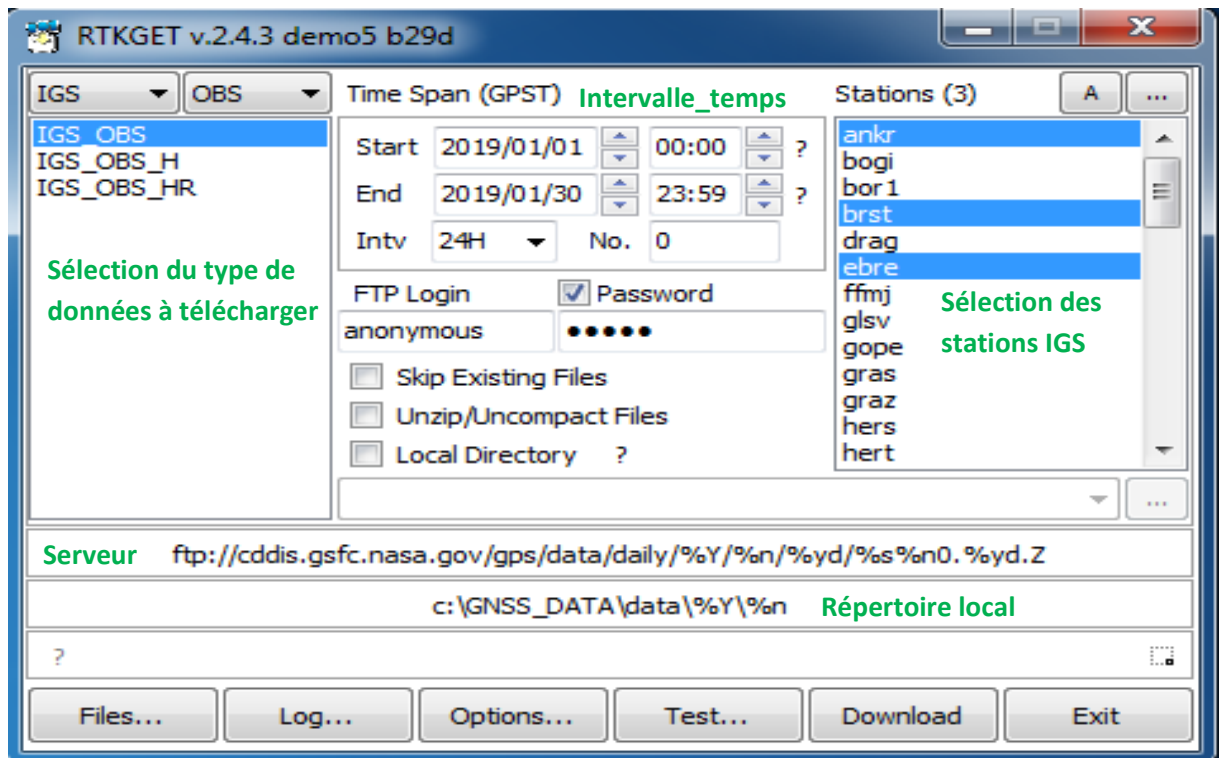


Figure A.1 : Fenêtre principale de RTKGET.

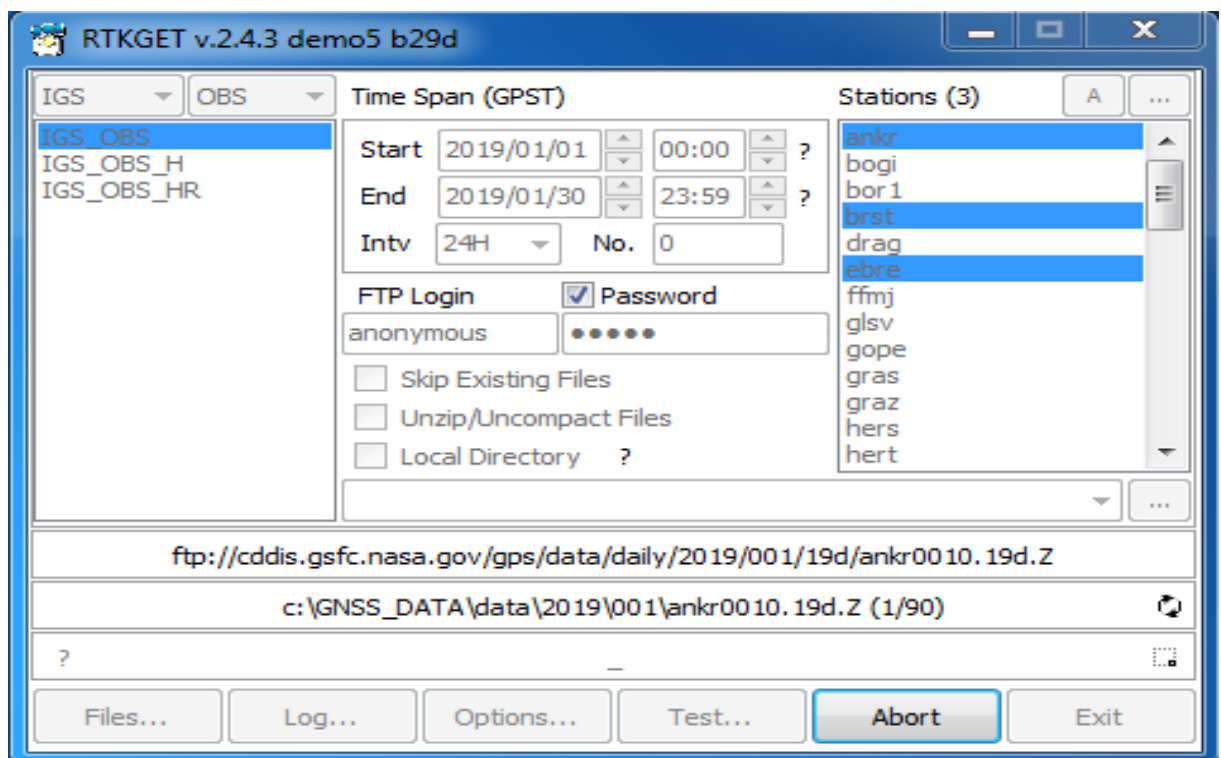


Figure A.2 : Téléchargement de données par RTKGET.

La figure ainsi que le tableau ci-dessous présentent l'ensemble des 83 stations permanentes de référence IGS et IGN utilisées dans notre étude.

Mentionnant que le réseau GNSS permanent propre de l'Espagne est le 'ERGNSS' ; géré par l'Institut Géographique National de Madrid (Instituto Geográfico Nacional). L'ERGNSS (Estaciones de Referencia GNSS) est composé de plus de 100 stations GPS/GNSS permanentes réparties sur l'ensemble du territoire Espagnol.

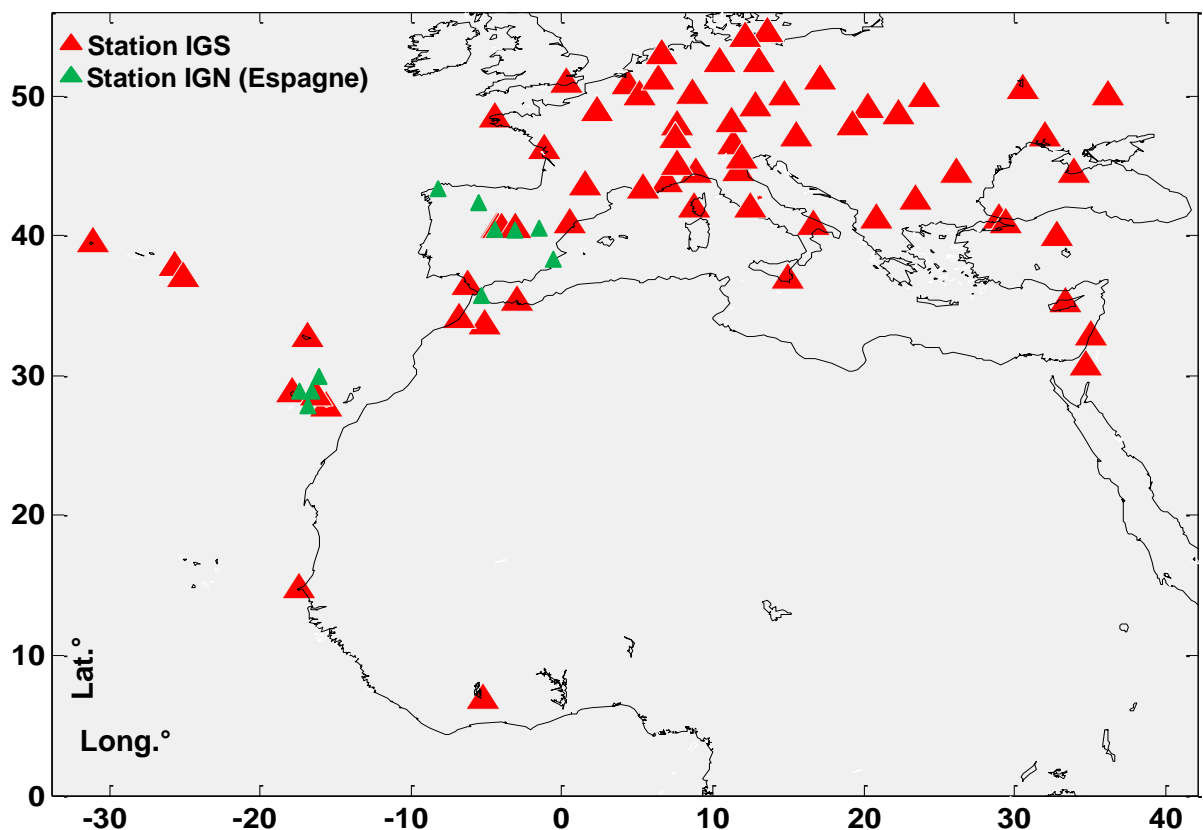


Figure A.3 : Distribution géographiques des stations IGS & IGN exploitées.

N.B.

Onze stations (Fig. A.3) du réseau espagnol ERGNSS/IGN ont été disponible lors de l'étude des deux évènements telluriques affectant la région Nord occidentale de l'Algérie (séisme d'Ain Témouchent 1999 et séisme d'Oran 2008).

Tableau A.1

Description et localisation géographique des stations GNSS (IGS & IGN) permanentes exploitées pour modéliser le TEC ionosphérique.

Site	Ville	Pays	Longitude (deg°)	Latitude (deg°)	Altitude (m)
ABPO	Antananarivo	Madagascar	47.2292117	-19.0183060	1552.992
ACOR	A Coruña	Espagne	-8.398935	43.36438	66.876
AJAC	Ajaccio	France	8.7626111	41.9274528	99.0
ALAC	Alicante	Espagne	-0.4812327	38.33892	60.332
ANKR	Ankara	Turquie	32.7585778	39.8875111	974.8
BOGI	Borowa Gora	Pologne	21.0352111	52.4749889	139.9
BOR1	Borowiec	Pologne	17.0734583	52.2769556	124.9
BRST	Brest	France	-4.4965972	48.3804944	65.8
BRUX	Brussels	Belgique	4.3585611	50.7980611	158.3
BSHM	Haifa	Israël	35.0200000	32.7790000	225.1
BUCU	Bucuresti	Roumanie	26.1257389	44.4639444	143.2
BZRG	Bolzano - Bozen	Italie	11.3368000	46.4990000	328.8
CEBR	Ceberos	Espagne	-4.3678500	40.4534278	775.8
CEU1	Ceuta	Espagne	-5.306394	35.89197	52.447
CRAO	Simeiz	Ukraine	33.9909833	44.4132611	365.8
DAKR	Dakar	Sénégal	-17.4394722	14.7212222	51.0
DJIG	Djibouti	Djibouti	42.8469444	11.5261111	711.409
DRAG	Metzoki dragot	Israël	35.3920694	31.5932000	31.8
EBRE	Roquetes	Espagne	0.4924000	40.8209000	107.9
FFMJ	Frankfurt / Main	Allemagne	8.6649639	50.0905778	178.2
FLRS	Santa Cruz das Flores	Portugal	-31.1263889	39.4538444	79.9
FUNC	Funchal	Portugal	-16.9076167	32.6479444	78.5
GANP	Ganovce	Slovaquie	20.3229306	49.0347111	745.2
GENO	Genova	Italie	8.9211000	44.4194000	137.0
GLSV	Kiev	Ukraine	30.4967000	50.3642000	226.8
GOPE	Ondrejov	Rép. Tchèque	14.7856222	49.9137056	592.6
GRAC	Caussols	France	6.9207611	43.7544861	1319.8
GRAZ	Graz	Autriche	15.4935000	47.0671000	538.3
HERS	Hailsham	Royaume-Uni	0.3362000	50.8673000	76.5
HERT	Hailsham	Royaume-Uni	0.3343528	50.8674778	83.3
HUEG	Huegelheim	Allemagne	7.5961667	47.8339444	278.4
IENG	Torino	Italie	7.6394028	45.0151306	316.6
IFR1	Ifrane	Maroc	-5.10840	33.5394	1677.99
IGNE	IGN-Madrid	Espagne	-3.7095	40.5054	766.910
ISTA	Istanbul	Turquie	29.0193000	41.1044000	147.2
IZAN	Izaña	Espagne	-16.49968	28.30807	2417.483
JOZ2	Jozefoslaw	Pologne	21.0323472	52.0978333	152.5
JOZE	Jozefoslaw	Pologne	21.0315333	52.0972722	141.4
LAMA	Lamkowo	Pologne	20.6697222	53.8922222	187.0
LEIJ	Leipzig	Allemagne	12.3740833	51.3539722	178.4
KHAR	Kharkiv	Ukraine	36.2390083	50.0051028	201.0
LEON	León	Espagne	-5.650976	42.58841	970.234

Site	Ville	Pays	Longitude (deg°)	Latitude (deg°)	Altitude (m)
LLAG	La Laguna	Espagne	-16.3207178	28.4816661	622.82
LPAL	Roque de los Muchachos	Espagne	-17.8938889	28.7638889	2207.0
LROC	La Rochelle	France	-1.2193000	46.1589389	57.9
M0SE	Roma	Italie	12.4932583	41.8931139	120.6
MAD2	Robledo	Espagne	-4.2496583	40.4291611	829.5
MADR	Robledo	Espagne	-4.2496583	40.4291611	829.5
MARS	Marseille	France	5.3537833	43.2787667	61.8
MAS1	Maspalomas	Espagne	-15.6333000	27.7637000	197.3
MATE	Matera	Italie	16.7045000	40.6491000	535.6
MEDI	Medicina	Italie	11.6468000	44.5199000	50.0
MELI	Melilla	Espagne	-2.9516417	35.2812194	93.0
MERS	Erdemli/Mersin	Turquie	34.2558528	36.5663889	38.47
MIKL	Mykolaiv	Ukraine	31.9728278	46.9727889	94.7
NICO	Nicosia	Chypre	33.3964000	35.1409000	155.0
NOT1	Noto	Italie	14.9898000	36.8761000	126.2
OAK1	Hermitage	Royaume-Uni	-0.9051250	51.1176111	139.6
OBE4	Oberpfaffenhofen	Allemagne	11.2778556	48.0848056	650.5
ONSA	Onsala	Suède	11.9252778	57.3952778	45.5
OPMT	Paris	France	2.3348833	48.8358806	124.2
ORID	Ohrid	Macédoine	20.7940556	41.1273056	773.0
PADO	Padova	Italie	11.8960556	45.4111500	64.7
PDEL	Ponta Delgada	Portugal	-25.6627667	37.7477444	110.8
PENC	Penc	Hongrie	19.2815222	47.7896000	291.7
POTS	Potsdam	Allemagne	13.0660917	52.3792972	144.4
PTBB	Braunschweig	Allemagne	10.4597000	52.2962000	130.2
RABT	Rabat	Maroc	-6.8542889	33.9981028	90.1
RAEG	Sao Pedro	Portugal	-25.1263889	36.9857000	297.9
RAMO	Mitzpe Ramon	Israël	34.7631000	30.5978000	893.1
REDU	Redu	Belgique	5.1448806	50.0015000	369.9
ROAG	San Fernando	Espagne	-6.2062750	36.4633500	83.2
SASS	Sassnitz Island of Ruegen	Allemagne	13.6432889	54.5135889	68.2
SFER	San Fernando	Espagne	-6.2056000	36.4643000	85.8
SOFI	Sofia	Bulgarie	23.3947000	42.5561000	1119.6
SULP	Lviv	Ukraine	24.0144861	49.8355861	370.5
TERU	Teruel	Espagne	-1.124301	40.35050	956.167
TIT2	Titz	Allemagne	6.4316250	51.0353028	156.10
TLSE	Toulouse	France	1.4808722	43.5606944	207.2
TLSG	Toulouse	France	1.4850000	43.5494444	208.753
TN01	Santa Cruz	Espagne	-16.24116	28.47718	51.787
TN02	El Puerto	Espagne	-16.55079	28.41825	54.475
TN03	Los Cristianos	Espagne	-16.71852	28.04716	58.543
TUBI	Gebze	Turquie	29.4507000	40.7867000	221.8
UZHL	Uzhgorod	Ukraine	22.2976000	48.6320000	232.0
VILL	Villafranca	Espagne	-3.9520000	40.4436000	647.5
VISO	Visby	Suède	18.3672222	57.6536111	79.8

Site	Ville	Pays	Longitude (deg°)	Latitude (deg°)	Altitude (m)
WAB2	Bern	Suisse	7.4642556	46.9237500	611.21
WARN	Rostock-Warnemuende	Allemagne	12.1014167	54.1697778	50.7
WROC	Wroclaw	Pologne	17.0619000	51.1131000	181.0
WSRT	Westerbork	Pays-Bas	6.6045000	52.9146000	86.0
WTZ3	Bad Koetzing	Allemagne	12.8786389	49.1447778	663.4
YEBE	Yebes	Espagne	-3.0886000	40.5249000	973.0
YKRO	Yamousoukro	Côte d'Ivoire	-5.2400930	6.8705603	270
ZIMM	Zimmerwald	Suisse	7.4652722	46.8770944	956.4

Annexe B. Le séisme principal d'Oran de 2008 et ses répliques

Tableau B.1

Liste détaillé des répliques séismiques de l'évènement principal d'Oran 06 juin 2008, $M_w=5.5$ (collectée du laboratoire de recherche Georen-Université d'Oran 2, Algérie).

Date	Heure UTC	Long.°	Lat.°	P.km	Mag	M_w	Localisation	Références
06.06.2008	20:02:58	-0.52	35.81	5.03	5.5 ML	5.5	NE Oran	CRAAG
06.06.2008	21:10:40	-0.56	35.8	3.64	4.5 ML	4.5	NE Oran	CRAAG
06.06.2008	21:18:21	-0.66	35.63	4.44	3.4 ML	3.4	S Oran	CRAAG
06.06.2008	22:48:24	-0.42	35.78	0.1	3.9 ML	3.9	NE Oran	CRAAG
07.06.2008	01:39:14	-0.32	35.58	5.21	4.2 ML	4.2	SE Oran	CRAAG
07.06.2008	02:18:14	-0.51	35.56	1.81	3.5 ML	3.5	SE Oran	CRAAG
07.06.2008	02:55:43	-0.65	35.77	5.04	3.6 ML	3.6	N Oran	CRAAG
07.06.2008	07:24:34	-0.37	35.76	21.82	3.9 ML	3.9	E Oran	CRAAG
07.06.2008	13:14:51	-0.45	35.59	2.21	3.5 ML	3.5	E Oran	CRAAG
07.06.2008	19:50:09	-0.26	35.66	0.1	3 ML	3	NE Mascara	CRAAG
08.06.2008	16:35:48	-0.49	35.64	2.75	2.6 ML	2.6	SE Oran	CRAAG
08.06.2008	16:52:05	-0.59	35.77	11.94	2.6 ML	2.6	NE Oran	CRAAG
09.06.2008	04:22:39	-0.29	35.59	11.99	3.1 ML	3.1	SE Oran	CRAAG
12.06.2008	09:37:02	-0.48	35.85	4.99	3.5 ML	3.5	NE Oran	CRAAG
12.06.2008	18:59:22	1.09	35.15	39.04	3.3 ML	3.3	SW Tيارت	CRAAG
14.06.2008	18:44:58	0.58	35.86	6.57	2.8 ML	2.8	NW Relizane	CRAAG
14.06.2008	21:38:50	-0.51	35.9	4.2	3.5 ML	3.5	NE Oran	CRAAG
15.06.2008	10:12:30	-0.59	35.86	17	3.5 ML	3.5	NE Oran	CRAAG
16.06.2008	11:13:19	0.22	35.87	5.37	2.8 ML	2.8	SE Mostaganem	CRAAG
19.06.2008	21:39:58	-0.53	35.57	11.38	3.1 ML	3.1	SE Oran	CRAAG
20.06.2008	01:34:10	-0.39	35.71	6.09	3.5 ML	3.5	E Oran	CRAAG
29.06.2008	05:03:10	-0.58	35.92	-	3.0 Mb	3.3	Mer Méditerranée	IGN
11.07.2008	17:04:36	-0.53	35.62	4.57	3.5 ML	3.5	SE Oran	CRAAG
16.07.2008	04:25:15	0.6	35.66	8.55	3.1 ML	3.1	S Relizane	CRAAG
24.07.2008	17:19:57	-0.44	35.76	7.44	4.3 ML	4.3	NE Oran	CRAAG
25.07.2008	21:34:40	-1.1	35.96	-	3.2 Mb	3.5	Mer Méditerranée	IGN

MI magnitude locale ;

Mb magnitude des ondes de volume ;

CRAAG Centre de Recherche en Astronomie, Astrophysique et Géophysique (Algérie) ;

IGN Instituto Geográfico Nacional (Espagne).

Afin de dissocier les perturbations pré-séismiques liées aux variations anormales du TEC ionosphérique de celles liées aux activités solaire et magnétique, nous avons met en place les deux conditions fondamentales suivantes :

Activité ionosphérique contre Forte activité séismique/Faible activité magnétique: Période 2008.

Activité ionosphérique contre Calme activité séismique/Forte activité magnétique: Période 2005.

Aussi, nous nous sommes référé aux rapports d'activité solaire/géomagnétique donnés par les centres de météorologie spatiale suivants :

- National Oceanic and Atmospheric Administration :
<https://www.swpc.noaa.gov/>
- German Research Centre for Geosciences :
<https://www.gfz-potsdam.de/en/kp-index/>,
Accès via serveur FTP: **<ftp://ftp.gfz-potsdam.de/pub/home/obs/kp-ap/>**
- World Data Center for Geomagnetism :
<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>
- British Geological Survey :
<http://www.geomag.bgs.ac.uk/>

Ces institutions fournissent, quotidiennement et en temps-réel, trois principaux indices solaire et géomagnétique :

- Indice planétaire d'activité magnétique K_p ;
- Indice d'activité du courant annulaire Dst ;
- Indice de flux radio solaire F10.7.

Cependant, les valeurs tri-horaires de K_p indiquent que l'activité géomagnétique durant la journée du 20 mai 2008 (jour précurseur du séisme d'Oran 2008) était très faible ($K_p \leq 3$). Il est à noter qu'aucune éruption solaire ne s'est produite au cours de cette journée (faible activité solaire). Par contre, le champ géomagnétique était à un niveau de tempête sévère pratiquement durant toute la période de validation de notre étude (année 2005), où l'indice K_p a atteint le degré maximal 9. Voir, la figure C.1 ainsi que le tableau C.1.

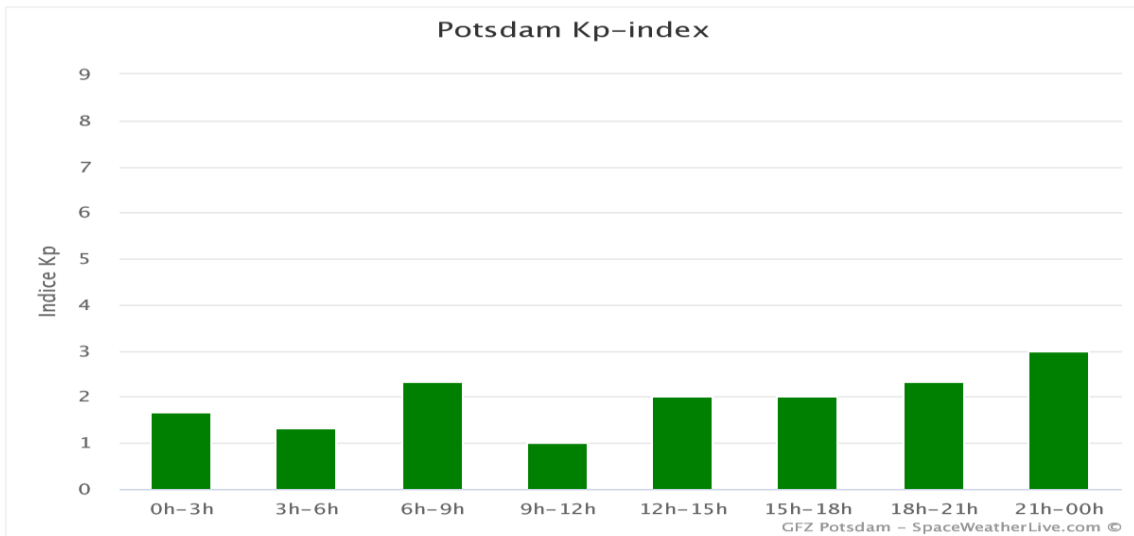


Figure C.1 : Valeurs tri-horaires de l'indice Kp, 20 mai 2008, calme activité magnétique.

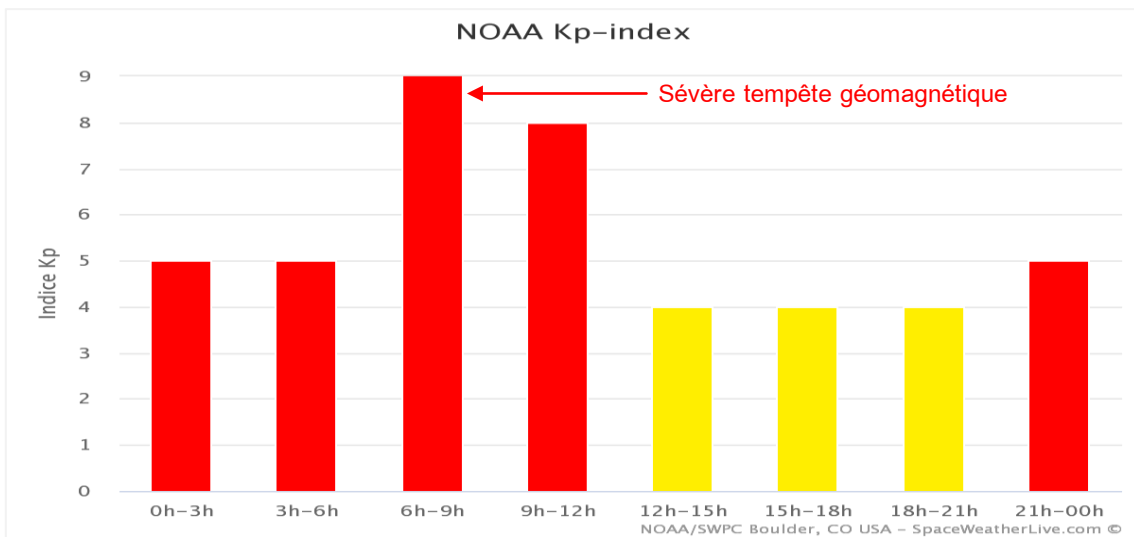


Figure C.2 : Valeurs tri-horaires de l'indice Kp, 15 mai 2005, forte activité magnétique.

Tableau C.1

Valeurs définitives de l'indicateur des perturbations du champ géomagnétique, Kp (Réf.: centre BGS).

Date	Valeurs Kp								Date	Valeurs Kp							
01-05-2008	0	0	0	1	1	2	2	4	01-05-2005	4	3	3	2	4	3	4	2
02-05-2008	4	1	1	1	2	0	0	0	02-05-2005	2	1	0	1	2	2	1	1
03-05-2008	2	1	1	2	3	2	3	2	03-05-2005	2	1	0	1	3	3	2	2
04-05-2008	0	1	1	1	1	3	3	2	04-05-2005	2	2	0	0	1	1	2	1
05-05-2008	1	2	2	0	3	3	3	2	05-05-2005	1	1	0	1	1	2	1	0
06-05-2008	3	1	2	1	1	0	1	1	06-05-2005	0	0	0	0	2	2	2	1
07-05-2008	2	0	0	0	1	1	2	2	07-05-2005	1	0	0	0	3	2	2	5
08-05-2008	1	0	1	1	1	1	1	1	08-05-2005	6	6	2	4	9	7	6	4
09-05-2008	1	0	0	0	1	0	0	0	09-05-2005	3	3	1	1	1	3	3	4
10-05-2008	0	1	0	0	0	0	1	1	10-05-2005	2	1	1	1	2	1	2	2
11-05-2008	0	0	0	0	1	1	2	0	11-05-2005	0	0	1	1	3	3	3	3
12-05-2008	0	0	0	0	0	1	1	1	12-05-2005	2	3	2	1	3	3	3	3
13-05-2008	1	1	0	0	0	1	1	0	13-05-2005	5	2	3	2	3	3	2	1
14-05-2008	0	0	0	0	2	1	1	0	14-05-2005	2	1	1	1	1	2	2	1
15-05-2008	0	1	0	0	1	0	1	1	15-05-2005	3	4	9	6	3	4	5	4
16-05-2008	1	1	0	1	2	2	2	0	16-05-2005	4	6	6	4	5	4	2	2
17-05-2008	0	0	0	1	0	0	0	0	17-05-2005	3	4	3	2	2	4	2	2
18-05-2008	0	0	0	0	2	0	0	0	18-05-2005	3	2	1	1	2	2	1	1
19-05-2008	2	1	1	1	2	2	2	0	19-05-2005	1	1	2	2	2	2	2	1
20-05-2008	2	0	1	0	2	2	2	3	20-05-2005	3	4	3	3	3	3	1	2
21-05-2008	3	3	1	1	2	2	1	1	21-05-2005	2	3	3	2	3	3	4	2
22-05-2008	3	2	1	1	2	3	3	2	22-05-2005	3	2	1	1	3	1	1	1
23-05-2008	2	1	0	1	2	2	3	2	23-05-2005	2	0	0	0	3	2	1	1
24-05-2008	3	0	1	1	2	2	0	1	24-05-2005	1	0	0	0	1	0	1	2
25-05-2008	2	2	1	0	2	1	0	1	25-05-2005	1	1	0	1	0	2	1	0
26-05-2008	0	1	0	0	0	1	1	1	26-05-2005	0	0	0	0	1	0	0	0
27-05-2008	0	0	0	0	1	1	1	2	27-05-2005	0	1	0	0	1	0	0	0
28-05-2008	2	1	2	1	3	3	1	2	28-05-2005	0	1	1	1	2	4	4	2
29-05-2008	3	2	1	1	2	3	3	1	29-05-2005	3	2	2	2	1	3	2	4
30-05-2008	3	0	0	1	2	3	3	1	30-05-2005	4	3	5	5	8	7	7	5
31-05-2008	1	1	1	2	3	3	3	1	31-05-2005	3	4	2	2	4	2	2	2
01-06-2008	1	1	1	0	2	3	2	1	01-06-2005	3	2	1	2	1	1	1	0
02-06-2008	1	1	0	1	2	1	2	1	02-06-2005	2	2	0	1	1	2	2	2
03-06-2008	0	1	0	1	1	2	1	1	03-06-2005	2	1	1	1	2	2	1	0
04-06-2008	1	0	1	0	1	1	0	0	04-06-2005	2	1	1	1	3	4	5	3
05-06-2008	0	0	0	1	0	2	0	0	05-06-2005	3	3	2	2	2	2	3	3
06-06-2008	0	1	1	2	1	2	2	1	06-06-2005	3	3	1	0	1	2	1	3
07-06-2008	1	1	3	2	3	2	3	3	07-06-2005	2	3	2	2	3	2	1	2
08-06-2008	3	1	0	1	3	3	1	2	08-06-2005	2	1	0	0	1	0	0	0
09-06-2008	2	1	0	0	0	0	1	0	09-06-2005	1	0	0	1	2	1	1	1
10-06-2008	0	0	0	0	1	1	0	0	10-06-2005	0	0	0	0	0	1	1	1
11-06-2008	0	1	1	1	1	0	0	0	11-06-2005	1	0	0	1	1	2	2	2
12-06-2008	0	1	2	0	0	1	0	1	12-06-2005	1	2	2	3	4	5	7	8
13-06-2008	0	0	0	0	0	0	1	0	13-06-2005	6	5	4	2	3	2	2	0
14-06-2008	0	0	0	0	1	3	3	6	14-06-2005	1	1	1	1	2	0	3	2
15-06-2008	4	3	2	2	2	3	2	2	15-06-2005	2	3	3	9	9	2	2	0
16-06-2008	1	1	1	2	2	2	3	3	16-06-2005	0	1	2	3	5	4	3	3
17-06-2008	3	2	1	1	2	3	2	1	17-06-2005	4	4	1	1	3	2	3	1
18-06-2008	3	3	1	1	2	1	1	0	18-06-2005	1	2	1	1	2	2	1	1
19-06-2008	1	0	0	1	2	2	3	1	19-06-2005	1	1	0	0	2	2	1	1
20-06-2008	1	3	2	1	1	2	2	2	20-06-2005	1	0	0	1	1	2	0	0
21-06-2008	0	0	0	1	1	1	1	1	21-06-2005	0	0	0	0	0	0	0	0
22-06-2008	1	0	0	1	1	0	0	0	22-06-2005	1	0	0	1	2	1	1	3
23-06-2008	1	1	0	0	1	0	0	0	23-06-2005	3	4	5	4	5	3	4	2
24-06-2008	0	0	0	0	0	1	2	2	24-06-2005	3	3	1	2	2	1	1	1
25-06-2008	3	2	2	0	1	3	3	2	25-06-2005	3	2	1	1	1	4	2	3
26-06-2008	3	2	2	2	3	2	2	1	26-06-2005	2	2	1	2	2	1	1	1
27-06-2008	3	1	1	2	2	3	1	0	27-06-2005	0	0	0	0	2	1	2	1
28-06-2008	0	0	0	1	2	2	2	1	28-06-2005	0	1	0	0	1	1	1	1
29-06-2008	2	2	1	1	2	2	2	2	29-06-2005	2	0	1	1	2	2	1	0
30-06-2008	1	1	0	0	1	2	1	0	30-06-2005	1	1	1	1	1	2	2	1

ANNEXE D. Le format R.in.ex

RINEX, Receiver Independent Exchange Format, est un format d'échange standard (ASCII) des données et métadonnées GNSS. Ce format international a été développé par Gurtner W. et Mader G. à la fin des années 80 (Institut d'Astronomie de l'Université de Berne, Suisse) pour un échange facile des données GNSS et pour s'affranchir des formats propriétaires utilisés par chaque constructeur de matériel GNSS (Gurtner et Estey, 2013).

Le format RINEX est indépendant du récepteur exploitable par les logiciels des différentes marques (Gurtner et Estey, 2007). La nomenclature des fichiers RINEX compressés est la suivante [**sitejjjs.aat.Z**], une fois décompressés, ces fichiers ont pour nom [**sitejjjs.aat**] avec :

- **site** : représente l'acronyme de la station (sur quatre caractères),
- **jjj** : numéro du jour GPS dans l'année,
- **s** : session du jour, soit
 - **0** pour un fichier de 24 heures,
 - **a,b...,x** pour les fichiers horaires,
 $a = 1^{\text{ère}} \text{ heure} : 00\text{h}-01\text{h} ; b = 02^{\text{ème}} \text{ heure} : 01\text{h}-02\text{h} ;$
... $x = 24^{\text{ème}} \text{ heure} : 23\text{h}-24\text{h}.$
- **aa** : les deux derniers chiffres de l'année,
- **t** : type de fichier, soit
 - **O** pour un fichier d'observations ;
 - **N** pour un fichier d'éphémérides (Navigation) ;
 - **M** pour un fichier de données météorologique ;
 - **G** pour un fichier contenant les messages de navigation GLONASS ;
 - **L** pour un fichier contenant les messages de navigation Galileo ;
 - **P** pour un fichier contenant les messages de navigation GNSS mixte ;
 - **H** pour un fichier de message de navigation de charge utile SBAS, Satellite-Based Augmentation System ;
 - **B** pour un fichier de données de diffusion SBAS ;
 - **S** Fichier récapitulatif (utilisé par exemple, par IGS) ;
 - **C** pour un fichier contenant des informations sur les horloges des récepteurs et des satellites.

A noter que la version la plus récente est Rinex 3.04 de décembre 2018.

Exemple : La station GNSS Brest (BRST-France) le 06 juin 2008 est nommée : brst1580.08O

Informations d'en-tête

```

2 OBSERVATION DATA G (GPS) RINEX VERSION / TYPE
CCRINEXO V2.3.3 UX BKG, Frankfurt/M. 07-JUN-08 00:21 PGM / RUN BY / DATE
Concatenated RINEX hourly files COMMENT
teqc 2006Dec12 IGN-RGP 20080606 1:05: COMMENT
Linux 2.4.20-8|Pentium IV|gcc|Linux|486/DX+ COMMENT
teqc 2006Dec12 Administrateur RGP 20080606 01:05:10UTC COMMENT
Forced Modulo Decimation to 30 seconds COMMENT
SPIDER V2,2,0,2470 2008 06 06 01:04 COMMENT
BIT 2 OF LLI FLAGS DATA COLLECTED UNDER A/S CONDITION COMMENT
SNR is mapped to RINEX snr flag value [2-9] COMMENT
L1&L2: = 25dBHz -> 1; 26-27dBHz -> 2; 28-31dBHz -> 3 COMMENT
32-35dBHz -> 4; 36-38dBHz -> 5; 39-41dBHz -> 6 COMMENT
42-44dBHz -> 7; 45-48dBHz -> 8; >=49dBHz -> 9 COMMENT

```

Nom station BRST
10004M004
Automatic
462575
226
4231162.8040 -332746.9270 4745130.7160
Hauteur_antenne 2.0431 0.0000 0.0000

Type d'observation 8 L1 L2 C1 P2 D1 D2 S1 S2
30.000

Date/époque d'observation: 14
06 juin 2008 à 00 :00 :00 UT 2008 6 6 0 0 0.000000

Données d'observation pour chaque satellite L1-S2

	Nombre_satellites		Numéro_satellite_GPS																																		
	L1	L2	C1	P2	D1	D2	S1	S2																													
	08	6	6	0	0	0.0000000	1	10	03	06	16	18	19	21	24	25	29	31																			
	115957519.913	8	90356510.68946	22065974.610	22065972.137	2755.707																															
	2147.300	47.000	40.750																																		
	112183714.238	9	87415884.37648	21347846.116	21347843.698	1872.640																															
	1459.198	49.250	45.250																																		
	106871121.065	9	83276202.40549	20336893.731	20336889.906	510.152																															
	397.520	50.000	49.250																																		
	127705562.068	6	99510817.49344	24301560.704	24301557.734	2770.827																															
	2159.082	41.750	34.250																																		
	130143945.803	5	101410847.37944	24765569.112	24765565.025	3192.253																															
	2487.468	38.000	34.000																																		
	110402352.297	9	86027802.74048	21008862.943	21008858.841	-258.879																															
	-201.727	50.250	47.500																																		
	121768739.209	8	94884751.09145	23171813.718	23171811.853	-2971.565																															
	-2315.507	45.000	38.000																																		
	127355520.435	7	99238060.62244	24234947.564	24234944.835	1975.539																															
	1539.378	43.750	35.500																																		
	126217373.381	7	98351219.86945	24018361.801	24018359.184	-3046.629																															
	-2374.000	44.250	36.750																																		
	124718219.956	7	97183020.48946	23733085.084	23733082.031	-3513.065																															
	-2737.456	44.000	39.250																																		
	08	6	6	0	0	30.0000000	0	10	03	06	16	18	19	21	24	25	29	31																			
	115874955.929	8	90292175.13546	22050263.212	22050260.653	2748.301																															
	2141.531	47.000	41.000																																		
	112127663.505	9	87372208.49248	21337180.005	21337177.556	1863.901																															
	1452.387	49.250	45.500																																		
	106856038.287	9	83264449.59049	20334023.562	20334019.748	495.285																															
	385.933	50.000	50.000																																		

Force du signal

Figure D.1 : Extrait d'un fichier d'observation RINEX version 2.0

Force du signal :

- 1 : Intensité de signal minimale possible
- 9 : Intensité de signal maxmale possible
- 0 ou blanc : pas connu


```

2.10          N: GPS NAV DATA          RINEX VERSION / TYPE
teqc 2005Sep1  gpsops                   20080607 00:03:40UTC PGM / RUN BY / DATE
Linux 2.4.20-8|Pentium IV|gcc|Linux|486/DX+ COMMENT
Forced Modulo Decimation to 30 seconds COMMENT
RABT          MARKER NAME               COMMENT
35001M002     MARKER NUMBER            COMMENT
5255617.6800 -631745.6908 3546322.5334 COMMENT
This data is provided as a public service by NASA/JPL. COMMENT
No warranty is expressed or implied regarding suitability COMMENT
for use. For further information, contact: COMMENT
Dave Stowers, NASA/JPL m/s 238-600 COMMENT
4800 Oak Grove Drive, Pasadena CA 91109 USA COMMENT
END OF HEADER
21 08 6 6 2 0 0.0 6.213877350092D-05 -1.136868377216D-12 0.000000000000D+00
5.900000000000D+01 -8.750000000000D+00 5.064496670900D-09 -1.465104992578D+00
-6.072223186493D-07 1.400820026174D-02 8.102506399155D-06 5.153707220078D+03
4.392000000000D+05 1.136213541031D-07 -2.640554156994D-01 -2.756714820862D-07
i 9.364296927754D-01 2.101250000000D+02 -2.719033933420D+00 -8.033906073007D-09
-6.110968832095D-10 1.000000000000D+00 1.482000000000D+03 0.000000000000D+00
2.000000000000D+00 0.000000000000D+00 -1.164153218269D-08 5.900000000000D+01
4.320180000000D+05 4.000000000000D+00
6 08 6 6 2 0 0.0 1.428248360753D-04 7.162270776462D-12 0.000000000000D+00
1.050000000000D+02 1.668750000000D+01 5.668093241692D-09 -2.657867988493D+00
9.909272193909D-07 5.468957591802D-03 5.912035703659D-06 5.154985355377D+03

```

Figure D.2 : Extrait d'un message de navigation RINEX version 2.0

La description de l'enregistrement des fichiers de navigation GPS est donnée par le tableau suivant :

Tableau D.1

Fichier de navigation : section de données.

Numéro de satellite Époque	a_0 Biais d'horloge_Satellite (sec)	a_1 Dérive de l'horloge_Satellite (sec/sec)	a_2 Taux de dérive de l'horloge_Satellite (sec/sec ²)
IODE Numéro de données, éphémérides	Crs (meters)	Δn (radians/sec)	M_0 t_{oe} (radians)
Cus (radians)	e	Cus (radians)	\sqrt{a} (\sqrt{m})
t_{oe} Temps des éphémérides (sec de la semaine GPS)	Cic (radians)	Ω (radians)	Cis (radians)
i (radians)	Crs (meters)	ω (radians)	$\dot{\Omega}$ (radians/sec)
\dot{i} (radians/sec)	L2	Semaine GPS	code P L2
précision du satellite (meters)	état de santé du satellite	TGD retard de groupe de temps (sec)	IODC Numéro de données, Horloge
temps de transmission	rechange		

Cuc, Cus, Crc, Crs, Cic et Cis : Coefficients de correction à l'argument du périégée, du rayon et de l'inclinaison de l'orbite pour les perturbations causées par les variations du champ de gravité de la Terre, de la pression du rayonnement solaire et de l'attraction du soleil et de la lune.

Annexe E. Processus de calcul des coordonnées du Satellite GPS

Pour calculer les coordonnées géocentriques d'un satellite GPS, il doit y avoir tous les paramètres nécessaires aux calculs. On sait que le mouvement du satellite est un mouvement relatif par rapport à la Terre. Pour cela, il suffit de définir la position du satellite sur son orbite (repère relatif) et ensuite sa position par rapport au repère général terrestre.

● Paramètres orbitaux

Lors de la détermination de l'orbite d'un satellite, il est nécessaire de déterminer trois éléments fondamentaux : la taille et la forme de l'orbite, l'orientation du plan orbital dans l'espace et de l'orbite dans son plan ainsi que la position du satellite sur son orbite. Pour arriver à les connaître, les astronomes ont défini six éléments fondamentaux de l'orbite, appelés les COE (Classical Orbital Elements), ou encore les éléments de Kepler (voir Fig. E.1).

- *Demi-grand axe* de l'ellipse « a » : donne la dimension de l'orbite.
- *Excentricité* « e » : donne la forme de l'orbite. [$(e = 0)$ cercle, $(0 < e < 1)$ ellipse, $(e = 1)$ parabole, $(e > 1)$ hyperbole].
- *Inclinaison* « i » : angle compris entre le plan orbital et le plan de l'équateur terrestre.
- *Longitude du nœud ascendant* « Ω » : mesuré par rapport à l'axe X qui est dirigé vers le point vernal. (i et Ω) permet de déterminer l'orientation du plan orbital dans l'espace.
- *Argument du périégée* « ω » : compté par rapport au nœud ascendant dans la direction du mouvement du satellite, donne l'orientation de l'orbite dans son plan.
- *Anomalie vraie* « ν » : mesurée dans le sens de déplacement du satellite, donne une connaissance exacte sur la position du satellite sur son orbite.

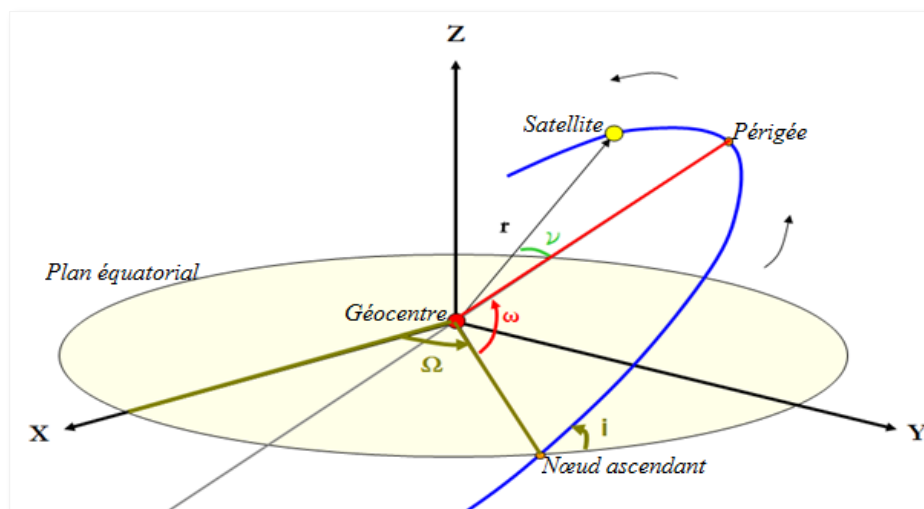


Figure E.1 : Paramètres de l'orbite d'un satellite (éléments képlériens).

La position du satellite GPS peut être déterminée dans le système de coordonnées géocentriques WGS84.

Tableau E.1

Paramètre du système géodésique mondial WGS84.

Paramètre et valeur	Description
$a=6\,378\,137,0$ [m]	Demi-grand axe (Rayon équatorial de la Terre)
$b=6\,356\,752,314$ [m]	Demi-petit axe
$f=1/298.257223563$	Aplatissement de la Terre
$e=8.1819190842622 \cdot 10^{-2}$	1 ^{ère} excentricité
$e' = 8.2094437949696 \cdot 10^{-2}$	2 ^{ème} excentricité
$\varepsilon=0.006694379990197$	Excentricité numérique
$c=2.99792458 \cdot 10^8$ [m/s]	Vitesse de la lumière
$\omega_e=7.292115147 \cdot 10^{-5}$ [rad/s]	Vitesse angulaire de rotation de la Terre

L'éphéméride d'un satellite GPS contient les données suivantes :

Tableau E.2

Ephémérides diffusées par un satellite GPS.

Données	Description
t_{0e}	Temps de référence de l'éphéméride
t_s	Temps exact à l'horloge du satellite
μ_0	Anomalie moyenne du point de l'ellipse correspondant au temps de référence t_{0e}
Δn	Correction de la vitesse angulaire moyenne de rotation
e	Excentricité de l'orbite
\sqrt{a}	Racine carrée du demi grand-axe de l'ellipse
Ω_0	Ascension droite de l'orbite au temps de référence
$\dot{\Omega}$	Taux de variation de l'ascension droite
i_0	Inclinaison de l'orbite au temps de référence
\dot{i}	Taux de variation de l'inclinaison
ω	Argument du périhélie de l'ellipse

Le calcul de la position du satellite GPS s'effectue de la manière suivante (Kaplan et Hegarty, 2017) :

Tableau E.3

Étapes de calcul des coordonnées d'un satellite GPS dans le système WGS84.

1.	Temps passé depuis le temps de référence : $t = t_s - t_{0e}$
2.	Anomalie moyenne au temps t : $\mu = \left(\mu_0 + \sqrt{\frac{GM}{a^3}} + \Delta n \right) t$ (GM constante géocentrique gravitationnelle = $3.986005.10^{14} m^3/s^2$)
3.	Anomalie excentrique : $E = \mu + e \sin E$ (résolution de l'équation de Kepler par une méthode itérative)
4.	Anomalie vraie : $f = \arctan \left(\frac{\sqrt{1-e^2}}{\cos E - e} \sin E \right)$
5.	Longitude du nœud ascendant : $\Omega = \Omega_0 + (\dot{\Omega} - \omega_e)t - \omega_e t_{0e}$
6.	Argument corrigé du périégée : $\omega_e = \omega + f + C_{\omega c} \cos 2(\omega + f) + C_{\omega s} \sin 2(\omega + f)$
7.	Distance radiale corrigée : $r = a(1 - e \cos E) + C_{rc} \cos 2(\omega + f) + C_{rs} \sin 2(\omega + f)$
8.	Inclinaison corrigée : $i = i_0 + \dot{i} \cdot t + C_{ic} \cos 2(\omega + f) + C_{is} \sin 2(\omega + f)$
9.	Coordonnées E.C.E.F* du satellite : $\begin{cases} X_s = r \cos \omega_c \cos \Omega - r \sin \omega_c \cos i \sin \Omega \\ Y_s = r \cos \omega_c \sin \Omega - r \sin \omega_c \cos i \cos \Omega \\ Z_s = r \sin \omega_c \sin i \end{cases}$

* Earth-centered, Earth-fixed : Système de coordonnées où l'axe Z est presque aligné avec le pôle terrestre conventionnel, l'axe X avec le méridien de Greenwich et l'origine est au centre de masse de la Terre.

Le service IGS

Depuis vingt-six ans, le Service international de navigation mondiale par satellite (IGS) a rempli sa mission de fournir des données et des produits GNSS de haute précision –librement disponibles– au profit des usages multidisciplinaires ; à savoir : les activités de recherche en géodésie et en géophysique. A l’heure actuelle, le réseau IGS compte 506 stations GNSS permanentes globalement réparties sur la Terre.

Le service IGS fournit à tout utilisateur GNSS les produits principaux suivants (Sammuneh, 2003; Villiger et Dach, 2019) :

- Trois types d’orbites précises (orbites prédites, orbites rapides et orbites finales précises).
- Paramètres de rotation de la Terre : les coordonnées du pôle et ses variations,...
- Les coordonnées, les vitesses ainsi que la matrice de variance-covariance des stations de poursuite permanentes du service IGS.
- Des corrections d’horloges des satellites.
- Le retard zénithal total du à la Troposphère (*ZTD*, *Tropospheric Zenith Total Delay*).
- Un modèle empirique de l’ionosphère, etc.

Tous les produits de l’IGS sont utilisés dans de nombreuses applications liées aux sciences de la Terre et offrent en particulier pour tous les utilisateurs l’accès opérationnel au repère international de référence terrestre (ITRF) pour un positionnement en temps différé et en temps réel. Depuis le 29 janvier 2017 (GPSWeek 1934), le service IGS a adopté un nouveau repère de référence, appelé IGS14.

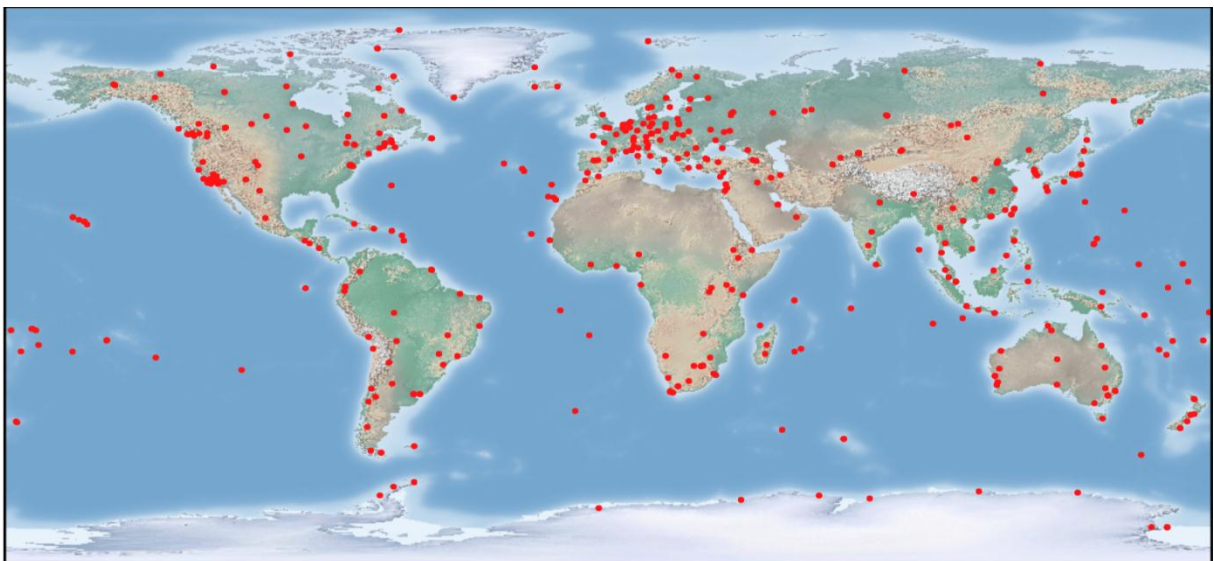


Figure F.1 : Le réseau IGS (source : IGS).

Le réseau ITRF

Le service IGS assure la réalisation et la maintenance de son propre repère de référence (actuellement l'IGS14) à partir du traitement des observations des stations GNSS permanentes du réseau. Cette solution, alignée sur l'ITRF⁸, permet d'assurer la cohérence et l'homogénéité de tous ses produits (orbites, paramètres de rotation de la Terre, positions et vitesses des stations, paramètres d'horloges, paramètres atmosphériques) avec la plus grande précision.

Les ITRF sont les réalisations de l'ITRS⁹. Les différentes réalisations ITRF sont basées sur un réseau de stations, pour lesquelles on dispose de jeux de coordonnées issues de traitements d'observations sur plusieurs années avec différentes techniques spatiales de géodésie (VLBI : l'interférométrie à très longue base, S/LLR : la télémétrie laser sur satellites ou sur la Lune, DORIS : Détermination d'Orbite et Radio positionnement Intégrés sur Satellite et les GNSS) (Altamimi et al., 2019). L'ellipsoïde associé à l'ITRF est le GRS-80 ($a = 6378137.0$ m, $e^2 = 0.00669438002290$)

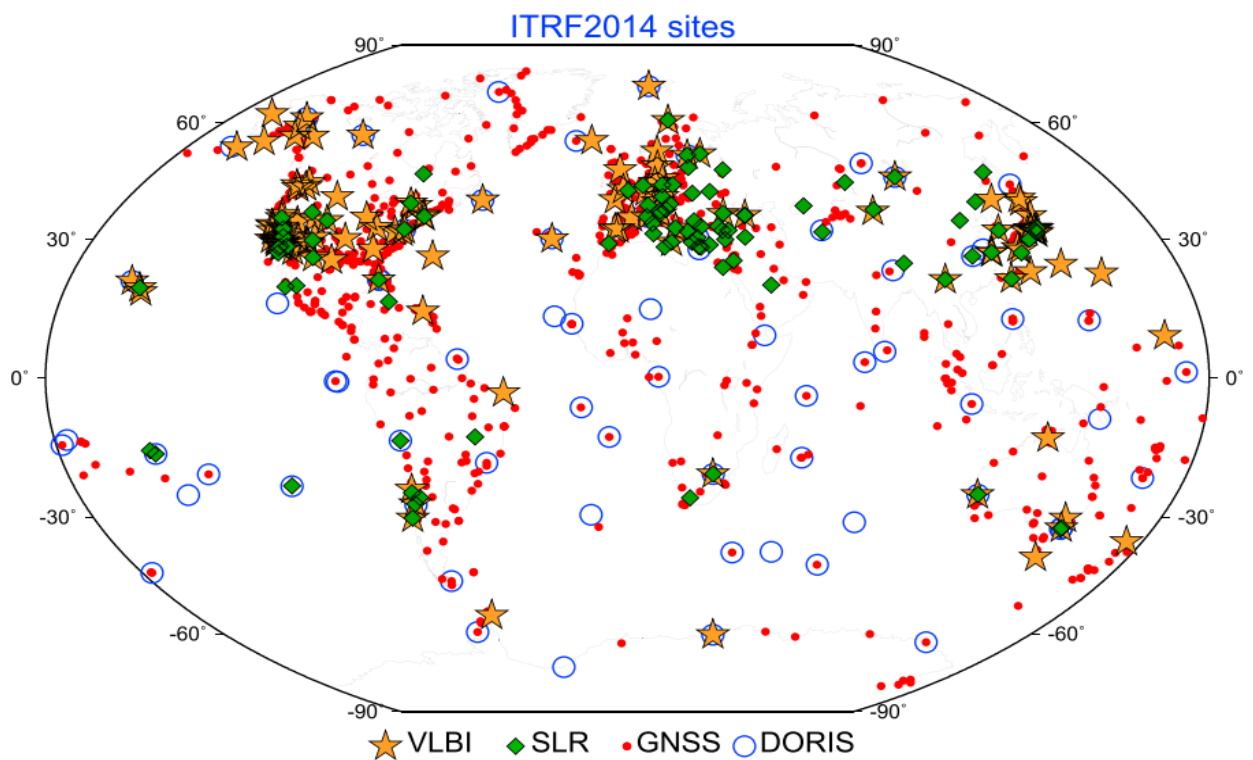


Figure F.2 : La répartition des sites DORIS, SLR et VLBI et leurs co-localisations avec GNSS.

⁸ Ensemble de points connus par leurs coordonnées cartésiennes tridimensionnelles et leurs vitesses, fournies à une époque donnée (ex. 01.01.2010 pour le repère de référence le plus récent l'ITRF2014).

⁹ Système de référence international de référence terrestre recommandé par l'IERS (International Earth Rotation Service).

La figure (F.2) illustre l'intégralité du réseau ITRF2014, comprenant 1499 stations situées dans 975 sites, où environ 10% d'entre elles sont colocalisées avec deux, trois ou quatre instruments géodésiques spatiaux distincts (Altamimi et al., 2016).

L'élément clé d'un ajustement robuste des coordonnées ITRF est la disponibilité d'un nombre suffisant et d'une répartition géographique globale de sites co-localisés (Duquenne, 2018). Un site co-localisé est défini par le fait qu'au moins deux instruments de mesure sont en opération, séparés par une distance inférieure à un kilomètre et dont les points de référence sont rattachés par géodésie classique ou par GPS.

Annexe G. Sismicité régionale

La sismicité de l'Algérie, y compris notre zone d'étude (région Nord-Ouest), se caractérise par une activité tellurique faible à modérée. En effet, la sismicité historique et instrumentale (Fig. G.1, Tab. G.1) relative à cette région occidentale a révélé que les événements sismiques sont localisés à de faibles profondeurs hypocentrales, estimées à une vingtaine voire dizaine de kilomètres de la croûte terrestre (séismes superficiels).

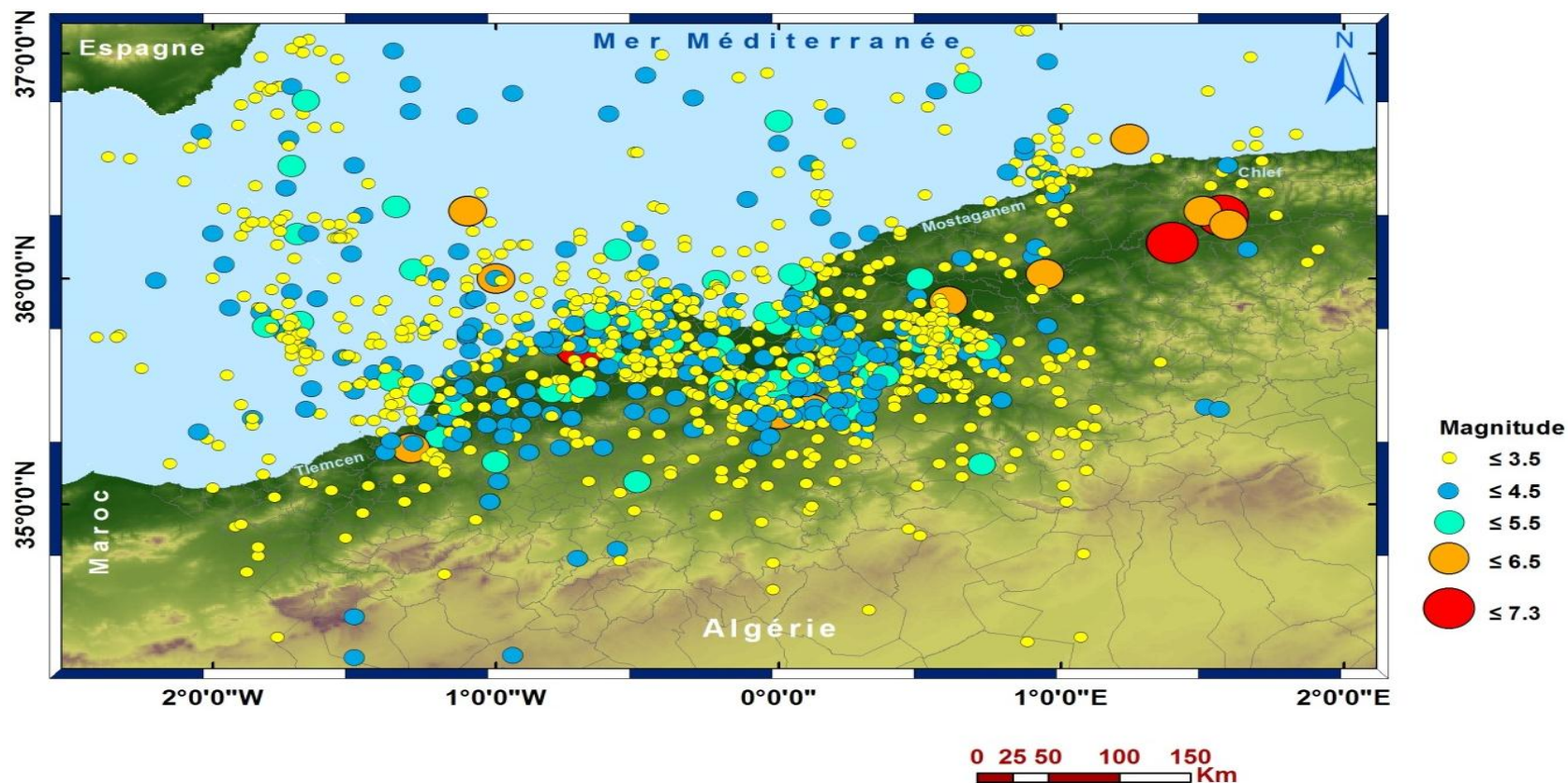


Figure G.1 : Sismicité historique et instrumentale de la région Algérie Nord-occidentale, période : 1790-2019 (source de données : catalogues du CRAAG, IGN, IRIS, ISC et USGS). Traitement : Logiciel ArcGIS 10.2.2

A noter que la plupart des tremblements de Terre, affectant la région Nord occidentale de l'Algérie, correspondent à des événements sismiques superficiels ($0 < \text{Profondeur} < 33 \text{ km}$) ; de magnitude inférieure à 5.5 (Bufoin et al., 2004). Par ailleurs, pour la période 1941-2019, seulement deux séismes de magnitude forte ($M > 6$) ont été manifesté : Orléansville M6.7, 09.09.1954 et El Asnam M7.3, 10.10.1980 (voir Fig. G.2).

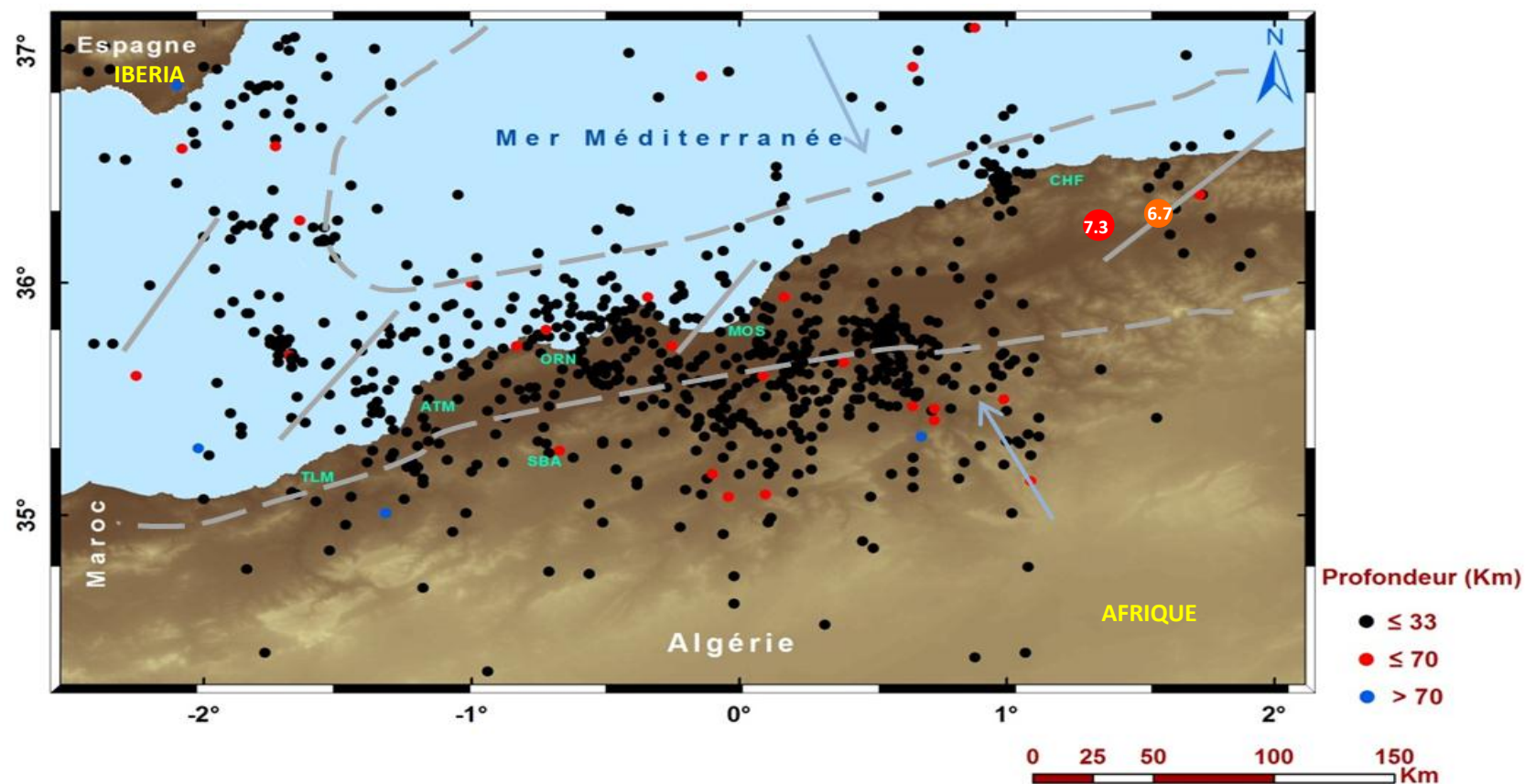


Figure G.2 : Schéma sismotectonique et distribution des événements sismiques selon la profondeur hypocentrale de la région Algérie Nord-occidentale (Plaque africo-ibérique), période : 1941-2019. (Catalogues du CRAAG, IGN, IRIS, ISC et USGS). Les flèches indiquent le régime de contraintes de surfaces. TLM: Tlemcen, ATM: Ain Témouchent, SBA: Sidi Belabès, ORN: Oran, MOS: Mostaganem, CHF: Chlef. (Bufoin et al., 2004, modifiée).

Le Catalogue de la sismicité régional du Nord-Ouest Algérien est le fruit d'une collaboration bilatérale importante entre les deux laboratoires dynamiques :

- ▶ **Laboratoire Géoressources, Environnement & Risques Naturels (GEOREN)/FSTU/
Équipe 1 des Risques Naturels/Direction : Pr. Nadji Abdelmansour.
Université d'Oran 2-Algérie.**

- ▶ **Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG)/Dpt de Física-ECT/
Direction : Pr. Bezzeghoud Mourad.
Universidade de Évora-Portugal.**

Tableau G.1

Évènements séismiques affectant la région occidentale de l'Algérie (du XVIII^e au XXI^e siècle), donnée par différentes institutions sismologiques. (Réf. : Equipe1_Lab. GEOREN, Nadji, 2010; Belayadi et al., 2017).

N°	Date	Heure	Lat.°	Long.°	M _w	P (km)	Io	Localisation	Référence
		Hh mn sc							
1	09.10.1790	01 15 00	35.7	-0.7	7	-	X	ORAN.ALG	Rothé, 1950/IGN
2	01.03.1819	00 00 00	35.4	0.1	5.8	-	VIII	MASCARA.ALG	SSIS/ IGN
3	27.09.1836	00 00 00	35.7	-0.6	4.6	-	VI	ORAN.ALG	IGN/SSIS
4	22.11.1851	09 30 00	35.42	0.12	5.8	-	VIII	MASCARA.ALG	Rothé, 1950/IGN
5	26.07.1861	17 20 00	35.7	-0.6	5.2	-	VII	ORAN.ALG	SSIS/IGN
6	29.07.1872	08 15 00	35.9	0.1	5.2	-	VIII	MOSTAGANEM.ALG	Rothé, 1950/IGN/SSIS
7	16.01.1878	19 00 00	35.93	0.08	4.6	-	VI	MOSTAGANEM	Rothé, 1950
8	29.11.1887	13 30 00	35.58	0.33	6.4	-	IX	EL BORDJ - NE MASCARA	Rothé, 1950/IGN
9	21.05.1889	04 15 00	35.71	-0.8	5.2	-	VII	NW ORAN.ALG	Rothé, 1950/IGN
10	07.30.1890	00 00 00	35.72	0.5	4.6	-	VI	RELIZANE.ALG	Rothé, 1950/IGN
11	23.10.1897	07 20 00	35.7	-0.6	4	-	V	ORAN.ALG	IGN
12	25.04.1900	18 00 00	35.72	-0.65	4.6	-	VI	ORAN.ALG	VA/Mokrane et al., 1994/ IGN
13	09.03.1901	22 26 00	35.73	0.55	4.6	-	VI	RELIZANE. AL	NNA/HAM/ BEN
14	23.08.1904	05 59 00	35.4	0.1	4	-	V	MASCARA.ALG	SSIS/ IGN/HAM / BEN
15	14.02.1905	-	36.3	-1.1	5.6	-	VII	MER MÉDITERRANEÉ	KV-SSIS
16	07.08.1907	01 18 49	35.8	0	4.6	-	VI	NOISY- SW MOSTAGANEM	KV-SSIS/HAM/SSIS
17	09.08.1907	01 21 00	35.7	0.4	4	-	V	W REALIZANE.ALG	IGN/ BEN
18	29.06.1909	05 45 00	35.73	0.6	4.6	-	VI	RELIZANE. AL	SSIS/IGN / BEN
19	02.02.1910	01 00 00	35.72	-0.6	5.2	-	VII	ORAN. AL	SSIS/IGN/ BEN
20	10.01.1911	21 30 00	35.7	0.4	3.4	-	IV	W RELIZANE.ALG	IGN/ BEN
21	24.07.1912	18 07 00	35.7	-0.4	5.2	-	VII	ARZEW. ALG	KV-Rothé, 1950/BEN/SSIS
22	25.07.1912	18 31 25	35.9	-0.3	2.8	-	III	ARZEW.ALG	IGN/BEN
23	31.07.1912	10 50 00	35.9	-0.3	4	-	V	ARZEW.ALG	IGN/BEN
24	02.08.1912	15 40 00	35.9	-0.3	3.4	-	IV	ARZEW.ALG	IGN/BEN
25	15.08.1912	23 10 00	35.7	-0.6	3.4	-	IV	ORAN.ALG	IGN/BEN
26	18.09.1912	20 45 00	35.9	-0.3	3.4	-	IV	ARZEW.ALG	IGN/BEN

N°	Date	Heure	Lat.°	Long.°	M _w	P (km)	Io	Localisation	Référence
		Hh mn sc							
27	22.10.1912	03 57 00	35.9	0.1	2.8	-	III	ARZEW. ALG	IGN/BEN
28	08.01.1913	20 36 58	35.72	-0.6	5.2	-	VII	ARZEW. ALG	KV/IGN
29	26.02.1913	03 51 04	35.73	-0.6	5.2	-	VII	ARZEW. ALG	SSIS/ IGN/BEN
30	31.08.1913	12 00 00	35.7	0.6	2.8	-	III	RELIZANE. ALG	IGN/BEN
31	10.06.1914	16 25 00	35.78	-0.43	2.8	-	III	ST.CLOUD. ALG	IGN/BEN
32	16.04.1915	16 25 00	35.5	-0.5	4	-	V	TIELAT. ALG	IGN/BEN
33	16.04.1915	16 45 00	35.5	-0.5	2.8	-	III	TIELAT. ALG	IGN/BEN
34	22.01.1916	01 25 06	35.7	-0.6	3.4	-	IV	ORAN. ALG	IGN/BEN
35	28.04.1919	21 05 00	35.72	0.77	4	-	V	E RELIZANE. ALG	IGN/BEN
36	06.05.1919	03 35 08	36	-1.75	2.8	-	III	MAR MEDITERRANEO	IGN/BEN
37	26.06.1919	19 00 19	36.72	-1.1	4.2	-	V	MER MÉDITERRANEÉ	KV/IGN/BEN
38	30.12.1919	00 30 00	35.7	0.6	3.4	-	IV	RELIZANE. ALG	IGN/BEN
39	09.05.1922	07 25 10	34.5	-1.5	4.4	-	V	E. SEBDOU. SW TLEMCEN	KV/BEN
40	22.09.1924	22 04 10	36.5	-1.72	5	-		MER MÉDITERRANEÉ	HAM
41	19.06.1925	14 44 00	35.8	-0.4	4.6	-	VI	NE ORAN. ALG	KV-Rothé, 1950/ IGN
42	20.06.1925	12 33 45	35.82	-0.41	4.6	-	VI	NE ORAN. ALG	KV / IGN
43	21.06.1925	03 00 25	36.13	-0.57	4.6	-	VI	MAR MEDITERRANEO	IGN/BEN
44	04.08.1925	00 22 06	36.7	0	5.2	-		MER MÉDITERRANEÉ	HAM
45	23.10.1925	13 35 00	35.4	0.1	4.6	-	VI	MASCARA. AL	KV/IGN/ BEN
46	26.05.1928	15 40 00	35.4	0.17	4	-	V	MASCARA. ALG	IGN/BEN
47	24.08.1928	09 44 00	35.9	0.6	5.7	-	VIII	N RELIZANE. ALG	KV/IGN/BEN
48	09.01.1929	21 27 20	35.53	-0.2	5.2	-	VII	SAINT-DENIS- SE ORAN	IGN/BEN
49	11.01.1929	01 52 00	35.5	-0.2	4.6	-	VIII	SAINT-DENIS- SE ORAN	KV-Rothé, 1950/ IGN
50	27.02.1933	15 00 00	35.85	-0.33	3.4	-	IV	ARZEW. ALG	IGN / BEN
51	01.04.1939	08 02 00	35.9	0.1	4.6	-	VI	MOSTAGANEM. AL	KV-Rothé, 1950/BEN/IGN
52	08.01.1941	14 39 41	35.93	0.08	4.6	-	VI	MOSTAGANEM.	IMPGA/BEN/IGN
53	28.04.1941	21 12 48	36.6	0	4.2	-	VI	MAR MEDITERRANEO	IMPGA/BEN/IGN/Rothé, 1950/1950; Gj, 1954
54	12.06.1941	13 55 35	36	-1	5.7	35		MER MÉDITERRANEÉ	HAM
55	27.04.1945	14 43 47	36.73	-0.6	4.2	-	V	MAR MEDITERRANEO	KV/IGN

N°	Date	Heure	Lat.°	Long.°	M _w	P (km)	Io	Localisation	Référence
		Hh mn sc							
56	01.09.1947	03 45 00	35.82	0.47	3.4	-	IV	RELIZANE.ALG	IGN/BEN
57	16.12.1947	12 11 32	36.9	-0.47	3.8	-		MAR MEDITERRANEO	IGN/BEN
58	12.05.1949	14 00 00	35.4	0.1	4	-	V	MASCARA.ALG	IGN/BEN/ Grandjean, 1954
59	19.05.1949	23 10 00	35.3	0.3	4	-	V	AIN-FARES- SE MASCARA	IGN/BEN/ Grandjean, 1954
60	27.10.1949	20 55 00	35.42	0.25	4.6	-	VI	E MASCARA.ALG	HAM/IGN/BEN/ Grandjean, 1954
61	04.11.1949	12 35 59	35.7	-0.7	4.4	-	V	W- ORAN.ALG	HAM/IGN/BEN/ Grandjean, 1955/BCIS
62	05.04.1950	06 40 00	35.3	-1.17	4	-	V	TROIS-MARABOUTS.ALG	HAM/BEN/IGN
63	21.05.1950	10 44 29	35.7	0.2	4.6	-	V	BOUGUIRAT- SE MOSTAGAMEN	KV-GJ/Grandjean, 1954/HAM
64	02.09.1950	20 20 00	35.5	-0.2	3.4	-	IV	ST.DENIS DU SIG. SE ORAN ALG	IGN/BEN
65	07.09.1950	20 50 00	35.5	-0.2	4	-	V	ST.DENIS DU SIG. SE ORAN ALG	IGN/BEN
66	05.10.1950	-	36.2	-1.7	5	-	VI	MER MÉDITERRANEÉ	KV
67	21.11.1950	23 55 00	35.8	-0.17	4	-	V	POROTHE, 1950-AUX-POULES.ALG	HAM/BEN/ IGN
68	30.11.1950	03 20 00	35.92	0.1	3.4	-	IV	MOSTAGANEM.ALG	IGN/BEN
69	18.01.1951	19 12 15	35.5	-0.1	3.4	-	IV	ST.DENIS DU SIG. SE ORAN ALG	IGN/BEN
70	20.06.1952	16 43 39	35.8	-0.2	4.1	-	V	POROTHE, 1950 POULES. E ORAN-ALG	BFR-BH/HAM/BEN/Roussel, 1973a
71	04.08.1952	12 56 07	36.72	0.2	4.2	-	V	MER MÉDITERRANEÉ	BFR-KV/IGN/BEN/HAM
72	05.05.1953	15 14 45	35.77	0.67	3.4	-	IV	FERRY. NE RELIZAINE- ALG	IGN/BEN
73	18.08.1953	04 15 50	35.55	0	4.1	-	V	AIN FEKAN. NW MASCARA	BFR-BH/IGN/BEN/HAM
74	20.09.1953	00 33 48	36.03	0.2	2.8	-	III	NE MOSTAGANEM.ALG	IGN/BEN
75	14.03.1955	05 07 04	35.5	-0.75	5.2	-	VII	ARBAOUAT. SW ORAN- ALG	IGN/HAM
76	05.07.1955	17 05 45	35.6	0.07	3.4	-	IV	PERREGAUX. N MASCARA ALG	IGN/BEN
77	29.09.1955	00 38 02	35.53	-1	4	-	V	LOURMEL.ALG	IGN/BEN/HAM
78	10.10.1955	12 35 01	35.5	-0.83	3.4	-	IV	BOU TLELIS.ALG	IGN/BEN
79	15.10.1955	21 02 48	36.42	0.92	3.4	-	IV	EL MARSALA.ALG	IGN/BEN
80	01.01.1956	08 07 37	36.8	-0.3	4.1	4	VI	ST. LEU. AL	IPGS -IMPGA/BEN
81	25.02.1956	18 28 28	35.92	0.08	3.4	-	IV	MOSTAGANEM.ALG	IGN/BEN
82	27.02.1956	12 38 16	36.62	-1.73	4.3	5	III	MER MÉDITERRANEÉ	IGN/BEN
83	19.06.1956	10 09 06	35.77	-0.5	3.4	-	IV	ORAN.ALG	IGN/BEN
84	10.10.1956	07 31 47	35.77	-0.5	3.4	-	IV	ORAN.ALG	IGN/BEN

N°	Date	Heure	Lat.°	Long.°	M _w	P (km)	Io	Localisation	Référence
		Hh mn sc							
85	10.10.1956	23 47 01	35.77	-0.5	4	-	V	ORAN.ALG	IGN/BEN
86	07.01.1957	19 16 15	36.28	-1.74	3.5	5	III	MER MÉDITERRANEÉ	IGN/BEN
87	14.02.1957	06 12 06	35.8	-0.4	4.1	8	V	ST.CLOUD. AL	IPGS-IMPGA/BEN
88	01.04.1957	18 40 54	35.73	0.53	3.4	-	IV	RELIZANE.ALG	IGN/BEN
89	12.04.1957	10 13 36	35.73	0.5	3.4	-	IV	CLINCHANT.ALG	IGN/BEN
90	08.06.1957	18 20 33	35.72	-0.52	4.5	-	V	DANISME. AL	IPGS-IMPGA/BEN
91	29.06.1957	23 46 39	36.32	-1.35	4.6	5	IV	MER MÉDITERRANEÉ	IGN/BEN/HAM
92	02.10.1957	02 45 42	35.71	-0.7	3.5	-	V	AIN TURCK. AL	IPGS-IMPGA/IGN/BEN
93	04.10.1957	17 19 30	35.73	0.6	3.5	-	V	RELIZANE. AL	TPGS-IMPGA/IGN/BEN
94	18.10.1957	16 48 00	35.83	-0.4	4.1	-	V	KLEBER. AL	IMPGA/IGN/BEN/HAM
95	29.10.1957	13 08 36	35.5	-0.1	3.5	-	IV	JEAN MERMOZ. AL	IMPGA/IGN/BRN/HAM
96	01.06.1958	03 06 24	35.5	0	4.1	-	IV	DUBLINEAU. AL	IMPGA/IGN/BEN/HAM
97	25.09.1958	22 32 00	34.8	-0.57	4	-	V	TELAGH.ALG	IGN/BEN/HAM
98	04.10.1958	17 34 06	35.1	-0.67	3.4	-	IV	BOUKHANEFIG.ALG	IGN/BEN
99	11.10.1958	04 24 42	35.7	0.6	3.4	-	IV	RELIZANE.ALG	IGN/BEN
100	01.11.1958	18 21 30	35.67	0.67	4	-	V	KENENDA.ALG	IGN/BEN/HAM
101	18.03.1959	13 01 56	35.71	0.7	3.5	-	V	RELIZANE. AL	IPGS-IMPGA/BEN
102	30.08.1959	15 59 46	36.85	-2.1	4.4	90		N CABO GATA. SP	HAM
103	02.10.1959	19 07 06	35.93	0.1	2.8	-	III	MOSTAGANEM.ALG	IGN/BEN/HAM
104	12.12.1959	20 00 05	35.8	-0.6	5.2	-	VII	ORAN. AL	IPGS-IMPGA/BEN
105	01.06.1960	11 40 01	35.7	-0.6	4.1	-	V	ORAN. AL	IPGS-IMPGA/IGN/BEN/HAM
106	09.06.1960	09 36 27	36.1	0.9	4.1	-	V	PAUL ROBEROTHE, 1950.ALG	IMPGA/IGN/BEN/HAM
107	26.09.1960	20 10 19	36.25	1	3.4	-	IV	BOUGIE. NW CHLEF	IGN/BEN
108	01.12.1960	15 14 12	35.8	0.1	5	-	VII	MOSTAGANEM	IPGS-IMPGA/ Bezzegh
109	23.01.1961	02 46 23	35.2	-0.3	3.5	-	IV	E SIDI BEL ABBES .ALG	IPCS -IMPGA/ BEN
110	29.01.1961	02 46 07	35.33	-0.25	3.4	-	IV	W MASCARA .ALG	IGN/BEN
111	29.05.1961	05 27 27	36	-1	4.1	-	V	MER MÉDITERRANEÉ	IBFR -BCIS/IGN/BEN/HAM
112	20.03.1962	18 15 00	35.1	-0.5	5.2	-	VII	SE SIDI BEL ABBES. AL	IBFR-LCSS/BEN/ BCIS/bez
113	15.07.1962	18 56 19	36.2	-0.7	3.5	-	VI	MER MÉDITERRANEÉ	IPGA-LCSS/IGN/BEN

N°	Date	Heure	Lat.°	Long.°	M _w	P (km)	I _o	Localisation	Référence
		Hh mn sc							
114	08.10.1962	18 51 44	36.2	-1.66	4.4	10	III	MER MÉDITERRANEÉ	IGN/BEN/HAM
115	27.04.1964	02 34 42	36.5	-1.5	4.4	-	IV	MER MÉDITERRANEÉ	BH/BEN/HAM
116	27.04.1964	02 34 42	36.27	-1.64	3	60		MER MÉDITERRANEÉ	IGN
117	03.05.1964	23 30 05	36.85	-1.77	3	24		MER MÉDITERRANEÉ	IGN/BEN
118	13.05.1964	13 46 23	35.5	-1.5	5.2	-	VII	MER MÉDITERRANEÉ (BENI SAF)	BH/ISC/IMPGA/ BEN/ bezz
119	26.06.1964	23 50 49	36.85	-1.83	3	5		MER MÉDITERRANEÉ	IGN/BEN
120	15.07.1964	11 04 10	35.5	0.3	4.6	-	VI	NE MASCARA.ALG	IPGS-IMPGA/ISC/BEN/HAM/ B
121	29.09.1964	05 19 33	36.58	-2.08	2.8	40		ALBORÁN NORD	IGN
122	02.10.1964	09 34 24	35.6	0.3	4.2	-	V	E MASCARA.ALG	IPGS-IMPGA/BEN/HAM/B
123	05.07.1965	13 33 46	36.89	-0.14	2.98	40		MER MÉDITERRANEÉ	IGN/BEN
124	18.05.1966	15 57 12	36	-2	3.5	-	IV	MAR DE ALBORÁN	IPGA-LCSS/IGN/BEN
125	27.04.1967	01 54 24	35.7	-0.2	4.65	-	V	GULF ARZEW. AL	IGN/BEN/ HAM
126	14.05.1967	06 10 18	36.85	-1.76	2.8	5		MER MÉDITERRANEÉ	IGN/BEN
127	27.05.1967	01 54 23	35.7	-0.2	4.8	-	VI	W MOSTAGANEM.ALG	BFR-BCIS/IGN/BEN/ISC
128	13.07.1967	02 10 22	35.52	-0.1	5.2	-	VII	NW MASCARA.ALG (SIG)	IPGS-IMPGA /IGN/BEN/Bez
129	24.07.1967	16 36 57	35.4	-0.8	4.5	-	V	E AIN TEMOUCHENT.ALG	IPGS-BFR/IGN/BEN/ISC
130	16.08.1967	13 46 12	35.5	-0.8	4.8	33	IV	SW ORAN.ALG	IPGS-BFR/IGN/BEN/ISC
131	26.11.1967	07 11 23	35.5	-0.5	4.5	-	IV	SE ORAN.ALG	IPGS-SPGM/BEN
132	10.02.1968	21 54 32	35.5	-0.1	4.1	-	V	SIG- E ORAN	IPGS-BCIS/IGN/ISC/HAM
133	31.03.1968	21 05 05	35.2	-1.8	3.5	-	IV	MEDITERRÁNEO	IPGS/BEN
134	03.06.1968	05 42 58	37.06	-1.66	2.8	5		MER MÉDITERRANEÉ	IGN
135	22.09.1968	03 05 03	37.01	-1.36	3.7	5		MER MÉDITERRANEÉ	IGN
136	06.03.1969	21 24 01	36.38	-1.05	3	20		MER MÉDITERRANEÉ	IGN/BEN
137	05.04.1969	19 56 24	35.5	0	4.6	-	VI	MASCARA. AL	IPGS-BFR/IGN/BEN/IMPGA/ Bez
138	16.03.1970	13 05 08	36.85	-1.3	3	5		MER MÉDITERRANEÉ	IGN
139	09.09.1970	07 16 21	35.7	-0.75	3.5	-	V	ZEMMOURA (RELIZANE)	IPGS-BFR/IGN/BEN/HAM
140	12.11.1971	01 40 30	36.85	-1.72	3.6	5		MER MÉDITERRANEÉ	IGN/BEN
141	12.06.1972	22 38 04	35.8	-0.9	4.1	-	VI	MER MÉDITERRANEÉ	AM-MAD/IGN/BEN
142	02.07.1972	-	35.73	-0.72	3	-	III	W ORAN.ALG	AM

N°	Date	Heure	Lat.°	Long.°	M _w	P (km)	Io	Localisation	Référence
		Hh mn sc							
143	04.08.1972	19 04 34	35.74	-1.7	3.4	5		MER MÉDITERRANEÉ	IGN/BEN
144	29.08.1972	15 55 07	35.81	-1.31	3	5		MER MÉDITERRANEÉ	IGN/BEN
145	11.03.1973	04 25 31	37.16	0.9	2.9	5		MER MÉDITERRANEÉ	IGN/BEN/ISC
146	13.05.1973	15 35 11	36.91	-0.04	2.6	10		MER MÉDITERRANEÉ	IGN/ISC
147	24.08.1973	15 57 37	35.69	0.98	3.2	5		E RELIZANE.ALG	IGN/BEN/ISC
148	24.08.1973	10 50 53	36.2	-2	3.9	33	IV	MER MÉDITERRANEÉ	IPGS-ISC/IGN/ISC/USGS/BEN
149	24.11.1973	15 57 48	35.85	-0.04	4.8	33		SW MOSTAGANEM.ALG	HAM
150	19.05.1975	16 21 53	36.03	-0.48	3	5	III	MER MÉDITERRANEÉ	IGN/ISC/BEN
151	19.05.1975	23 54 41	36.82	-0.94	4	-	IV	N.MERS KEBIR. AL	MDD-MEZ/IGN/ISC/BEN
152	12.11.1975	-	35.64	-0.72	3.5	-	IV	NW ORAN.ALG	AM-IMPGA
153	27.11.1975	11 00 17	36.35	-0.11	4.1		V	MAR MEDITERRANEO	ISC-MEZ/ISC/BEN
154	01.06.1976	00 00 00	35.93	0.07	3.7	-	IV	MOSTAGANEM. AL	AM-IMPGA/BEN
155	28.01.1978	22 55 04	35.38	-1.86	3.7	-	V	MAR MEDITERRANEO	IGN/ISC/BEN/HAM
156	18.03.1978	11 10 02	36.65	-2.04	3.6	5		SE NÍJAR.AL	ISC / IGN
157	16.11.1978	14 54 49	36.74	-1.3	4.1	5	IV	MER MÉDITERRANEÉ	IGN/ISC/BEN/HAM
158	17.11.1978	18 19 12	35.77	-0.63	3.7	-	IV	N ORAN,ALG	AM-SPGM/IGN/BEN/ISC
159	25.07.1979	22 28 21	36.4	-1.74	3.6	20	III	MER MÉDITERRANEÉ	IGN/BEN/ISC
160	16.01.1980	21 39 54	35.35	-1.03	4.3	-	V	NE AIN TEMOUCHENT.ALG	IMPGA/IGN/BEN
161	11.10.1980	09 25 19	36.99	-0.41	2.5	5		MER MÉDITERRANEÉ	IGN
162	07.12.1980	17 37 10	36.02	0.94	5.6	26	VII	NE RELIZANE.ALG	CMT/Buform et al 2004)
163	04.02.1981	22 08 12	36.04	-1.29	5	-	V	MER MÉDITERRANEÉ	HAM
164	19.04.1981	19 29 35	35.99	-0.22	4.6	16	VI	ORAN. AL	AM-CNAAG/IGN/BEN/HAM
165	18.12.1981	-	35.58	0.07	3.5	-	IV	MASCARA.ALG	AM
166	23.08.1982	-	35.78	-0.42	3.5	-	IV	NE ORAN.ALG	AM
167	30.10.1982	03 44 11	36.06	-1.96	3.8	5		MEDITERRÁNEO-CABO DE PALOS	IGN
168	19.01.1983	-	35.68	-0.87	3.5	-	IV	NW ORAN.ALG	AM-CNAAG
169	10.11.1983	-	35.93	0.08	3.5	-	IV	MOSTAGANEM.	AM
170	09.06.1984	10 39 49	35.64	-0.17	2.9	20		NW MASCARA.ALG	IGN/ISC/BEN
171	29.01.1985	09 38 32	36.59	-1.73	3.3	34	III	MER MÉDITERRANEÉ	IGN/ISC

N°	Date	Heure	Lat.°	Long.°	M _w	P (km)	Io	Localisation	Référence
		Hh mn sc							
172	15.07.1985	11 20 42	35.58	-1.15	4.1	-	V	MER MÉDITERRANEÉ	AM/IGN/ISC/BEN/CRAAG
173	16.07.1985	-	35.58	-1.15	3.5	-	IV	NW AIN TEMOUCHENT.ALG	AM/ISC
174	18.07.1985	11 13 09	35.38	-1.2	3.5	-	IV	MER MÉDITERRANEÉ	AM/ISC/IGN
175	10.05.1986	13 18 45	35.84	0.29	3.5	23		SE MOSTAGANEM.ALG	IGN, USGS, ISC
176	08.07.1987	09 27 42	35.72	-0.65	3	-	III	ORAN.ALG	AM / IGN / ISC
177	26.09.1987	05 29 19	35.72	-0.65	3.5	-	IV	ORAN.ALG	AM / IGN / ISC
178	04.11.1987	02 58 54	35.67	-0.5	3.5	-	IV	E ORAN.ALG	AM-CRAAG/IGN/ISC
179	13.03.1988	-	35.4	0.13	3.5	-	IV	MASCARA.ALG	AM
180	13.03.1988	11 20 15	35.91	-0.65	3	-		MER MÉDITERRANEÉ	IGN
181	11.06.1988	09 49 49	36.05	-0.76	3.2	33		MER MÉDITERRANEÉ	IGN/BEN/ISC/USGS
182	02.03.1989	02 52 19	35.91	0.57	3.3	-		N RELIZANE.ALG	IGN/ISC/USGS
183	22.04.1989	15 56 29	36.09	-1.71	3.2	-		MER MÉDITERRANEÉ	IGN/ISC/USGS
184	23.04.1989	07 55 06	36.15	-1.77	2.8	-		MER MÉDITERRANEÉ	ISC/USGS
185	15.05.1989	10 37 16	35.92	-0.91	3.2	-		MER MÉDITERRANEÉ	IGN/ISC/USGS
186	23.05.1990	22 52 01	35.75	-1.25	3.5	-		MER MÉDITERRANEÉ	IGN
187	25.05.1990	01 42 28	35.82	-0.92	2.9	-		MER MÉDITERRANEÉ	ISC/USGS/BEN
188	08.03.1991	17 40 49	35.68	0.33	3	5		W RELIZANE.ALG	IGN
189	22.08.1991	10 30 50	35.98	-0.46	3.2	30	III	NE ORAN.ALG	IGN/USGS/ISC
190	27.09.1991	12 11 17	36.68	-1.91	3	5		MER MÉDITERRANEÉ	IGN /ISC
191	20.12.1991	18 56 56	36.09	-1.03	3.2	-		MER MÉDITERRANEÉ	IGN/ISC
192	07.02.1992	18 14 00	35.84	0.11	2.8	7		S MOSTAGANEM.ALG	IGN /ISC /USGS
193	08.02.1992	03 53 39	36.01	0.16	2.6	-		NE MOSTAGANEM.ALG	IGN
194	26.02.1992	10 53 04	36.07	-0.46	3.7	-		MER MÉDITERRANEÉ	IGN /ISC /USGS
195	03.06.1992	15 35 57	36.31	-1.96	3.3	5		MER MÉDITERRANEÉ	IGN
196	22.06.1992	08 10 52	35.39	-0.8	3.3	-		NW SIDI BEL ABBES.ALG	IGN
197	05.08.1992	04 14 23	36.17	-0.33	3	-		MER MÉDITERRANEÉ	IGN
198	23.09.1992	22 43 47	36.15	-0.95	2.7	-		MER MÉDITERRANEÉ	IGN
199	24.09.1992	00 29 20	36.25	-1.82	3.3	4	III	MER MÉDITERRANEÉ	IGN/ISC /USGS
200	25.09.1992	17 52 05	36.92	-1.95	2.6	10		MEDITERRÁNEO	ISC

N°	Date	Heure	Lat.°	Long.°	M _w	P (km)	Io	Localisation	Référence
		Hh mn sc							
201	11.10.1992	10 41 48	36.41	-1.85	2.8	-		MER MÉDITERRANEÉ	IGN
202	17.10.1992	20 43 22	35.3	-1.2	4.8	13	V	W AIN TEMOUCHENT.ALG	IGN-CRAAG/ISC/USGS/HAM
203	06.01.1993	21 39 58	36.67	-1.64	2.8	10		MEDITERRÁNEO	ISC
204	05.01.1993	22 26 06	35.54	-1.47	2.9	-		MER MÉDITERRANEÉ	IGN
205	02.04.1993	11 50 31	36.21	-1.08	2.9	-		MER MÉDITERRANEÉ	IGN
206	07.06.1993	07 36 35	36.77	0.15	2.6	-		MER MÉDITERRANEÉ	IGN
207	09.07.1993	18 12 06	35.7	0.58	3.2	-		RELIZANE.ALG	IGN
208	16.07.1993	01 47 50	35.69	0.07	3.3	-		S MOSTAGANEM.ALG	IGN /ISC /USGS
209	15.08.1993	06 35 43	35.59	-0.33	3	-		SE ORAN.ALG	IGN
210	15.09.1993	21 00 42	36.25	-1.02	2.8	-		MER MÉDITERRANEÉ	IGN
211	29.09.1993	23 22 30	36	-1.57	2.7	-		MER MÉDITERRANEÉ	IGN
212	25.11.1993	18 28 23	34.41	-1.77	3.1	30		SW TLEMCEN.ALG	ISC
213	02.03.1994	22 08 19	36.51	0.84	3.3	5		MER MÉDITERRANEÉ	IGN /ISC /USGS
214	13.05.1994	17 58 34	35.65	-0.94	3.2	13		W ORAN.ALG	IGN /ISC /USGS
215	03.06.1994	-	36.28	-1.47	4.3	-	V	MER MÉDITERRANEÉ	CRAAG
216	08.06.1994	-	35.25	-0.77	4.1	-	V	NW SIDI BEL ABBES.ALG	CRAAG
217	18.08.1994	01 13 07	35.4	0	5.6	-	VII	NW MASCARA.ALG	CRAAG/IGN/USGS/ISC/HAM
218	04.09.1994	06 46 50	35.9	-0.62	3.2	-		MER MÉDITERRANEÉ	ISC/USGS
219	04.09.1994	21 19 04	35.76	-0.4	3.2	-		NE ORAN.ALG	IGN
220	19.09.1994	23 24 29	35.53	0.33	4.5	-	V	E ORAN.ALG	CRAAG/IGN/USGS/ISC
221	24.09.1994	08 57 17	35.58	-0.38	3	-		SE ORAN.ALG	IGN
222	27.09.1994	21 28 04	35.68	-0.26	3.4	-		SE ORAN.ALG	IGN
223	30.09.1994	11 03 15	35.67	-0.37	3	-		SE ORAN.ALG	IGN
224	02.10.1994	02 43 51	35.35	-0.16	3.5	-		W MASCARA.ALG	IGN
225	04.10.1994	00 01 35	35.94	-0.44	3.3	-		NE ORAN.ALG	IGN
226	12.10.1994	23 02 15	36.23	-1.88	2.7	3		MER MÉDITERRANEÉ	IGN
227	20.10.1994	14 54 20	35.83	0.15	3.8	-	IV	MOSTAGANEM.ALG	CRAAG/IGN
228	20.10.1994	14 54 20	36.12	-0.21	3.3	-		MER MÉDITERRANEÉ	IGN
229	04.11.1994	14 45 13	35.5	-0.32	3.5	27		SE ORAN.ALG	IGN

N°	Date	Heure	Lat.°	Long.°	M _w	P (km)	Io	Localisation	Référence
		Hh mn sc							
230	12.10.1994	23 02 15	36.23	-1.88	2.7	3		MER MÉDITERRANEÉ	IGN
231	17.01.1995	-	35.4	0.13	3.5	-	IV	MASCARA.ALG	CRAAG
232	27.01.1995	-	35.42	0.13	3.5	-	IV	MASCARA.ALG	CRAAG
233	31.01.1995	-	35.43	0.13	4.1	-	V	MASCARA.ALG	CRAAG
234	17.01.1995	14 35 52	35.94	-0.84	2.9	10		NW ORAN.ALG	IGN/USGS/ISC
235	27.01.1995	23 53 27	36.04	-1.07	3.3	0		MER MÉDITERRANEÉ	IGN/USGS/ISC
236	31.01.1995	15 40 35	35.65	-0.23	4.9	12		NE ORAN.ALG	IGN/USGS/ISC
237	07.03.1995	03 08 55	36.24	-1.77	2.8	9		MER MÉDITERRANEÉ	IGN/USGS/ISC
238	20.03.1995	22 26 55	36.19	-1.9	3	3		MER MÉDITERRANEÉ	IGN
239	20.03.1995	22 32 22	36.25	-1.86	2.6	19		MER MÉDITERRANEÉ	IGN
240	26.03.1995	12 03 48	35.57	-1.95	2.9	30		MER MÉDITERRANEÉ SEA	ISC
241	01.04.1995	09 18 24	36.29	-1.89	3	11		MER MÉDITERRANEÉ	IGN
242	13.05.1995	-	35.45	-0.02	3.5	-	IV	NW MASCARA.ALG	CRAAG
243	17.05.1995	22 07 52	36.77	-1.9	2.6	9		MER MÉDITERRANEÉ	IGN
244	17.05.1995	23 51 12	36.8	-1.85	2.6	8		MER MÉDITERRANEÉ	IGN
245	10.06.1995	-	35.53	0.33	3.9	-	IV	NE MASCARA.ALG	CRAAG
246	10.06.1995	-	35.42	0.01	4.5	5	V	N MASCARA.ALG	CRAAG/ USGS/ISC
247	14.06.1995	01 32 43	35.79	-1.81	3	4		MER MÉDITERRANEÉ	USGS/ISC
248	03.09.1995	-	35.4	0.13	4.3	-	V	MASCARA.ALG	CRAAG
249	17.09.1995	02 46 53	35.75	0.15	4.1	0	V	SE MOSTAGANEM.ALG	HAM
250	19.09.1995	02 09 37	35.7	0.2	4.2	-	V	S MOSTAGANEM.ALG	CRAAG/IGN/ISC /USGS
251	30.09.1995	19 08 34	35.61	-0.71	3.2	-		SW ORAN.ALG	IGN
252	03.11.1995	23 28 17	35.76	-0.44	3.3	-		NE ORAN.ALG	IGN
253	21.11.1995	00 25 15	35.42	-0.87	3.8	23		NE AIN TEMOUCHENT.ALG	IGN/USGS/IGN
254	21.11.1995	-	35.18	0.72	4.7	-	V	SE MASCARA.ALG	CRAAG
255	07.01.1996	-	36.12	-1.13	3.9	-	IV	MER MÉDITERRANEÉ	CRAAG
256	25.02.1996	08 21 51	35.67	-0.39	3.3	-		E ORAN.ALG	IGN/ ISC/ USGS
257	12.04.1996	10 21 10	36.08	-1.24	2.9	21		MER MÉDITERRANEÉ	IGN/ ISC/ USGS
258	12.04.1996	10 22 20	35.97	-0.22	2.9	-		MER MÉDITERRANEÉ	IGN/ ISC

N°	Date	Heure	Lat.°	Long.°	M _w	P (km)	Io	Localisation	Référence
		Hh mn sc							
259	12.04.1996	03 42 56	35.42	0.2	4.9	-	VI	NE MASCARA.ALG	CRAAG/IGN/ISC /USGS
260	21.04.1996	17 01 55	35.45	0.02	3.6	-	IV	NW MASCARA.ALG	CRAAG
261	27.04.1996	13 07 17	36	-0.89	2.7	-		MER MÉDITERRANEÉ	IGN
262	05.05.1996	21 18 28	37	0.67	2.7	29		MER MÉDITERRANEÉ	IGN
263	31.05.1996	08 47 17	35.35	-0.96	3.6	-	IV	NE AIN TEMOUCHENT.ALG	CRAAG/IGN/ISC /USGS
264	06.07.1996	23 22 36	37	-1.68	2.7	4		MER MÉDITERRANEÉ	IGN/ISC/USGS
265	17.07.1996	03 24 01	36.97	-1.56	3	2		MER MÉDITERRANEÉ	IGN/ISC
266	13.08.1996	08 10 45	35.69	0.53	2.9	27		W RELIZANE.ALG	IGN/ISC
267	19.08.1996	16 21 17	35.9	-1.21	2.7	4		MER MÉDITERRANEÉ	IGN/ISC
268	27.08.1996	01 15 23.40	36.89	-1.54	2.9	10		MER MÉDITERRANEÉ	ISC/IGN /USGS
269	18.12.1996	08 07 58	36.83	-1.8	2.7	11		MER MÉDITERRANEÉ	IGN/ISC/USGS
270	08.01.1997	21 22 05	35.99	-1.1	2.9	-		MER MÉDITERRANEÉ	IGN
271	09.02.1997	07 44 27	35.75	-1.04	2.9	-		W ORAN.ALG	IGN/ISC/USGS
272	22.05.1997	10 15 43	35.74	-1.31	3.5	25		MER MÉDITERRANEÉ	IGN / ISC
273	25.05.1997	10 33 44	35.74	-1.43	3.2	9		MER MÉDITERRANEÉ	IGN /ISC
274	01.12.1997	22 47 31	35.83	0.05	3.8	-	IV	SW MOSTAGANEM.ALG	CRAAG/ISC/IGN/USGA
275	24.12.1997	02 38 03	35.71	-1.16	3	14		MER MÉDITERRANEÉ	IGN
276	17.02.1998	10 52 16	36.98	-1.83	2.9	-		E CARBONERAS.AL	IGN
277	15.03.1998	19 28 37.06	35.95	-1.79	2.6	1.3		MER MÉDITERRANEÉ	IGN/USGS/ISC
278	06.04.1998	00 11 17	37.02	-1.72	3.5	5	III	MER MÉDITERRANEÉ	IGN
279	07.04.1998	07 45 23	35.56	0.07	4.2	-	V	N MASCARA.ALG	CRAAG/IGN/ISC /USGS
280	19.06.1998	00 53 58	36.14	0.91	4	-	V	NE RELIZANE.ALG	CRAAG/IGN/USGS/ISC
281	02.07.1998	04 23 23	35.76	-1.71	2.5	24		MER MÉDITERRANEÉ	IGN/USGS/ISC
282	12.07.1998	13 15 08	37.05	-1.69	2.8	7		MER MÉDITERRANEÉ	IGN/USGS/ISC
283	28.10.1998	10 59 57	35.8	-0.4	2.5	-		NE ORAN.ALG	IGN
284	10.12.1998	17 01 10	35.57	0.33	4.8	-	VI	NW MASCARA.ALG	CRAAG/HAM
285	22.12.1998	05 59 55	36.37	0.14	3	-	III	MER MÉDITERRANEÉ	IGN/USGS/ISC
286	05.01.1999	19 20 41	36.73	-1.77	3	11		MER MÉDITERRANEÉ	IGN/USGS/ISC
287	06.01.1999	01 17 30	36.84	-1.79	3.3	12		MER MÉDITERRANEÉ	IGN

N°	Date	Heure	Lat.°	Long.°	M _w	P (km)	Io	Localisation	Référence
		Hh mn sc							
288	24.02.1999	-	35.52	0.12	4	-	V	N MASCARA.ALG	CRAAG
289	24.02.1999	-	35.85	0.15	3.7	-	IV	SE MOSTAGANEM.ALG	CRAAG
290	24.02.1999	12 02 38	36	-0.05	2.7	12	III	MER MÉDITERRANEÉ	IGN
291	10.07.1999	10 24 49	35.72	-0.38	4.73	-	VI	MER MÉDITERRANEÉ	CRAAG/IGN/USGS/ISC
292	13.08.1999	19 49 35	35.73	0.74	2.6	12	III	E RELIZANE.ALG	IGN/USGS/ISC
293	16.08.1999	19 18 21	36.73	-1.68	2.7	2		MER MÉDITERRANEÉ	IGN
294	03.09.1999	06 43 56	36.96	0.95	4.5	-	VI	MER MÉDITERRANEÉ	IGN/USGS/ISC
295	01.10.1999	08 01 28.71	35.94	-1.72	3.9	0		MER MÉDITERRANEÉ	ISC/IGN
296	15.10.1999	04 16 56	35.83	-1.55	2.5	5		MER MÉDITERRANEÉ	IGN/USGS/ISC
297	20.11.1999	20 00 45	35.99	-0.77	2.9	-		MER MÉDITERRANEÉ	IGN/ISC
298	28.11.1999	17 10 58	36.26	-1.76	2.6	19		MER MÉDITERRANEÉ	IGN
299	22.12.1999	17 36 57	35.25	-1.3	5.8	6	VII	W AIN TEMOUCHENT.ALG	CRAAG/IGN/USGS/ISC
300	22.12.1999	17 36 57	35.23	-1.39	4.3	11	VII	W AIN TEMOUCHENT.ALG	IGN
301	22.12.1999	17 54 24	35.4	-1.39	3	10		NW AIN TEMOUCHENT.ALG	IGN
302	22.12.1999	17 57 20	35.41	-1.3	3	22		NW AIN TEMOUCHENT.ALG	IGN
303	22.12.1999	18 14 19	35.37	-1.49	2.9	1		W AIN TEMOUCHENT.ALG	IGN
304	22.12.1999	18 32 51	35.21	-1.24	2.7	24		SW AIN TEMOUCHENT.ALG	IGN
305	23.12.1999	00 48 17	35.35	-1.11	2.7	-		NE AIN TEMOUCHENT.ALG	IGN
306	23.12.1999	02 13 28	34.76	-0.71	4	0		S SIDI BEL ABBES.ALG	HAM/IGN/ISC
307	24.12.1999	14 25 48	35.38	-1.17	4	0		MER MÉDITERRANEÉ	HAM/IGN/ISC
308	25.12.1999	19 24 18	35.37	-1.48	2.5	-		W AIN TEMOUCHENT.ALG	IGN/ISC
309	31.12.1999	13 23 03	35.32	-1.4	2.6	-		W AIN TEMOUCHENT.ALG	IGN
310	02.01.2000	07 05 36	35.01	-1.02	3.8	0		SE AIN TEMOUCHENT.ALG	ISC
311	03.01.2000	07 50 05	35.36	-1.24	4.1	0		NW AIN TEMOUCHENT.ALG	ISC
312	06.01.2000	11 56 09	35.58	-1.43	3.9	12.4		MER MÉDITERRANEÉ	ISC/IGN
313	13.02.2000	07 41 21	35.62	-1.37	3.9	1.3		MER MÉDITERRANEÉ	ISC
314	18.03.2000	01 29 06	35.11	-1.34	2.6	0		SW AIN TEMOUCHENT	IGN/ISC
315	20.03.2000	15 46 23	35.39	-1.36	2.5	0		NW AIN TEMOUCHENT.ALG	IGN/ISC
316	01.04.2000	00 07 57	35.4	-1.62	3.3	0		MER MÉDITERRANEÉ	ISC

N°	Date	Heure	Lat.°	Long.°	M _w	P (km)	Io	Localisation	Référence
		Hh mn sc							
317	01.04.2000	00 36 51	35.52	-1.53	3.4	0		MER MÉDITERRANEÉ	ISC
318	28.05.2000	12 26 32	35.54	-1.4	2.8	28		MER MÉDITERRANEÉ	IGN
319	04.06.2000	04 59 13	35.89	-1.73	2.8	8.7		MER MÉDITERRANEÉ	IGN/ISC
320	11.06.2000	01 54 08	35.74	-1.33	3	0		MER MÉDITERRANEÉ	ISC / IGN
321	30.07.2000	01 05 15	35.27	-1.15	3.7	10	IV	AIN TEMOUCHENT.ALG	CRAAG/IGN/ISC /USGS
322	23.08.2000	00 42 04	35.1	-0.99	4.5	41	V	S AIN TEMOUCHENT.ALG	CRAAG/IGN/ISC /USGS/HAM
323	27.08.2000	02 25 43	36.32	-0.44	3.3	0		MER MÉDITERRANEÉ	ISC/IGN
324	19.09.2000	00 58 06	35.42	-1.67	3.6	0		MER MÉDITERRANEÉ	ISC/IGN
325	26.09.2000	17 46 03	36.76	-2.03	4.4	11.5		SW NÍJAR.AL	ISC/IGN
326	04.10.2000	13 15 42	36.6	-2.03	2.5	11		ALBORÁN NORTE	IGN/USGS
327	31.01.2001	03 33 23	35.85	-1.14	2.8	28		MER MÉDITERRANEÉ	IGN/ISC/USGS
328	02.02.2001	02 29 53	35.57	-1.34	2.6	0		MER MÉDITERRANEÉ	IGN/ISC/USGS
329	11.02.2001	12 01 56	36.01	-1.2	3.7	5.5		MER MÉDITERRANEÉ	ISC /IGN
330	11.03.2001	21 03 15	36.86	-1.3	3.6	9.9		MER MÉDITERRANEÉ	ISC /IGN
331	27.03.2001	02 34 10	36.13	-0.75	3.6	13.2		MER MÉDITERRANEÉ	ISC /IGN
332	08.06.2001	10 16 43	35.79	-1.23	3.9	10		MER MÉDITERRANEÉ	ISC /IGN
333	13.08.2001	02 22 47	35.55	-1.37	5.1	18		MER MÉDITERRANEÉ	HAM
334	02.12.2001	13 32 16	35.39	-0.42	4	0		NE SIDI BEL ABBES.ALG	IGN/ ISC
335	04.12.2001	10 11 41	35.97	-1.2	2.5	0		MER MÉDITERRANEÉ	IGN/ ISC / USGS
336	18.03.2002	-	36.62	0.99	3	-	III	NW CHLEF.ALG	CRAAG
337	10.04.2002	-	35.66	-0.32	2.5	-	III	SE ORAN.ALG	CRAAG
338	22.04.2002	-	36.15	-0.9	3.2	-	III	MER MÉDITERRANEÉ	CRAAG
339	27.04.2002	-	35.58	0.34	2.5	-	III	N E MASCARA.ALG	CRAAG
340	28.04.2002	-	35.34	0.32	2.5	-	III	NE MASCARA.ALG	CRAAG
341	30.04.2002	-	35.65	-0.35	2.5	-	III	SE ORAN.ALG	CRAAG
342	06.05.2002	-	35.78	-1.04	2.5	-	III	MER MÉDITERRANEÉ	CRAAG
343	11.05.2002	06 28 24	35.61	-1.08	3	0	III	MER MÉDITERRANEÉ	CRAAG/ISC/IGN
344	15.05.2002	-	35.58	-0.37	2.5	-	III	SE ORAN.ALG	CRAAG
345	12.06.2002	-	35.62	-0.39	2.5	-	III	SE ORAN.ALG	CRAAG

N°	Date	Heure	Lat.°	Long.°	M _w	P (km)	Io	Localisation	Référence
		Hh mn sc							
346	23.06.2002	21 00 24	35.85	-0.46	3.6	28		NE ORAN.ALG	IGN
347	30.06.2002	11 33 00	35.94	-0.34	3.7	48		ARZEW-NE ORAN	IGN
348	10.07.2002	01 33 58	35.8	0.12	3.6	-	IV	MER MÉDITERRANEÉ	CRAAG/IGN/USGS/ISC/HAM
349	13.07.2002	03 32 35	35.7	-0.8	3.7	2	IV	NW ORAN.ALG	CRAAG/IGN/USGS/ISC
350	13.07.2002	22 24 15	35.41	-0.29	2.5	16.7	III	W MASCARA.ALG	CRAAG/IGN/ISC
351	21.07.2002	08 32 20	35.65	-1.5	2.8	0	III	MER MÉDITERRANEÉ	CRAAG/IGN/ISC
352	06.08.2002	01 53 32	35.44	-1.14	5	0		N AIN TEMOUCHENT.ALG	HAM/ISC
353	07.08.2002	10 55 06	35.88	-0.31	3.9	67.1	IV	MER MÉDITERRANEÉ	CRAAG/IGN/ISC
354	14.08.2002	19 51 19	36.2	0.32	3.7	0		NE MOSTAGANEM.ALG	IGN/ISC
355	29.08.2002	01 15 31	35.67	-0.62	3.4	0		SW ORAN.ALG	IGN/ISC
356	29.08.2002	02 55 42	35.49	-1.15	3.6	0		N AIN TEMOUCHENT.ALG	IGN/ISC
357	21.09.2002	-	35.57	0.38	3.6	-	IV	E MASCARA.ALG	CRAAG
358	21.09.2002	-	35.3	-0.93	2.5	-	III	NW SIDI BEL ABBES.ALG	CRAAG
359	21.09.2002	-	35.78	-1.53	3.2	-	III	MER MÉDITERRANEÉ	CRAAG
360	21.09.2002	05 16 44	35.23	-0.88	4	15		W SIDI BEL ABBES.ALG	IGN
361	21.09.2002	05 18 48	35.35	-0.91	4	6		E AIN TEMOUCHENT.ALG	IGN
362	21.09.2002	05 32 44	35.3	-0.97	3.8	0		E AIN TEMOUCHENT.ALG	IGN/ISC
363	29.09.2002	07 04 06	35.59	-1.69	3.2	0		MER MÉDITERRANEÉ	IGN/ISC
364	17.10.2002	06 07 30	35.41	-0.51	3.8	0	IV	NE SIDI BEL ABBES.ALG	CRAAG/IGN/USGS/ISC
365	22.10.2002	-	35.9	-0.3	2.5	-	III	NE ORAN.ALG	CRAAG
366	01.11.2002	20 31 20	36.09	0.18	3	10.2	III	NE MOSTAGANEM.ALG	CRAAG/IGN/ISC
367	11.11.2002	20 27 10	35.93	-0.36	3.5	0		NE ORAN.ALG	IGN/ISC
368	01.12.2002	08 38 05	35.43	-0.98	3.9	6.3	IV	NE AIN TEMOUCHENT.ALG	CRAAG/IGN/USGS/ISC
369	07.12.2002	20 41 30	35.69	0.62	2.5	0	III	RELIZAINE.ALG	CRAAG/ISC
370	15.03.2003	13 20 14	34.32	-1.5	4	0		SW TLEMCEN.ALG	IGN/ISC/USGS
371	29.03.2003	04 03 44	35.49	-0,30	2.5	0	III	NW MASCARA.ALG	CRAAG/IGN/ISC
372	17.04.2003	19 58 23	35.92	-1.08	3.3	0		MER MÉDITERRANEÉ	IGN/ISC
373	06.05.2003	06 10 28	35.74	-1.01	4	28		W ORAN.ALG	IGN
374	17.05.2003	23 50 56	35.78	-1.3	3.5	15		MER MÉDITERRANEÉ	IGN

N°	Date	Heure	Lat.°	Long.°	M _w	P (km)	Io	Localisation	Référence
		Hh mn sc							
375	15.06.2003	14 27 20	36.08	0.39	3.3	0	III	NE MOSTAGANEM.ALG	CRAAG/ISC
376	29.06.2003	21 27 50	36.11	0.71	3.4	26.9	IV	NE MOSTAGANEM.ALG	CRAAG/IGN/ISC/USGS/ HAM
377	01.07.2003	03 39 28	35.54	0.24	4.1	18		NE MASCARA.ALG	IGN
378	08.07.2003	18 27 09	36.56	0.87	3.7	0		MER MÉDITERRANEÉ	IGN/ISC
379	23.07.2003	19 28 01	35.71	-0.42	3.6	0		E ORAN.ALG	IGN/ISC
380	01.08.2003	00 59 41	35.6	-1.12	3.8	31		N AIN TEMOUCHENT.ALG	IGN
381	26.08.2003	22 55 53	35.93	-0.41	4	28		NE ORAN.ALG	IGN
382	31.08.2003	19 04 28	36.83	0.56	3.9	0		MER MÉDITERRANEÉ	IGN/ISC
383	16.09.2003	02 15 44	35.73	-0.25	3.2	0		E ORAN.ALG	IGN/ISC
384	23.09.2003	18 37 50	35.11	-0.9768	3.4	16.7	IV	SW MASCARA.ALG	CRAAG/ISC/IGN
385	30.09.2003	11 32 46	36.55	0.93	3.3	0	III	W CHLEF.ALG	CRAAG
386	14.10.2003	22 50 37	35.6	0.71	3	-	III	SE RELIZANE.ALG	CRAAG/IGN/ISC/USGA
387	17.10.2003	05 12 42	35.59	0.77	4	19		SE RELIZANE.ALG	IGN/ISC
388	18.10.2003	01 39 09	35.75	0.58	4.3	20		NE RELIZANE.ALG	IGN/ISC
389	21.10.2003	19 56 17	35.62	-1.01	4.2	28		W ORAN.ALG	IGN/ISC
390	21.10.2003	20 01 37	35.74	-1.1	4	26		MER MÉDITERRANEÉ	IGN/ISC
391	12.11.2003	-	36.56	-0.51	2.7	-	III	MER MÉDITERRANEÉ	CRAAG
392	12.11.2003	-	35.65	-0.4	2.5	-	III	SE ORAN.ALG	CRAAG
393	23.11.2003	00 20 43	36.56	-0.5	2.6	-	III	MER MÉDITERRANEÉ	CRAAG
394	26.12.2003	15 02 51	35.62	0.75	3.6	0		SE RELIZANE.ALG	IGN/ISC
395	06.01.2004	18 43 27	35.71	-1.44	3.2	0	III	MER MÉDITERRANEÉ	IGN/ISC
396	08.01.2004	23 35 31	36.43	0.85	3.5	0	IV	NW CHLEF.ALG	IGN/ISC
397	11.01.2004	16 05 00	35.6	-1.39	3.2	0	III	NORTHERN ALGERIA	ML AL G/EURO-Med/ISC
398	18.01.2004	05 25 05	36.43	-2.1	2.6	11		ALBORÁN NORTE	IGN
399	06.02.2004	09 48 04.0	35.46	-0.07	4.1	20.5	21	NW MASCARA.ALG	HAM
400	06.02.2004	09 48 04	35.46	-0.07	4.2	21	V	NW MASCARA.ALG	ML AL G/EURO-Med/IGN/ISC
401	05.03.2004	02 12 39	35.9	-1.39	3.4	0	IV	MER MÉDITERRANEÉ	ML AL G/ISC
402	05.04.2004	10 32 20	35.46	0.79	3.9	22	IV	SE RELIZANE.ALG	ML AL G/ISC/IGN
403	07.04.2004	06 07 25	35.57	0.36	3.5	10	IV	NE MASCARA.ALG	LGMDD/IGN/ISC/USGS/HAM/EURO-MED

N°	Date	Heure	Lat.°	Long.°	M _w	P (km)	Io	Localisation	Référence
		Hh mn sc							
404	18.04.2004	18 39 36	35.65	-0.05	3.7	24	IV	SW MOSTAGANEM.ALG	ML AL G/IGN/ISC
405	25.04.2004	17 19 55	35.51	0.1	3.9	10	IV	N MASCARA.ALG	ML AL G/EURO-Med/IGN/ISC/USGS
406	11.05.2004	04 39 15	35.9	-0.16	3.6	0	IV	MER MÉDITERRANEÉ	ML AL G/EURO-Med/IGN/ISC
407	22.05.2004	21 55 59	36.01	-0.76	2.7	0	III	NW ORAN.ALG	ML AL G/IGN/ISC
408	30.05.2004	03 45 19	36.12	0.94	2.9	0	III	W CHLEF.ALG	IGN/ISC
409	01.06.2004	03 21 28	36.2	-0.5	3.6	0	IV	MER MÉDITERRANEÉ	UKMDD/IGN/ISC/USGS
410	19.06.2004	10 24 46	35.22	-0.98	3	10	III	NW AIN TEMOUCHENT.ALG	ML AL G/IGN/ISC/USGS
411	08.08.2004	05 41 18	35.92	0.06	4.2	10	V	MOSTAGANEM.ALG	WHDF
412	09.08.2004	22 26 04	36.01	-0.14	3.5	0	IV	MER MÉDITERRANEÉ	UKMDD/IGN/ISC/USGS
413	12.08.2004	23 58 08	35.82	-1.23	3.3	0	III	MER MÉDITERRANEÉ	ML AL G/IGN
414	18.10.2004	22 09 00	35.13	-1.82	3.5	0	IV	NW TLEMCEN.ALG	ML AL G/IGN/ISC/EURO-MED
415	26.11.2004	03 20 52	35.56	-0.54	3.4	0	IV	NE ORAN.ALG	UKMDD/IGN/USGS/ISC
416	29.12.2004	01 05 07	35.73	0.51	3.8	10	IV	SE RELIZANE.ALG	UKMDD/IGN/ISC/USGS/EURO-MED
417	11.03.2005	06 28 29	35.8	-0.23	3.5	0	IV	NE ORAN.ALG	UKMDD/IGN/ISC/USGS
418	18.03.2005	07 00 13	35.86	-0.56	3.8	25	IV	NE ORAN.ALG	UKMDD/IGN/ISC/USGS/EURO-MED
419	24.03.2005	17 23 19	35.29	-2.02	3	72		ALBORÁN SUR	IGN/
420	03.04.2005	13 13 00	35.77	-1.33	3.5	0	IV	MER MÉDITERRANEÉ	UKMDD/IGN/ISC/USGS/EURO-MED
421	07.04.2005	02 48 43	35.58	-0.15	3.5	23	IV	SE ORAN.ALG	UKMDD/IGN/ISC/USGS/EURO-MED
422	10.04.2005	04 42 00	36.11	-0.98	3.3	5	III	MER MÉDITERRANEÉ	UKMDD/EURO-MED
423	18.04.2005	01 22 34	35.65	-0.25	3.6	-	IV	E ORAN.ALG	UKMDD/IGN/ISC/USGS/EURO-MED
424	21.04.2005	16 28 36	35.63	-0.3	3.7	6	IV	E ORAN.ALG	UKMDD/IGN/ISC/USGS/EURO-MED
425	21.05.2005	04 09 49	35.58	-1.29	4.3	10	V	MER MÉDITERRANEÉ	IS CCD/IGN/ISC/USGS/EURO-MED/HAM
426	02.06.2005	07 14 38	35.32	-2.05	3.7	2		ALBORÁN SUR	IGN/ISC
427	12.06.2005	01 28 21	35.71	-1.41	2.7	10	III	MER MÉDITERRANEÉ	ML AL G/IGN/ISC/USGS/EURO-MED
428	24.06.2005	17 06 20	36.67	-1.56	2.8	5	III	MER MÉDITERRANEÉ	LGMDD/IGN/USGS
429	30.06.2005	01 19 22	35.65	-1.54	3.7	11	IV	MER MÉDITERRANEÉ	IGN/ISC/USGS/EURO-MED
430	30.06.2005	02 03 28.72	36.79	-1.67	5	10	VI	MER MÉDITERRANEÉ	ISC
431	07.07.2005	00 30 01	35.67	-1	3.4	-	IV	W ORAN.ALG	UKMDD /IGN
432	07.07.2005	04 11 42	35.71	-0.71	4.3	-	V	W ORAN.ALG	MHDF /IGN

N°	Date	Heure	Lat.°	Long.°	M _w	P (km)	Io	Localisation	Référence
		Hh mn sc							
433	20.07.2005	04 37 01	35.68	-1.09	3.6	23	VIII	W ORAN.ALG	UKMDD/IGN/ISC/USGS/EURO-MED
434	20.07.2005	19 54 07	36.87	0.67	5	10	VI	MER MÉDITERRANEÉ	UKMDD/IGN/ISC/USGS/EURO-MED/HAM
435	23.07.2005	07 43 01	35.37	-1.43	3.5	-	IV	W AIN TEMOUCHENT.ALG	UKMDD /IGN /ISC/ USGS
436	31.07.2005	11 11 29	35.58	0.12	4.2	-	V	N MASCARA.ALG	UKMDD/IGN/ISC/USGS/EURO-MED/HAM
437	31.07.2005	11 16 25	35.51	0.07	3.8	-	IV	NW MASCARA.ALG	UKMDD/IGN/ISC/USGS/EURO-MED
438	01.08.2005	01 41 44	35.55	0.17	4.2	16	V	NE MASCARA.ALG	MHDF/IGN/ISC/USGS/EURO-MED
439	01.08.2005	02 46 29	35.66	0.23	3.3	14	III	NE MASCARA.ALG	UKMDD/IGN/ISC/USGS
440	01.08.2005	03 07 55	35.71	0.13	3.6	5	IV	N MASCARA.ALG	UKMDD
441	08.08.2005	15 00 14.51	35.75	-1.1	3.6	0	IV	MER MÉDITERRANEÉ	UKMDD/ISC/USGS
442	17.08.2005	05 30 56	35.38	0.31	4.3	10	V	E MASCARA.ALG	UKMDD
443	17.08.2005	19 05 27	35.18	0	3.5	10	IV	SW MASCARA.ALG	UKMDD
444	17.08.2005	-	35.38	0.31	4.3	10	V	E-MASCARA	MHDF
445	07.10.2005	04 40 53	35.36	-1.13	3.4	21		NE AIN TEMOUCHENT.ALG	IGN
446	28.12.2005	18 25 37	35.01	-1.32	3.3	75		N TLEMEN.ALG	IGN
447	19.09.2005	02 07 26	36.25	0.4	3.3	-	III	NE MOSTAGANEM.ALG	UKMDD/IGN/ISC/USGS/EURO-MED
448	23.09.2005	18 27 22	35.98	-0.4	3.2	0	III	MER MÉDITERRANEÉ	UKMDD/IGN/USGS/ISC
449	23.09.2005	22 11 38	36.09	-0.63	2.7	0	III	MER MÉDITERRANEÉ	UKMDD/IGN/USGS/ISC
450	06.12.2005	23 10 06	35.74	-0.92	2.8	0	III	MER MÉDITERRANEÉ	UKMDD/ISC/USGS
451	18.01.2006	00 09 38	35.51	-0.63	3.7	0	IV	S ORAN.ALG	UKMDD/IGN/ISC/USGS/EURO-MED
452	31.01.2006	02 46 59	35.79	-1.08	3.6	0	III	W ORAN.ALG	UKMDD/ISC
453	23.07.2006	20 17 15	35.69	0.74	5.2	7	VI	N RELIZANE.ALG	ML AL G/CRAAG/IGN/ISC/USGS/EURO-MED
454	23.07.2006	22 13 30	35.81	0.61	4.5	22	V	NE RELIZANE	MHDF/CRAAG/IGN/ISC/USGS/EURO-MED
455	11.08.2006	05 46 53	36.58	0.99	3.3	22		MER MÉDITERRANEÉ	IGN/ISC
456	15.08.2006	22 10 48	35.5	-1.32	3.4	-	VI	MER MÉDITERRANEÉ	ML AL G/ISC/USGS/EURO-MED/CRAAG
457	19.11.2006	-	35.67	0.28	4.1	-	IV	W RELIZANE.ALG	MHDF
458	21.11.2006	21 45 59	36.18	-1.57	3	4	III	MER MÉDITERRANEÉ	LGMD/ISC/IGN/USGS
459	06.12.2006	21 48 05	35.28	-1.37	3.8	25	IV	E AIN TEMOUCHENT.ALG	UKMDD/IGN/ISC/USGS/EURO-MED
460	06.01.2007	12 35 47	35.76	-1.1	3.7	0		MER MÉDITERRANEÉ	ISC / USGS
461	29.01.2007	14 32 44	35.79	0.95	3.8/ 2.8 ML	18		E RELIZANE.ALG	IGN / ISC

N°	Date	Heure	Lat.°	Long.°	M _w	P (km)	Io	Localisation	Référence
		Hh mn sc							
462	11.02.2007	04 15 18	35.9	-1.09	3.6	6		MER MÉDITERRANEÉ	IGN
463	15.02.2007	00 38 36	35.47	-1.2	3.4	-		N AIN TEMOUCHENT.ALG	IGN/USGS/EURO-MED
464	28.02.2007	12 47 31	35.54	-1.32	3.5	-		MER MÉDITERRANEÉ	CRAAG/ISC/IGN/USGS/EURO-MED
465	09.03.2007	08 17 35.	35.7	-1.67	3.9	29.3		MER MÉDITERRANEÉ	ISC/IGN
466	28.03.2007	20 34 20	35.66	0.56	3.8	32		S RELIZANE.ALG	IGN/ISC/USGS/EURO-MED
467	20.05.2007	17 25 53.40	35.15	-0.2	3.5	-		E SIDI BEL ABBES.ALG	CRAAG
468	09.06.2007	15 32 25	35.7	0.38	3.9	-		W RELIZANE.ALG	IGN/ISC/CRAAG /USGS
469	22.06.2007	22 16 19	35.76	-0.77	3.7	25		NW ORAN.ALG	IGN/ISC/USGS
470	07.07.2007	23 19 56.0	35.49	-1.26	4.9	0		MER MÉDITERRANEÉ	HAM/IGN/USGS/ISC
471	18.07.2007	00 59 59	35.38	-0.09	4.4	16		E MASCARA.ALG	IGN/ISC/USGS/HAM
472	08.08.2007	21 26 27	35.99	0.09	5.1	15.9	V	N MOSTAGANEM.ALG	ISC/CRAAG
473	15.10.2007	23 06 52.65	35.87	-0.76	3.8	24.3		NW ORAN.ALG	CRAAG/ IGN/ ISC/USGS
474	17.10.2007	16 29 39.20	35.1	-0.13	3.5	-		SE MASCARA.ALG	CRAAG/ISC
475	31.10.2007	03 46 46	37.1	0.86	3	19		MER MÉDITERRANEÉ	IGN
476	07.11.2007	-	36.93	0.65	2.5	37	III	MER MÉDITERRANEÉ	ML AL G
477	19.11.2007	16 29 45	35.65	0.11	3.5	-		S MOSTAGANEM.ALG	CRAAG / ISC
478	21.11.2007	18 00 27	35.46	-1.36	2.6	10	III	MER MÉDITERRANEÉ	CRAAG / IGN / ISC / USGS
479	14.12.2007	20 31 21	35.85	0.02	3.5	30		SW MOSTAGANEM.ALG	IGN / ISC / USGS
480	15.12.2007	18 05 41	35.66	-0.58	3.9	5		SE ORAN.ALG	IGN / ISC / USGS
481	30.12.2007	04 10 56	35.44	0.01	3.5	16		NW MASCARA.ALG	IGN / ISC
482	30.12.2007	15 08 50	35.25	-0.07	3.6	-		SW MASCARA.ALG	CRAAG / ISC
483	03.01.2008	16 05 24	35.89	0.12	3.2	2.85		SE MOSTAGANEM.ALG	CRAAG
484	07.01.2008	15 13 25	35.61	0.33	2.7	0.32		SW RELIZANE.ALG	CRAAG
485	08.01.2008	16 25 35	35.35	0.11	2.7	26.12		MASCARA.ALG	CRAAG
486	09.01.2008	22 24 04	35.63	-0.57	5.3	5.63		SE ORAN.ALG	CRAAG
487	09.01.2008	23 55 00	35.65	-0.46	3.8	5.23		SE ORAN.ALG	CRAAG
488	09.01.2008	23 56 40	35.56	-0.49	3.5	1.63		SE ORAN.ALG	CRAAG
489	10.01.2008	02 49 41	35.58	-0.46	3	0.6		SE ORAN.ALG	CRAAG
490	12.01.2008	16 54 51	35.77	0.46	2.8	5.68		SE ORAN.ALG	CRAAG

N°	Date	Heure	Lat.°	Long.°	M _w	P (km)	Io	Localisation	Référence
		Hh mn sc							
491	13.01.2008	15 47 56	35.36	0.16	3	3.08		MASCARA.ALG	CRAAG
492	21.01.2008	15 53 29	35.2	0.27	2.8	13.65		NE MASCARA.ALG	CRAAG
493	21.01.2008	15 59 28	35.6	-0.55	2.6	0.05		SE ORAN.ALG	CRAAG
494	22.01.2008	15 49 19	35.88	-0.46	3.4	5.93		SE ORAN.ALG	CRAAG
495	22.01.2008	17 30 33	35.86	-0.3	3.3	6.01		SE ORAN.ALG	CRAAG
496	25.01.2008	14 24 12	35.84	-0.52	2.6	5.98		SE ORAN.ALG	CRAAG
497	04.02.2008	13 01 23	36.75	1.02	3.2	10		NW CHLEF.ALG	ISC/ IGN
498	05.02.2008	16 24 19	35.62	-0.16	3.2	-		SE MASCARA.ALG	CRAAG
499	18.02.2008	12 35 14	35.87	-1.94	3.8	10		MER MÉDITERRANÉÉ	ISC
500	19.02.2008	15 53 37	35.33	-0.3	3.7	-		NE SIDI BEL ABBES.ALG	CRAAG
501	20.02.2008	08 26 42	35.63	0.52	3.7	10.9		SW RELIZANE.ALG	ISC
502	20.02.2008	11 29 39	35.69	-0.92	3.8	0		W ORAN.ALG	MDD
503	23.02.2008	17 38 14	36.04	0.32	2.8	0.71		SE MOSTAGANEM.ALG	CRAAG
504	28.02.2008	01 53 45	35.45	0.72	3.5	11.32		SE RELIZANE.ALG	CRAAG
505	28.02.2008	15 15 24	35.08	0.49	3.4	3.93		SE MASCARA.ALG	CRAAG
506	01.03.2008	17 57 39	35.79	0.62	2.9	5.99		NE RELIZANE.ALG	CRAAG
507	02.03.2008	04 05 57	36.1	0.25	3.3	4.73		NE MOSTAGANEM.ALG	CRAAG
508	02.03.2008	13 59 45	35.22	0.99	3.5	6.41		SW-TIARET	CRAAG
509	04.03.2008	10 27 01	35.76	0.69	3.3	9.54		NE RELIZANE.ALG	CRAAG/IGN
510	04.03.2008	14 21 16	35.18	0.22	3.2	5.96		MASCARA.ALG	CRAAG
511	09.03.2008	09 12 38	34.97	-0.51	3.2	3.27		SE SIDI BEL ABBES.ALG	CRAAG
512	09.03.2008	18 27 11	35.68	0.54	2.8	17.23		SE RELIZANE.ALG	CRAAG
513	12.03.2008	16 37 32	35.93	0.29	2.9	6.11		SE MOSTAGANEM.ALG	CRAAG
514	12.03.2008	18 32 29	35.6	-1.03	2.7	1.51		W-ORAN	CRAAG
515	13.03.2008	07 34 10	35.76	0.7	2.9	7.05		NE RELIZANE.ALG	CRAAG
516	30.03.2008	15 58 21	35.79	0.62	2.7	5.99		RELIZANE.ALG	CRAAG
517	02.04.2008	16 48 21	35.76	0.64	2.9	3.55		RELIZANE.ALG	CRAAG
518	05.04.2008	15 05 04	35.63	0.69	2.7	3.52		SE-RELIZANE	CRAAG
519	05.04.2008	16 14 16	35.84	0.39	3.2	6.06		NW RELIZANE.ALG	CRAAG

N°	Date	Heure	Lat.°	Long.°	M _w	P (km)	Io	Localisation	Référence
		Hh mn sc							
520	06.04.2008	00 49 48	35.23	-1.22	3.1	3		SW AIN TEMOUCHENT.ALG	CRAAG
521	06.04.2008	16 51 51	35.18	0.11	3.3	13.28		S MASCARA	CRAAG
522	06.04.2008	17 26 17	35.81	0.62	2.7	13.55		RELIZANE.ALG	CRAAG
523	08.04.2008	16 42 45	35.34	-0.13	3.1	6		W-MASCARA	CRAAG
524	12.04.2008	16 32 14	35.38	-0.16	3.3	0.13		W-MASCARA	CRAAG
525	12.04.2008	16 51 13	35.36	0.07	3.3	4.22		W-MASCARA	CRAAG
526	13.04.2008	05 04 55	35.8	0.52	3.2	7.64		RELIZANE.ALG	CRAAG/IGN
527	17.04.2008	17 32 00	35.72	0.58	2.9	6.02		RELIZANE.ALG	CRAAG
528	20.04.2008	12 34 59	35.83	0.74	3	3.3		RELIZANE.ALG	CRAAG
529	26.04.2008	19 43 25	35.76	0.58	2.9	1.21		RELIZANE.ALG	CRAAG
530	06.05.2008	06 35 20	36.43	0.96	3.3	8.76		NW CHLEF.ALG	CRAAG/IGN
531	06.05.2008	23 07 32	36.41	1	3.2	6.79		NW CHLEF.ALG	CRAAG/IGN
532	24.05.2008	02 03 24	35.05	-0.56	3	4.97		S SIDI BEL ABBES.ALG	CRAAG
533	01.06.2008	17 46 35	35.22	0.05	3.1	6		SW-MASCARA	CRAAG
534	06.06.2008	20 02 58	35.81	-0.52	5.5	5.03		NE ORAN.ALG	CRAAG
535	06.06.2008	21 10 40	35.8	-0.56	4.5	3.64		NE ORAN.ALG	CRAAG
536	06.06.2008	21 18 21	35.63	-0.66	3.4	4.44		S ORAN.ALG	CRAAG
537	06.06.2008	22 48 24	35.78	-0.42	3.9	0.1		NE ORAN.ALG	CRAAG
538	07.06.2008	01 39 14	35.58	-0.32	4.2	5.21		SE ORAN.ALG	CRAAG
539	07.06.2008	02 18 14	35.56	-0.51	3.5	1.81		SE ORAN.ALG	CRAAG
540	07.06.2008	02 55 43	35.77	-0.65	3.6	5.04		N ORAN.ALG	CRAAG
541	07.06.2008	07 24 34	35.76	-0.37	3.9	21.82		E ORAN.ALG	CRAAG
542	07.06.2008	13 14 51	35.59	-0.45	3.5	2.21		E ORAN.ALG	CRAAG
543	07.06.2008	19 50 09	35.66	-0.26	3	0.1		NE MASCARA.ALG	CRAAG
544	08.06.2008	16 35 48	35.64	-0.49	2.6	2.75		SE ORAN.ALG	CRAAG
545	08.06.2008	16 52 05	35.77	-0.59	2.6	11.94		NE ORAN.ALG	CRAAG
546	09.06.2008	04 22 39	35.59	-0.29	3.1	11.99		SE ORAN.ALG	CRAAG
547	12.06.2008	09 37 02	35.85	-0.48	3.5	4.99		NE ORAN.ALG	CRAAG
548	12.06.2008	18 59 22	35.15	1.09	3.3	39.04		SW-TIARET	CRAAG

N°	Date	Heure	Lat.°	Long.°	M _w	P (km)	I _o	Localisation	Référence
		Hh mn sc							
549	14.06.2008	18 44 58	35.86	0.58	2.8	6.57		NW RELIZANE.ALG	CRAAG
550	14.06.2008	21 38 50	35.9	-0.51	3.5	4.2		NE ORAN.ALG	CRAAG
551	15.06.2008	10 12 30	35.86	-0.59	3.5	17		NE ORAN.ALG	CRAAG
552	16.06.2008	11 13 19	35.87	0.22	2.8	5.37		SE MOSTAGANEM.ALG	CRAAG
553	19.06.2008	21 39 58	35.57	-0.53	3.1	11.38		SE ORAN.ALG	CRAAG
554	20.06.2008	01 34 10	35.71	-0.39	3.5	6.09		E ORAN.ALG	CRAAG
555	29.06.2008	05 03 10	35.92	-0.58	3.3	0		MER MÉDITERRANEÉ	IGN/ISC
556	11.07.2008	17 04 36	35.62	-0.53	3.6	4.57		SE ORAN.ALG	CRAAG
557	16.07.2008	04 25 15	35.66	0.6	3.3	8.55		S RELIZANE.ALG	CRAAG
558	24.07.2008	17 19 57	35.76	-0.44	3.4	7.44		NE ORAN.ALG	CRAAG
559	25.07.2008	21 34 40	35.96	-1.1	3.4	30		MER MÉDITERRANEÉ	IGN/ISC
560	26.08.2008	01 11 54	35.81	-0.63	3.4	2.33		MER MÉDITERRANEÉ	CRAAG
561	29.08.2008	19 41 40	35.89	-0.61	3.8	0		MER MÉDITERRANEÉ	IGN/ISC
562	15.09.2008	17 43 55	35.72	0.26	4.1	6.27		SE MOSTAGANEM.ALG	CRAAG
563	30.09.2008	03 28 39	35.81	-0.68	3.2	1.21		MER MÉDITERRANEÉ	CRAAG
564	01.10.2008	10 32 28	35.78	-0.45	3.3	2.58		NE ORAN.ALG	CRAAG
565	11.10.2008	19 38 35	35.89	-0.4	3.6	9.11		NE ORAN.ALG	CRAAG
566	15.10.2008	17 49 11	35.79	-0.4	2.9	4.95		NE ORAN.ALG	CRAAG
567	17.10.2008	00 08 03	35.15	-0.38	3.3	6.55		W SIDI BEL ABBES.ALG	CRAAG
568	19.10.2008	16 24 04	35.78	0.28	2.8	5.01		SE MOSTAGANEM.ALG	CRAAG
569	06.11.2008	19 00 44	35.27	0.31	3.2	10		SE MASCARA.ALG	CRAAG/ISC
570	09.11.2008	15 17 43	35.85	0.56	3	6.25		RELIZANE.ALG	CRAAG
571	16.11.2008	18 02 19	36.51	0.11	3.6	10		MER MÉDITERRANEÉ	IGN/ISC
572	27.11.2008	18 03 09	35.03	-1.78	2.8	10		NW TLEMCEN.ALG	CRAAG/ISC
573	20.12.2008	14 26 37	35.67	1.03	2.9	17.42		NW-TIARET	CRAAG
574	24.12.2008	16 04 34	35.83	0.48	2.9	0.22		NW- RELIZANE.ALG	CRAAG
575	28.12.2008	14 18 09	35.94	0.25	2.6	5.59		SE MOSTAGANEM.ALG	CRAAG
576	04.01.2009	14 04 40	35.72	0.25	3.4	7.87		SE MOSTAGANEM.ALG	CRAAG
577	15.01.2009	06 49 24	35.55	0.44	3	18.63		SW-RELIZANE	CRAAG

N°	Date	Heure	Lat.°	Long.°	M _w	P (km)	Io	Localisation	Référence
		Hh mn sc							
578	17.01.2009	15 46 01	35.83	0.45	3.1	9.34		NW-RELIZANE	CRAAG
579	23.01.2009	20 37 30.0	35.32	-0.51	3	7.02		NE SIDI BEL ABBES.ALG	CRAAG
580	24.01.2009	22 03 15.7	35.75	0.07	2.8	5.75		SW MOSTAGANEM.ALG	CRAAG/IGN
581	28.02.2009	16 20 08	35.82	0.57	2.7	14.19		NW-RELIZANE	CRAAG
582	03.03.2009	03 22 41.5	35.9	-0.62	3.1	6.03		NE ORAN.ALG	CRAAG
583	20.03.2009	21 07 57.6	35.67	-0.23	3.1	6		SIG- E ORAN	CRAAG
584	06.04.2009	17 46 35.0	35.89	0.58	2.9	6.1		NW-RELIZANE	CRAAG
585	13.04.2009	17 23 28.5	35.82	0.57	2.7	1		NW-RELIZANE	CRAAG
586	14.04.2009	13 05 19.2	35.83	0.58	2.7	4.77		NW-RELIZANE	CRAAG
587	29.04.2009	16 57 06.0	36.72	0.99	3.6	9.29		MER MÉDITERRANEÉ	CRAAG
588	11.05.2009	04 59 14.8	35.84	0.71	3.2	6.08		NE-RELIZANE	CRAAG
589	11.05.2009	16 20 23.8	35.78	0.16	3.2	8.83		S MOSTAGANEM.ALG	CRAAG
590	18.05.2009	14 45 59.9	35.5	0.99	3	37.25		NW-TIARET	CRAAG
591	20.05.2009	17 22 59.3	36.39	1.01	2.6	0.06		NW-CHLEF	CRAAG
592	23.05.2009	12 49 53.6	35.46	0.73	2.6	47.65		SW-RELIZANE	CRAAG
593	23.05.2009	14 55 35.2	35.81	0.52	2.7	0.14		NW-RELIZANE	CRAAG
594	28.05.2009	16 20 34.9	35.46	0.41	2.9	0.32		NE MASCARA.ALG	CRAAG
595	29.05.2009	11 58 05.7	35.55	-0.78	2.6	11.97		SW ORAN.ALG	CRAAG
596	02.06.2009	05 00 03.2	35.5	-0.89	3.9	9.99		SW ORAN.ALG	CRAAG
597	10.06.2009	12 27 59.1	35.55	0.94	3.2	5.95		NW-TIARET	CRAAG
598	10.06.2009	15 04 51.2	35.64	0.95	2.6	5.5		NW-TIARET	CRAAG
599	11.06.2009	05 42 17.1	35.76	0.56	4.7	9.36		RELIZANE.ALG	CRAAG
600	11.06.2009	08 26 09.3	35.92	0.49	4.2	6.92		E MOSTAGANEM.ALG	CRAAG
601	14.06.2009	04 47 54.3	36.47	0	3.2	0		MER MÉDITERRANEÉ	CRAAG/ISC
602	14.06.2009	13 42 27.3	35.88	0	2.7	2.13		SW MOSTAGANEM.ALG	CRAAG
603	14.06.2009	04 47 54	36.14	-0.06	3.5	20		MER MÉDITERRANEÉ	IGN
604	14.06.2009	14 58 28.6	35.75	0.72	2.5	11.94		E RELIZANE.ALG	CRAAG
605	27.06.2009	22 50 55.3	35.93	-0.73	2.7	5.69		MER MÉDITERRANEÉ	CRAAG
606	28.06.2009	14 01 53.9	34.74	-0.02	3.3	14.86		SW-SAIDA	CRAAG

N°	Date	Heure	Lat.°	Long.°	M _w	P (km)	I _o	Localisation	Référence
		Hh mn sc							
607	30.06.2009	08 04 36.0	35.35	-1.86	2.7	10		MER MÉDITERRANEÉ	CRAAG
608	02.07.2009	16 02 55.1	35.4	-0.15	3.3	5.89		W-MASCARA	CRAAG
609	04.07.2009	14 15 00.8	35.47	0.65	3.1	33.4		S RELIZANE.ALG	
610	11.07.2009	07 28 10.6	36.19	0.43	2.8	19.86		NE MOSTAGANEM.ALG	CRAAG
611	23.07.2009	06 18 07.4	35.7	0.35	3.1	3.47		W RELIZANE.ALG	CRAAG
612	04.08.2009	15 27 35.8	35.63	0.01	3.2	5.93		NW MASCARA.ALG	CRAAG
613	13.08.2009	12 04 36.8	35.34	0.68	3.2	73.15		S RELIZANE.ALG	CRAAG
614	13.08.2009	15 01 26.4	35.55	0.18	3.1	3.65		N MASCARA.ALG	CRAAG
615	24.08.2009	16 39 15.3	34.95	-0.22	3.3	6		NW SAIDA	CRAAG
616	24.08.2009	15 46 19.0	34.21	0.27	4.4	3.06		NW SAIDA	CRAAG
617	27.08.2009	14 54 35.5	35.51	0.2	2.8	9.12		MASCARA.ALG	CRAAG
618	31.08.2009	14 43 05.9	35.25	0.65	2.7	25.71		SE MASCARA.ALG	CRAAG
619	17.09.2009	13 54 43.0	36.21	0.43	2.9	6		NE MOSTAGANEM.ALG	CRAAG
620	20.09.2009	11 14 28.3	35.54	0.19	3	6		NE MASCARA.ALG	CRAAG
621	25.09.2009	23 30 58.6	35.32	-0.75	3.5	2.18		NW SIDI BEL ABBES.ALG	CRAAG
622	26.09.2009	16 54 22.2	35.94	-0.23	2.9	11.32		ARZEW-NE ORAN	CRAAG
623	27.09.2009	01 26 03.5	35.66	-1.53	3.2	5.74		MER MÉDITERRANEÉ	CRAAG
624	04.10.2009	14 54 49.6	36.14	-0.33	3.2	6		MER MÉDITERRANEÉ	CRAAG
625	10.10.2009	21 19 11.1	35.75	0.44	2.5	8.87		W RELIZANE.ALG	CRAAG
626	11.10.2009	14 17 13.8	35.3	0.9	3.1	6.41		W TIARET.ALG	CRAAG
627	15.10.2009	15 11 03.0	35.44	0.22	3.2	3.08		MASCARA.ALG	CRAAG
628	25.10.2009	15 38 11.5	35.44	0.21	3	6.65		MASCARA.ALG	CRAAG
629	30.10.2009	03 33 40.3	35.78	0.44	3.6	6.8		W RELIZANE.ALG	CRAAG
630	31.10.2009	23 55 37.2	35.72	0.55	3.2	4.33		W RELIZANE.ALG	CRAAG
631	01.11.2009	22 09 19.5	35.62	0.58	3	2.07		S RELIZANE.ALG	CRAAG
632	08.11.2009	15 07 16.7	35.68	0.18	2.9	3.47		S MOSTAGANEM.ALG	CRAAG
633	12.11.2009	13 02 39.0	35.08	1.01	3.2	-		SW-TIARET	CRAAG/ISC
634	15.11.2009	15 06 54.7	35.68	1.1	2.6	6		NW-TIARET	CRAAG
635	17.11.2009	21 16 10.7	36.42	1	3	7.54		NW-CHLEF	CRAAG

N°	Date	Heure	Lat.°	Long.°	M _w	P (km)	Io	Localisation	Référence
		Hh mn sc							
636	24.11.2009	13 53 17.8	35.83	0.26	2.8	6		SE MOSTAGANEM.ALG	CRAAG
637	24.11.2009	14 37 38.2	35.58	0.16	2.7	1.94		N MASCARA.ALG	CRAAG
638	18.12.2009	19 10 36.3	34	0.07	4.8	5.46		NE MECHRIA	CRAAG
639	20.12.2009	13 27 46.4	35.6	0.98	3	2.94		SE RELIZANE.ALG	CRAAG
640	20.12.2009	14 28 38.1	35.41	0.73	2.5	38.48		SE RELIZANE.ALG	CRAAG
641	21.12.2009	02 45 00.7	35.55	-0.01	4.8	5.11		NW MASCARA.ALG	CRAAG/ IGN
642	21.12.2009	02 54 03.1	35.44	-0.1	3.5	6		NW MASCARA.ALG	CRAAG
643	21.12.2009	15 04 37.8	35.66	0.16	2.5	5.58		N MASCARA.ALG	CRAAG
644	21.12.2009	19 35 10.2	35.7	0.06	2.5	6.15		SW MOSTAGANEM.ALG	CRAAG
645	22.12.2009	02 17 30.5	35.39	0.05	4.4	5.37		W MASCARA.ALG	CRAAG/ IGN
646	22.12.2009	10 33 44.5	35.69	0.09	2.5	6.33		SW MOSTAGANEM.ALG	CRAAG
647	22.12.2009	15 12 06.4	35.69	0.04	2.9	7.41		SW MOSTAGANEM.ALG	CRAAG
648	25.12.2009	21 00 26.5	35.62	0.17	2.7	6.5		N MASCARA.ALG	CRAAG
649	29.12.2009	13 51 13.8	35.31	-0.42	2.7	5.54		NE SIDI BEL ABBES.ALG	CRAAG
650	30.12.2009	14 26 20.1	36.06	0.35	2.5	0.57		NE MOSTAGANEM.ALG	CRAAG
651	31.12.2009	13 15 46.8	35.75	0.25	2.8	7.06		W RELIZANE.ALG	CRAAG
652	04.01.2010	14 20 01.2	35.9	0.1	3.3	8.91		MOSTAGANEM.ALG	CRAAG/ IGN
653	04.01.2010	15 47 08.0	35.36	-0.06	3.8	2.97		NW MASCARA.ALG	CRAAG/ IGN
654	06.01.2010	13 05 54.6	35.56	0.14	3	15.91		MASCARA.ALG	CRAAG
655	10.01.2010	17 59 50.7	35.39	0.2	3.7	6.27		MASCARA.ALG	CRAAG
656	11.01.2010	01 29 33.4	35.34	0.27	3.3	5.96		MASCARA.ALG	CRAAG
657	11.01.2010	17 02 45.2	35.38	-0.73	3.6	6.41		NW SIDI BEL ABBES.ALG	CRAAG
658	12.01.2010	14 51 23.4	35.65	1.01	2.6	3.14		SE RELIZANE.ALG	CRAAG
659	13.01.2010	22 24 40.7	36.51	0.95	4	1.48		MER MÉDITERRANEÉ	CRAAG
660	13.01.2010	22 24 41	36.62	0.92	2.8	19		MER MÉDITERRANEÉ	IGN
661	17.01.2010	15 30 47.5	35.56	0.12	3.1	7.01		N MASCARA.ALG	CRAAG
662	20.01.2010	17 23 48.0	35.32	1.04	2.7	1.66		W TIARET.ALG	CRAAG
663	27.01.2010	14 40 41.7	35.68	0.23	2.8	4.53		S MOSTAGANEM.ALG	CRAAG
664	28.01.2010	22 27 33.5	35.85	-0.71	3	0.75		NW ORAN.ALG	CRAAG

N°	Date	Heure	Lat.°	Long.°	M _w	P (km)	Io	Localisation	Référence
		Hh mn sc							
665	28.01.2010	23 13 59.8	35.75	-0.49	3	3.21		NE ORAN.ALG	CRAAG
666	02.02.2010	03 30 09.3	35.58	-0.54	2.9	4.49		NE ORAN.ALG	CRAAG
667	04.02.2010	08 24 33.1	35.13	-0.38	2.6	2.14		SE SIDI BEL ABBES.ALG	CRAAG
668	04.02.2010	14 24 13.0	35.78	0.1	2.6	5.99		S -MOSTAGANEM.ALG	CRAAG
669	09.02.2010	08 38 49.2	35.81	0.57	3.4	9.43		RELIZANE.ALG	CRAAG
670	25.02.2010	14 34 05.9	35.57	0.03	3	5.08		MOHAMMADIA, W RELIZANE	CRAAG
671	02.03.2010	13 28 46.5	35.53	0.67	2.8	0.01		S- RELIZANE.ALG	CRAAG
672	11.03.2010	00 40 46.1	36.35	0.93	2.7	3.65		W-TENES. ALG	CRAAG
673	19.03.2010	10 07 57.6	35.83	-0.89	3.5	8.34		NW ORAN.ALG	CRAAG
674	23.03.2010	09 53 46.6	35.69	0.68	3	2.56		E RELIZANE.ALG	CRAAG
675	25.03.2010	14 27 23.2	35.57	-0.07	3.7	7.73		NW MASCARA.ALG	CRAAG
676	29.03.2010	01 36 55.1	35.59	0.46	2.9	11.48		SW RELIZANE.ALG	CRAAG
677	29.03.2010	14 46 38.4	35.5	0.43	2.7	8.02		SW RELIZANE.ALG	CRAAG
678	29.03.2010	14 48 53.2	35.43	0.41	2.5	6.46		SW RELIZANE.ALG	CRAAG
679	31.03.2010	17 35 36.7	35.51	0.5	3.3	5.72		SW RELIZANE.ALG	CRAAG
680	05.04.2010	11 21 50.2	35.52	-0.03	3.4	8.25		NW MASCARA.ALG	CRAAG/ IGN
681	12.04.2010	11 51 40.4	35.8	-0.79	2.5	0.86		NW ORAN.ALG	CRAAG
682	13.04.2010	13 18 47.3	35.58	-0.07	2.9	3.13		NW MASCARA.ALG	CRAAG
683	27.04.2010	17 57 56.7	34.86	0.5	3.2	10.67		E- SAIDA, ALG	CRAAG
684	28.04.2010	14 21 30.6	35.53	0.62	2.6	6.63		S RELIZANE.ALG	CRAAG
685	01.05.2010	01 51 38.2	35.99	0.32	3	4.4		E MOSTAGANEM.ALG	CRAAG
686	01.05.2010	04 39 34.7	35.74	0.52	2.9	2.45		RELIZANE.ALG	CRAAG
687	02.05.2010	16 37 34.4	35.28	0.27	3.1	8.19		SE MASCARA.ALG	CRAAG
688	27.05.2010	17 12 33.8	35.23	0.84	2.9	4.78		NW FRENDA-TIARET	CRAAG
689	30.05.2010	13 33 01.2	35.33	0.23	3	10.98		SE MASCARA.ALG	CRAAG
690	30.05.2010	14 45 24.8	35.57	0.6	3	15.94		S RELIZANE.ALG	CRAAG
691	06.06.2010	05 30 14.4	35.26	-1.98	3.3	1.18		ALBORÁN SUD	CRAAG
692	07.06.2010	21 25 29.0	35.52	-0.04	3.5	8.16		NW MASCARA.ALG	CRAAG
693	09.06.2010	20 11 56.9	35.78	-0.75	2.5	5.74		NW ORAN.ALG	CRAAG

N°	Date	Heure	Lat.°	Long.°	M _w	P (km)	Io	Localisation	Référence
		Hh mn sc							
694	13.06.2010	12 51 43.1	35.47	0.59	2.9	2.65		S RELIZANE.ALG	CRAAG/ IGN
695	13.06.2010	22 40 33.5	35.79	0.55	3.2	5.34		N RELIZANE.ALG	CRAAG/ IGN
696	14.06.2010	01 00 14.8	35.44	0.32	3.6	3.25		E MASCARA.ALG	CRAAG/ IGN
697	16.06.2010	07 15 07.6	35.68	0.54	2.7	21.59		RELIZANE.ALG	CRAAG
698	16.06.2010	15 09 28.4	35.49	0.25	2.9	3.56		E MASCARA.ALG	CRAAG
699	22.06.2010	16 40 55.1	35.19	0.65	2.9	0.14		SE MASCARA.ALG	CRAAG
700	23.06.2010	16 57 35.0	34.77	-1.84	3.2	3.61		SW-MAGHNIA	CRAAG
701	24.06.2010	13 40 21.0	35.16	-0.12	2.8	21.35		SW-BOU HANIFIA	CRAAG
702	12.07.2010	16 10 50.0	35.6	0.063	3.4	6.04		MOHAMMADIA, W RELIZANE	CRAAG
703	15.07.2010	13 00 23.8	35.62	1.08	3	4.97		NW-TIARET	CRAAG
704	18.07.2010	16 56 12.7	35.47	-0.71	2.8	17.39		S-ORAN	CRAAG
705	20.07.2010	15 19 58.8	35.54	-1.2	2.9	5.71		NW AIN TEMOUCHENT.ALG	CRAAG
706	21.07.2010	13 29 00.1	35.69	0.6	2.6	8.56		RELIZANE.ALG	CRAAG
707	22.07.2010	15 47 14.0	35.61	0.96	2.6	7.06		SE RELIZANE.ALG	CRAAG
708	28.07.2010	12 48 13.5	35.5	0.45	2.5	2.56		SW-RELIZANE	CRAAG
709	04.08.2010	14 52 16.1	35.48	-0.28	3	12.17		SE-ORAN	CRAAG
710	06.08.2010	03 02 05.4	35.8	-0.38	3.2	4.87		NE-ORAN	CRAAG
711	08.08.2010	13 23 26.1	35.72	0.85	2.6	4.72		E RELIZANE.ALG	CRAAG
712	08.08.2010	13 49 32.2	35.58	0.76	2.9	4.52		SE RELIZANE.ALG	CRAAG
713	09.08.2010	13 26 27.9	35.4	0.04	3.1	18.16		MASCARA.ALG	CRAAG
714	15.08.2010	05 35 24.2	35.79	0.39	3.3	9.4		RELIZANE.ALG	CRAAG
715	22.08.2010	11 58 46.57	36.17	0.22	3.8	0		NE-MOSTAGANEM	MDD/ISC
716	24.08.2010	21 19 19.6	35.16	-1.18	3.2	2.68		SW AIN TEMOUCHENT.ALG	CRAAG
717	26.08.2010	05 54 46.1	36.36	0.99	2.5	2.92		SW-TENES	CRAAG
718	03.09.2010	06 02 53.1	35.64	-0.53	2.7	2.63		ORAN	CRAAG
719	18.09.2010	02 12 13.0	35.91	-0.68	2.5	2		N ORAN	CRAAG
720	19.09.2010	15 40 09.2	35.16	0.82	2.8	8.06		W-TIARET	CRAAG
721	28.09.2010	04 11 25.5	35.77	0.54	3.2	30.92		RELIZANE.ALG	CRAAG
722	30.09.2010	13 20 41.6	35.46	-0.22	2.9	23.07		SIG	CRAAG

N°	Date	Heure	Lat.°	Long.°	M _w	P (km)	Io	Localisation	Référence
		Hh mn sc							
723	02.10.2010	02 56 36.1	35.77	0.51	3.5	6.5		RELIZANE.ALG	CRAAG
724	14.10.2010	01 43 01.3	35.56	0.8	2.5	13.27		SE RELIZANE.ALG	CRAAG
725	20.10.2010	14 26 01.5	35.52	0.67	2.7	1.18		SE RELIZANE.ALG	CRAAG
726	27.10.2010	13 47 46.3	35.55	-0.27	3	11.28		SIG	CRAAG
727	28.10.2010	14 56 50.5	36.31	1.02	3.3	4.61		NW CHLEF	CRAAG
728	29.10.2010	16 08 17.5	35.74	-1.69	3.3	1.18		MER MÉDITERRANEÉ	CRAAG
729	03.11.2010	01 20 46.5	35.76	0.55	3	11.5		RELIZANE.ALG	CRAAG
730	07.11.2010	00 06 17.9	35.72	-0.07	2.7	3.69		E ORAN.ALG	CRAAG
731	08.11.2010	15 31 24.9	35.55	-0.76	3	3.6		SW ORAN.ALG	CRAAG
732	11.11.2010	14 37 16.0	35.64	0.2	3.1	19.26		S MOSTAGANEM.ALG	CRAAG
733	14.11.2010	16 40 45.3	35.42	1.12	2.6	19.85		NW TIARET.ALG	CRAAG
734	20.11.2010	09 11 56.7	35.85	0.09	3.2	3.83		MOSTAGANEM	CRAAG
735	06.12.2010	15 08 05.6	35.68	0.22	3.2	7.85		W RELIZANE.ALG	CRAAG
736	09.12.2010	13 51 48.0	35.6	0.52	2.8	8.06		SE RELIZANE.ALG	CRAAG
737	13.12.2010	13 50 26.9	36	-0.62	3	6		MER MÉDITERRANEÉ	CRAAG
738	16.12.2010	15 18 50.4	35.23	0.11	2.7	0.62		S MASCARA.ALG	CRAAG
739	28.12.2010	14 45 24.5	35.7	0.72	2.6	5.17		E RELIZANE.ALG	CRAAG

« Analyse spectrale des données géodésiques (GPS) pour l'identification et l'interprétation des mouvements de terrain - Application aux précurseurs sismiques du littoral Oranais »

Résumé: Notre travail s'oriente particulièrement à l'étude des anomalies ionosphériques produites lors d'activité sismique enregistrées à la faveur du contenu électronique 'TEC' de la couche ionosphérique. L'objectif de la présente recherche est focalisé sur deux principaux axes: étudier les données géodésiques et géophysiques permettant de modéliser la membrane ionosphérique F2 'TEC-Mapping', et de développer une approche prédictive du risque sismique basée sur le couplage séismo-ionosphérique (lithosphère-ionosphère). Ce travail confirme que l'espace occupé entre ces deux enveloppes est formé par une consistante structure, saturée en électron-photons, assurant la transmission des ondes électromagnétiques générées lors de la nucléation sismique des roches en profondeur. De ce fait, le tracé du signal mesuré 'GPS_TEC' devient nécessaire pour détecter précisément le temps d'arrivée des anomalies ionosphériques pré-sismiques (précurseurs) engendrées lors d'une activité tellurique notable ($M_w \geq 5$) couvrant ainsi une aire déterminée selon l'ampleur du choc principal étudié. Le constat envisagé concernera l'efficacité de cette approche géodésique qui repose a priori sur des tests itératifs des données géodésiques obtenus des stations intégrant une superficie proportionnelle au champ de la propagation tellurique envisagée. Vu que le nombre des stations GNSS permanentes reste problématique pour assurer la surveillance territoriale selon la dimension des provinces géographiques étudiées et vu la non homogénéité de la répartition de ces stations sur la Méditerranée occidentale; la couverture de l'Oranais reste insuffisante en matière de données GPS/GNSS (fichiers Rinex). Ces contraintes ont permis d'ouvrir le champ d'investigation, en termes de prévision sismique, sur plusieurs événements à l'échelle eurasiatique. Quant à l'application de cette approche à l'échelle régionale (Algérie Nord occidentale) nous soulignons l'intérêt d'utilisation de plusieurs métriques de réseaux: IGS, IGN, USGS et CRAAG pour l'acquisition de données des magnitudes sismiques et de données GPS qui ont permis l'étude détaillée de plusieurs évènements de magnitudes modérées à majeures: évènement affectant la marge littorale d'Oran 2008, Ain Témouchent 1999, Alboran 2016, Népal 2015 et les tremblements dévastateurs ayant affectés la péninsule Italienne en 2016. L'analyse minutieuse de ces séismes, enregistrés durant la période 1999-2016, a permis d'obtenir des résultats conséquents à la prévision sismique où le délai de temps (prévisionnel) est de l'ordre de quelques jours à quelques semaines précédant le choc principal. Par ailleurs, d'autres résultats basés sur la modélisation d'occurrence des répliques sismiques ont révélé l'existence d'une corrélation entre les précurseurs séismo-ionosphériques et les répliques. Ce fait s'adapte mieux avec la ponctualité éventuelle de la réponse ionosphérique aux variations spectrales. Enfin, cette étude confirme l'hypothèse du couplage entre l'enveloppe lithosphérique et ionosphérique permettant de prédire les tremblements de terre au-dessus des régions séismogènes.

Mots clés: Marge littorale de l'Ouest algérien; Couplage & précurseurs séismo-ionosphériques; Fichiers Rinex; GPS/GNSS; Contenu électronique total; Signal GPS_TEC; TEC-Mapping.

« Spectral analysis of geodetic data (GPS) for identification and interpretation of ground movements - Application to seismic precursors on the Oran coastal »

Abstract: This work is particularly aimed for studying the ionospheric anomalies produced during seismic activity recorded through the ionospheric total electron content 'TEC'. The purpose of this research is focused on two axes: investigate both geodetic and geophysical data that allows modeling the F2 ionospheric membrane 'TEC-Mapping', and develop a predictive approach to seismic hazard based on the seismo-ionospheric coupling (lithosphere-ionosphere). This study confirms that the occupied space between these two elements consists of a coherent structure, saturated with electron-photons, ensuring the transmission of electromagnetic waves generated during the seismic nucleation of rocks at depth. Therefore, the analysis of the measured GPS_TEC signal becomes necessary to accurately detect the arrival time of pre-earthquake ionospheric anomalies (precursors) generated during a notable seismic activity ($M_w \geq 5$). The intended finding will concern the effectiveness of this geodetic approach which is based a priori on iterative tests of geodetic data derived from permanent ground-based GNSS stations; with an area proportional to the field of the seismic wave propagation. Given that the GPS network density remains problematic for providing territorial monitoring and given the non-homogeneous distribution of these stations over the southwest Mediterranean; the nationwide coverage of GPS/GNSS data (RINEX files), including the Oran region, remains lacking. These constraints have allowed extending the field of our investigation, in terms of seismic prediction, into several earthquakes on a Eurasian area. Regarding the application of this approach to the northwestern region of Algeria, we underline the interest of using several networks: IGS, IGN, USGS and CRAAG to obtain metadata which enabled to study several events; such as the 2008 Oran earthquake, 1999 Ain Témouchent, 2016 Alboran, 2015 Nepal and several devastating tremors that affected the Italian peninsula in 2016. Thorough analysis of these moderate to major earthquakes, recorded during 1999-2016, highlighted significant results in terms of seismic prediction where the time-span (forecast) ranges from a few days to a few weeks preceding the main event. Furthermore, other results based on the modeling of seismic aftershocks occurrence have revealed a correlation between seismo-ionospheric precursors and aftershocks. Finally, this work can be considered a useful approach to predict the impending earthquake through the ionospheric status above seismogenic regions.

Key words: Coastal margin of Western Algeria; Seismo-ionospheric precursors & coupling; Rinex files; GPS/GNSS; Total electron content; GPS_TEC signatures; TEC-Mapping.

« التحليل الطيفي للمعطيات الجيوديسية (GPS) لتحديد وتفسير الحركات الأرضية - تطبيق على السلانف الزلزالية للساحل الوهراني »

المخلص: يعالج موضوع بحثنا دراسة الاضطرابات الأيونوسفيرية التي تسبق النشاط الزلزالي و المسجلة بواسطة المحتوى الإلكتروني الكلي لطبقة الأيونوسفير. وعلية يهدف هذا العمل الى انشاء خرائط الغشاء الأيونوسفيري لمعرفة التنبؤ الزلزالي، استنادا على البيانات الجيوديسية/الجيوفيزيائية و على مبدأ الإقتران بين غلاف الأرض الصخري (أيونوسفير) والأغشية المؤينة للغلاف الجوي العلوي (الطبقة الأيونوسفيرية المتأينة F2). يؤكد هذا البحث أن المساحة المشغولة بين هذين الغلافين تتكون من بنية متسقة، مشبعة بالجزئيات النشطة (الإلكترونات بشكل أساسي) المسؤولة عن إرسال الموجات الكهرومغناطيسية بطريقة متسرة و مندفعة، الناتجة عن تكسر الصخور في باطن الأرض (المصدر الزلزالي)، غيورا بالغلاف الجوي السفلي و طبقة الأيونوسفير. ونتيجة لذلك، فإن دراسة قياسات إشارة GPS_TEC مهمة حتى تتمكن من اكتشاف الاضطرابات الزلزالية-الأيونوسفيرية المسجلة أثناء أي نشاط زلزالي (درجة 5 أو أكثر على سلم ريشر). تستند طريقة بحثنا إلى دراسة البيانات الجيوديسية التي تم الحصول عليها مسبقا من محطات GNSS و التي تغطي منطقة تتناسب مع مجال انتشار الموجات الزلزالية. بالنظر إلى أن هذه المحطات الثابتة لا يزال يمثل عائقا لضمان المراقبة الإقليمية وبالنظر إلى التوزيع الغير متجانس لهذه المحطات على أقاليم دول غرب البحر المتوسط؛ لا تزال تغطية منطقة الغرب الجزائري (ناحية وهران) غير كافية من حيث البيانات الجيوديسية (البيانات و الرسائل الملاحية: Rinex). و بالتالي اضطررنا إلى فتح مجال بحثنا نحو عدة أقاليم مختلفة من العالم. فيما يتعلق بتطبيق هذا النهج على النطاق الإقليمي لشمال غرب الجزائر، قمنا باستخدام عدة شبكات جيوديسية و جيوفيزيائية محلية و عالمية لاستغلال البيانات اللازمة مما سمح لنا بإجراء دراسة تفصيلية للعديد من الهزات الأرضية ذات درجات متباينة: زلزالي الشريط الساحلي للغرب الجزائري: وهران 2008 و عين تموشنت 1999، البوران 2016، نيبال 2015 و العديد من الهزات التي ضربت إيطاليا 2016. تجدر الإشارة أن التحليل العلمي الدقيق لهذه الأحداث الزلزالية المسجلة خلال الفترة الممتدة من 1999 إلى 2016، الحصول على نتائج تتوافق مع التنبؤ الزلزالي؛ حيث حددت المدة الزمنية التي سبقت الحدث الرئيسي ببضعة أيام إلى بضعة أسابيع. و علاوة على ذلك، أكدت نتائج أخرى مرتبطة بنمذجة الهزات الارتدادية وجود توافق جيد بين عدد هذه الهزات و عدد السلانف الزلزالية-الأيونوسفيرية. أخيرا، تؤكد هذه الدراسة فرضية الإقتران بين غلاف الأرض الصخري و الطبقة الأيونوسفيرية و التي تسمح بالتنبؤ الزلزالي.

كلمات مفتاحية:

الشريط الساحلي للغرب الجزائري؛ التنبؤ الزلزالي؛ اقتران: ليووسفير-أيونوسفير؛ بيانات نظام التموضع العالمي؛ خرائط المحتوى الإلكتروني الكلي؛ قياسات الإشارة الجيوديسية.