

UNIVERSITÉ DE LIÈGE
Faculté des Sciences
Sciences géographiques

ÉTUDE CLIMATOLOGIQUE
DES IRRÉGULARITÉS
IONOSPHERIQUES DÉTECTÉES
À L'AIDE DES GNSS

Mémoire présenté par

Gilles WAUTELET

dans le cadre d'un

**Diplôme d'études approfondies
en Sciences**

Année académique

2006 – 2007

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué à l'élaboration de ce travail.

Monsieur Warnant, promoteur de ce mémoire, pour son accompagnement durant cette année ainsi que pour ses nombreuses remarques constructives.

Ensuite, mes collègues de l'IRM qui, par leurs conseils judicieux et leur aide, ont rendu ce travail réalisable.

Enfin, je remercie tout particulièrement mes parents, mon frère, Justine et toutes les personnes qui m'ont apporté leur soutien tout au long de cette année.

Table des matières

1	INTRODUCTION	1
1.1	Motivation	1
1.2	Plan du travail	2
2	LES IRRÉGULARITÉS DE L'IONOSPHERE	3
2.1	Les irrégularités ionosphériques détectées par les systèmes GNSS	3
2.1.1	Préambule	3
2.1.2	Les <i>Travelling Ionospheric Disturbances</i> ou TID's	4
2.1.3	Le bruit ionosphérique (<i>Noise-like Structures</i> ou NLS)	6
2.2	Les causes des irrégularités ionosphériques	7
2.2.1	Préambule : le Soleil et les interactions Terre – Soleil	8
2.2.2	Les radiations EUV et X	11
2.2.3	Les perturbations géomagnétiques	13
2.2.4	Autres causes	20
2.3	La météorologie de l'espace – <i>Space Weather</i>	21
3	DÉVELOPPEMENT D'UN FILTRE POUR LES MAUVAISES MESURES	22
3.1	Point de départ	22
3.2	La mesure du Contenu Électronique Total par GPS	23
3.3	Les mauvaises mesures et leurs causes	27
3.3.1	Mauvaise détection de saut de cycles	27
3.3.2	L'effet multi-trajets (<i>multipath</i>) et le bruit	30
3.3.3	Analyse pour un jour particulier	32
3.4	Validation des données avant filtrage	36

3.4.1	Principes	36
3.4.2	Sélection des jours à valider	38
3.4.3	Résultats	39
3.5	Développement du filtre	40
3.5.1	Filtre simple	40
3.5.2	Filtre sélectif	41
3.5.3	Validation du filtre	42
3.6	Validation des données après filtrage	44
4	ÉTUDE DES IRRÉGULARITÉS IONOSPHERIQUES AUX LATI- TUDES MOYENNES	45
4.1	Étude climatologique des irrégularités ionosphériques	46
4.1.1	Probabilité d'occurrence des irrégularités ionosphériques de 2001 à 2006	46
4.1.2	Validité des statistiques	58
4.2	Quantification de l'amplitude des irrégularités ionosphériques	61
4.2.1	Caractérisation de l'amplitude des irrégularités	62
4.2.2	Validité du calcul du RoTEC	64
4.2.3	Conditions typiques et extrêmes	66
4.3	Étude de cas particuliers	68
4.3.1	Éruption solaire du 28 octobre 2003 (DOY 301/03)	68
4.3.2	Tempête géomagnétique du 20 novembre 2003 (DOY 324/03)	70
4.3.3	TID du 24 décembre 2004 (DOY 359/04)	72
4.4	Conclusions	73
5	CONCLUSIONS	75
	BIBLIOGRAPHIE	77

Chapitre 1

INTRODUCTION

1.1 Motivation

De nos jours, les technologies spatiales comme les systèmes globaux de positionnement par satellites (*Global Navigation Satellite Systems* ou GNSS) dépendent de manière continue des conditions de la météorologie spatiale (*Space Weather*); cette discipline englobe l'ensemble des méthodes et concepts relatifs aux interactions entre l'atmosphère terrestre et le Soleil. Sur Terre, les conséquences provoquées par des phénomènes solaires comme des éruptions ou des tempêtes géomagnétiques sont nombreuses et variées : corrosion accélérée des pipe-lines, pannes de satellites ou de réseau électrique... Les phénomènes d'origine solaire provoquent également des perturbations ionosphériques qui entraînent une dégradation de la précision des applications GNSS.

À l'heure actuelle, de récentes techniques de positionnement GPS basées sur l'envoi de corrections différentielles par une station de référence (comme le *Real-Time Kinematic* ou RTK) permettent, d'une manière générale, d'obtenir une précision de l'ordre de quelques centimètres en temps réel. Toutefois, l'ionosphère constitue la principale limitation à la précision de ces méthodes de positionnement. En effet, en présence d'irrégularités ionosphériques importantes, la précision nominale de ces applications n'est plus atteinte : l'erreur de position peut alors devenir supérieure à un mètre.

Les utilisateurs de ces techniques de positionnement sont ainsi de plus en plus demandeurs de systèmes de prévisions ionosphériques à court et moyen terme. Celles-ci se basent généralement sur l'estimation de paramètres d'activité géomagnétique et relèvent donc de la météorologie spatiale. Cependant, les irrégularités ionosphériques qui affectent les systèmes de positionnement ne sont pas uniquement dues aux phénomènes issus du *space weather*. En effet, les *Travelling Ionospheric Disturbances* (TID's) que l'on définit comme des ondes se propageant dans le plasma ionosphérique sont égale-

ment capables de dégrader de manière importante la précision des applications RTK.

Dans ce cadre, l'analyse de la distribution des irrégularités ionosphériques dans le temps peut fournir de précieuses informations quant au risque d'occurrence de ces irrégularités pour une époque considérée. Dès lors, il est nécessaire d'établir une étude statistique qui permet de décrire la distribution temporelle des irrégularités ionosphériques pour une station de latitude moyenne. De cette manière, il est possible d'informer les utilisateurs des GNSS des périodes à risque où une dégradation de la précision des applications est attendue.

Le but de ce travail est de réaliser une étude climatologique des irrégularités ionosphériques se produisant aux latitudes moyennes sur base du calcul des gradients temporels du Contenu Électronique Total (TEC) effectué pour une seule station de mesure GPS.

1.2 Plan du travail

Notre travail se divise en trois parties.

Le chapitre 2 aborde les différents types d'irrégularités ionosphériques que l'on peut observer par GPS pour une station de latitude moyenne. A partir de là, on détaille les différentes causes à l'origine de ces irrégularités.

Dans le chapitre 3, on explique le calcul du contenu électronique total de l'ionosphère et de ses gradients temporels. Dans la suite, on détaille le développement d'un filtre automatique qui permet de détecter les mauvaises mesures qui figurent dans les séries temporelles des gradients de TEC. La validation ainsi que l'efficacité du filtre sont évaluées au terme de ce chapitre.

Le chapitre 4 propose une étude climatologique des irrégularités ionosphériques sur base des gradients temporels du TEC. On y aborde la relation qu'il existe entre la fréquence d'occurrence des irrégularités et la phase du cycle solaire. On analyse également le comportement journalier moyen de la variabilité ionosphérique en fonction des saisons. Enfin, une analyse quantitative définit les conditions moyennes (typiques) et extrêmes de la variabilité ionosphérique que l'on peut observer à une station de latitude moyenne.

Chapitre 2

LES IRRÉGULARITÉS DE L'IONOSPHERE

Dans la première section de ce chapitre, nous passons en revue les différentes irrégularités ionosphériques que l'on peut observer grâce aux constellations de satellites de positionnement, couramment appelées *Global Navigation Satellite Systems* ou GNSS et dont l'exemple le plus connu du grand public est le système GPS (*Global Positioning System*). La section suivante détaille les principales causes des irrégularités temporelles de l'ionosphère ; on verra que celles-ci peuvent être classées en trois catégories distinctes.

2.1 Les irrégularités ionosphériques détectées par les systèmes GNSS

2.1.1 Préambule

L'ionosphère est la couche de l'atmosphère terrestre qui est située généralement entre 50 et 1000 km d'altitude et dans laquelle le nombre d'électrons libres est suffisant pour affecter la propagation des ondes électromagnétiques. Ainsi, les signaux émis par les satellites GNSS qui traversent l'atmosphère terrestre sont soumis à la réfraction ionosphérique ; celle-ci dépend d'un paramètre appelé Contenu Électronique Total (ou *Total Electron Content* – TEC) qui représente l'intégrale de la concentration en électrons libres sur le chemin "satellite-station" (c'est-à-dire la somme des électrons libres situés dans un cylindre de section unitaire et dont la génératrice est la ligne de visée entre le récepteur et le satellite). Le **décalage ionosphérique** I peut être exprimé de la

manière suivante :

$$I = \frac{40.3}{f^2} \text{STEC} \quad [\text{m}] \quad (2.1)$$

avec f la fréquence de l'onde porteuse et STEC le TEC oblique (*Slant TEC*).

Les récepteurs géodésiques traditionnels avec lesquels nous travaillons effectuent uniquement des mesures toutes les 30 s. Cette cadence de mesure peut s'avérer insuffisante si on veut étudier le comportement des variations très rapides de l'ionosphère comme les *Smallest-Scale size TID's* (cf. infra) : WAUTELET (2006) a montré qu'une cadence de 30 s pouvait entraîner le fait que la TID "perçue" à l'aide de GPS est assez différente de la TID réelle ; cet effet est d'autant plus important que la longueur d'onde de la TID est petite. De plus, le mouvement relatif entre le satellite et la TID modifie la perception de celle-ci puisque le satellite n'est pas un "observateur au repos". Au final, les observations issues des récepteurs GNSS sont toujours affectées (déformées) par la géométrie de la constellation et la précision de la détection est proportionnelle à la cadence d'observation.

Ces effets indissociables des données GNSS peuvent être vus comme un problème ou non selon le type de travail que l'on a à accomplir. Si le but du travail est de pouvoir estimer le budget d'erreur dû à l'ionosphère et aux structures locales sur les observations GNSS (comme par exemple, le travail de la section "Profils ionosphériques" de l'Institut Royal Météorologique - IRM), alors les biais introduits par la géométrie de la constellation ne posent pas de problème. Par contre, si le but du travail est d'étudier les variations de l'ionosphère au niveau quantitatif (taille, vitesse... des structures) comme le font les physiciens ionosphéristes, ces mêmes biais doivent être éliminés des données afin que celles-ci soient rendues exploitables.

Dans la suite de cette section, nous décrivons les deux principales structures que l'on peut observer à l'aide des systèmes GNSS. Dans la pratique, nous avons utilisé les observations GPS, et en particulier celles réalisées par le réseau de récepteurs de l'Observatoire Royal de Belgique en place depuis 1993. Dans la suite du travail, nous présentons donc les résultats relatifs aux observations GPS.

2.1.2 Les *Travelling Ionospheric Disturbances* ou TID's

Les TID's sont des variations périodiques de la concentration en électrons libres Ne qui se propagent dans l'ionosphère à la manière d'une onde ; elles sont donc caractérisées par une période, une amplitude et une longueur d'onde. S'il se produit une variation périodique dans Ne , cet effet apparaît également dans le TEC et dans les gradients

temporels du TEC ; c'est ce que l'on observe grâce aux récepteurs GPS qui mesurent le TEC toutes les 30 s. A la figure 2.1, on montre la variation des gradients temporels du TEC durant le passage d'une TID en fonction de l'heure locale.

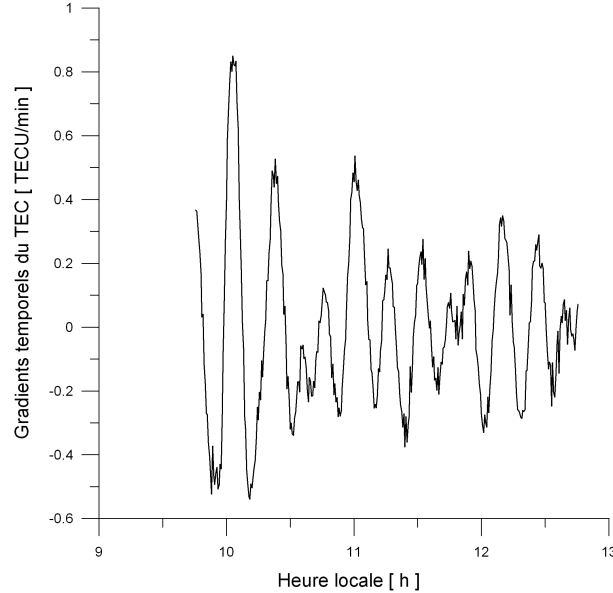


Figure 2.1: Gradients temporels du TEC durant le passage d'une TID

On classe généralement les TID's selon les paramètres morphologiques qu'elles présentent ; on distingue ainsi :

- les **Large-Scale TID's (LSTID's)** : ces TID's sont caractérisées par des longueurs d'onde supérieures à 1000 km, des vitesses situées généralement entre 400 et 1000 m/s et des périodes comprises entre 30 min et 3 h. La direction de propagation préférentielle de ces structures est Nord → Sud.
- les **Medium-Scale TID's (MSTID's)** : elles présentent des périodes comprises entre 10 min et 1 h et des vitesses s'étalant généralement entre 50 et 300 m/s. La direction de propagation des MSTID's est différente selon l'heure locale et la saison : HERNÁNDEZ-PAJARES (2006), TSUGAWA (2007) et RADICELLA (2004) ont montré que les MSTID's se produisant en hiver se propagent généralement la journée vers l'équateur tandis que les TID's se produisant les mois d'été se déplacent durant la nuit vers l'Ouest. Les vitesses de ces TID's sont également différentes : les vitesses des TID's observées durant l'hiver sont comprises entre 100 et 400 m/s tandis que celles détectées en été ont une vitesse située entre 50 et 200 m/s. Ces vitesses issues de (HERNÁNDEZ-PAJARES *et al.* 2006) sont moins élevées si on considère les travaux de (TSUGAWA *et al.* 2007). Ainsi, il

existe une certaine divergence entre les auteurs qui concerne la quantification des paramètres intrinsèques des MSTID's comme la vitesse de propagation ou la longueur d'onde.

- les **Smallest-Scale size TID's (SSTID's)** : ces TID's définies par certains auteurs (WARNANT *et al.* 2007) sont caractérisées par des longueurs d'onde de plusieurs dizaines de kilomètres et des périodes de quelques minutes. Les vitesses évaluées pour ce type de TID's sont inférieures à 100 m/s.

L'apparition des TID's semble être liée à la présence d'ondes de gravité (*Atmospheric Gravity Waves* - AGW) qui se propagent dans le milieu ionosphérique. Le lieu et la manière dont se forment les AGW sont différents selon la catégorie à laquelle appartient la TID analysée. Dans les sections 2.2.3 et 2.2.4, nous analysons de manière plus précise les causes de la génération des AGW et les catégories de TID's incriminées.

Dans la pratique, les différents types de TID's peuvent se superposer et il est dès lors plus difficile de détecter le type de structure que l'on observe (TSUGAWA *et al.* 2003).

2.1.3 Le bruit ionosphérique (*Noise-like Structures* ou NLS)

Le champ magnétique terrestre peut être apparenté à un dipôle dont l'axe ne coïncide pas avec l'axe de rotation de la Terre, ce qui implique que les latitudes magnétique et géographique diffèrent l'une de l'autre. Par ailleurs, l'angle entre ces deux axes fluctue avec le temps. Dès lors, on désigne trois zones relatives au champ géomagnétique : les zones polaires, les zones de latitude moyenne et la région équatoriale. Dans la région équatoriale, les lignes de force du champ magnétique sont pratiquement parallèles à l'horizon, tandis que dans les zones polaires elles lui sont pratiquement perpendiculaires.

Dans la pratique, c'est dans les zones équatoriale et polaires que l'on observe les gradients temporels et spatiaux du TEC les plus importants. Plus particulièrement, c'est dans ces mêmes zones que l'on observe des *scintillations* sur les phases des ondes porteuses émises par les satellites GPS. Les scintillations se présentent comme des variations en amplitude et en phase des signaux électromagnétiques qui traversent le milieu ionosphérique. De telles scintillations sont donc en théorie impossibles à observer pour des régions de latitude moyenne comme la Belgique. Cependant, l'analyse des observations à la station GPS de Bruxelles montre une signature semblable à celle des scintillations (WARNANT 2005) ; on parle alors de bruit ionosphérique (*Noise-like Structure* ou NLS). Un exemple de NLS est montré à la figure 2.2.

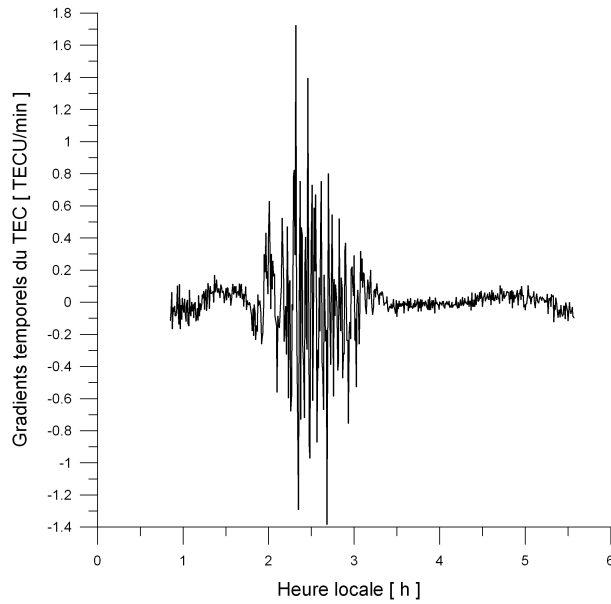


Figure 2.2: Gradients temporels du TEC durant la présence d'une NLS

L'apparition de bruit ionosphérique dans une station de latitude moyenne est à mettre en relation avec des évènements géomagnétiques importants comme les tempêtes géomagnétiques (*geomagnetic storms*). Contrairement aux TID's de courtes longueurs d'onde, la fréquence d'occurrence de tels phénomènes semble donc liée à l'activité solaire puisque les tempêtes géomagnétiques sont plus nombreuses et plus importantes durant les phases de maximum d'activité solaire. Les causes de l'apparition des tempêtes géomagnétiques sont abordées en détails dans la section 2.2.3.

2.2 Les causes des irrégularités ionosphériques

L'existence de l'ionosphère est due à la présence continue des radiations solaires dans le domaine X et extrême-UV ; en réalité, seuls les photons dont la longueur d'onde correspond à ce spectre sont capables d'ioniser les atomes de la haute atmosphère (création d'électrons libres). Les principaux processus destructeurs d'électrons libres sont la recombinaison et la capture. La recombinaison consiste en la formation d'un atome ou d'une molécule neutre à partir d'un électron et d'un ion positif ; la capture consiste à former un ion négatif à partir d'un atome (ou d'une molécule) neutre et d'un électron. La densité électronique N_e –exprimée en électrons/cm³– de l'ionosphère est donc le résultat d'un équilibre entre le processus producteur et les processus destructeurs d'électrons libres. Cependant, il existe un autre facteur susceptible de modifier la den-

sité électronique : c'est le transport d'électrons qui peut être dû à différentes causes, comme les perturbations géomagnétiques qui trouvent leur origine sur le Soleil. Enfin, d'autres causes liées aux conditions météorologiques ou plus généralement à la basse atmosphère sont également la source de perturbations de la densité électronique N_e de l'ionosphère.

2.2.1 Préambule : le Soleil et les interactions Terre – Soleil

Le rayonnement solaire est la cause principale de l'ionisation qui a lieu dans la haute atmosphère. Dès lors, tentons de décrire sa structure (interne et externe) afin de comprendre les mécanismes responsables des variations ionosphériques que l'on peut observer sur Terre.

La structure interne du Soleil est généralement divisée en trois couches concentriques que l'on appelle **coeur**, **zone radiative** et **zone convective** (fig. 2.3).

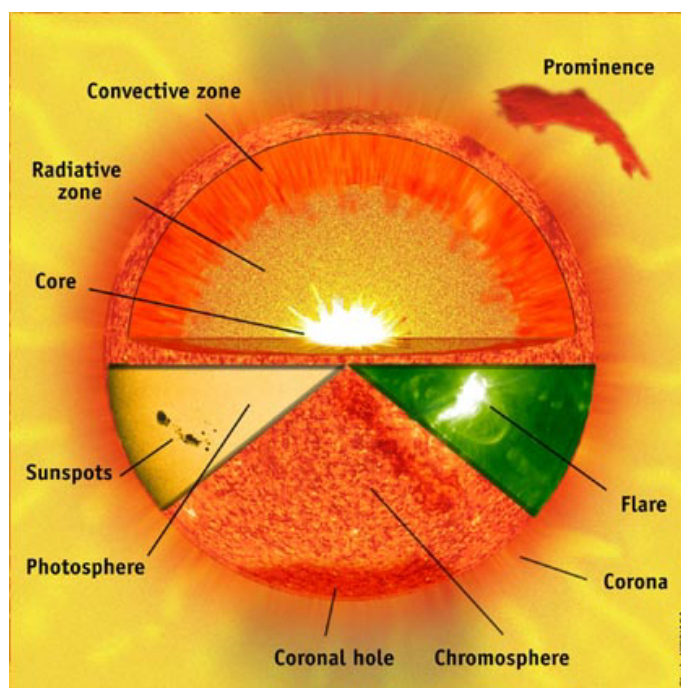


Figure 2.3: Structure interne du Soleil (Source : ESA/NASA)

- Le coeur est le siège des réactions thermonucléaires qui produisent du rayonnement gamma ; il s'étend du centre jusqu'à approximativement un tiers de son rayon. La température est approximativement de $15 \cdot 10^6$ K et la densité est de l'ordre de plusieurs dizaines de grammes par centimètre cube.

- La zone radiative est la zone qui s'étend de la limite supérieure du coeur jusqu'à environ $7/10^{\text{ème}}$ du rayon ; c'est dans cette zone que l'énergie des photons diminue pour atteindre le domaine ultraviolet.
- Dans la zone convective, la matière ionisée se met en mouvement dans de grandes cellules de convection appelées *granules* qui s'organisent en motifs de plus grandes dimensions appelés *motifs supergranulaires*. Les champs magnétiques solaires ne sont pas dipolaires et sont confinés entre les granules car la pression du gaz est supérieure à la pression magnétique.

L'atmosphère solaire peut être considérée comme la partie du Soleil où a lieu la dissipation de l'énergie produite dans les couches internes. Elle est également constituée de trois couches concentriques appelées **photosphère**, **chromosphère** et **couronne** (fig. 2.3).

- La photosphère est la couche que nous apercevons à l'oeil nu ; la température qu'il y règne est approximativement de 5780 K. C'est dans cette zone de l'atmosphère solaire que 95% du rayonnement total du Soleil est envoyé vers l'espace sous forme de lumière visible et de radiations infrarouge. La surface de la photosphère est parsemée de taches sombres où il règne un champ magnétique unipolaire intense ainsi qu'une température avoisinant seulement les 4000 K : ce sont les *taches solaires*.
- La chromosphère est la zone de l'atmosphère solaire située au-dessus de la photosphère et dans laquelle la température est sans cesse croissante. Les structures chromosphériques principales que l'on peut observer sont les *plages brillantes* (grandes étendues brillantes entourant les régions actives comme, par exemple, les taches) et les protubérances. Ces dernières sont des structures mixtes qui sont également observables dans la couronne. Il s'agit de grandes draperies lumineuses qui sont soit quiescentes soit éruptives ; dans ce dernier cas, elles peuvent être associées à des éjections de masse coronale (*Coronal Mass Ejection* ou CME - cf. infra).
- La couronne est la région la plus chaude et la moins dense de l'atmosphère solaire ; elle prend naissance au sommet de la chromosphère mais s'étend bien au-delà de l'orbite terrestre. Ainsi, la Terre est située dans la couronne solaire et subit perpétuellement les effets dûs aux perturbations de cette région. A cause de la faible densité de la couronne, c'est dans cette région que les champs magnétiques provenant de l'intérieur du Soleil s'amplifient ; la pression magnétique devient supérieure à la pression du gaz. Cette propriété de la couronne façonne toute la topologie coronale : celle-ci est composée d'une multitude de boucles

magnétiques de tailles diverses (le *tapis magnétique*). Étant donné la température qu'il y règne, la couronne n'est composée que d'atomes fortement ionisés et d'électrons. Ces éléments sont sensibles aux champs magnétiques ; de ce fait, les ions suivent le tracé des boucles coronales. La figure 2.4 montre un exemple de boucle coronale prise par le satellite TRACE de la NASA (*National Aeronautics and Space Administration*).

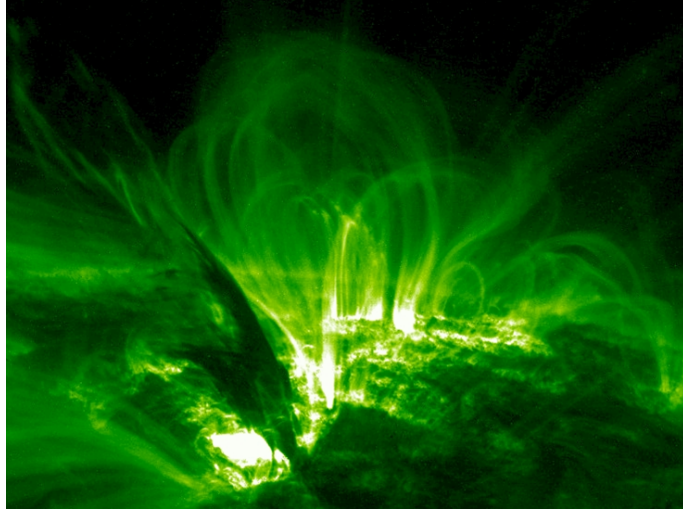


Figure 2.4: Boucles magnétiques tracées par la matière ionisée
(Source : NASA. Image TRACE)

La morphologie de la couronne est très variable avec le cycle d'activité solaire dont la durée est approximativement de 11 ans.

Durant la période de minimum d'activité, on observe de grands *trous coronaux* au niveau des pôles uniquement. Les trous coronaux constituent des régions magnétiques unipolaires qui sont la source d'un *vent solaire rapide*. Ce dernier est dit rapide car la vitesse moyenne des particules qui le composent (principalement hélium et hydrogène) est supérieure à la vitesse moyenne des particules qui s'échappent d'autres régions de la couronne et qui forment le *vent solaire lent*. Comme le nombre de taches solaires est (pratiquement) nul à cette période, les régions actives qui les entourent sont peut nombreuses et le nombre de grandes boucles coronales est restreint. Ces caractéristiques indiquent que la production de rayonnement à haute énergie (extrême UV ou EUV et rayons X mous¹) est relativement faible pendant la phase de minimum solaire.

Durant la phase de maximum d'activité, les trous coronaux sont localisés à toutes les latitudes et on retrouve donc de telles structures le long de l'équateur solaire.

¹Les rayons *X mous* sont des photons d'énergie comprise entre 0,1 keV et 10 keV.

Le nombre de taches solaires² est maximum durant cette phase, ce qui implique que de grandes structures en boucles sont présentes. La luminosité dans le spectre X et EUV est également à son maximum d'intensité si on considère l'ensemble du cycle solaire. Durant les phases intermédiaires, les trous coronaux se situent à des latitudes intermédiaires et le nombre de taches solaires est situé entre le minimum et le maximum ; ce qui implique que le rayonnement de haute énergie présente un niveau de luminosité intermédiaire.

Durant les phases de forte activité solaire, divers phénomènes éruptifs peuvent survenir dans la couronne. Les plus connus d'entre eux sont les éjections de masse coronale (*Coronal Mass Ejection* ou CME) qui consistent en des flux de particules ionisées extrêmement énergétiques qui s'échappent du Soleil. Un champ magnétique intense accompagne ces flots de matière durant leur propagation dans l'atmosphère coronale ; on parle de *corde de flux* ou de *nuage magnétique*. Si une CME est dirigée vers la Terre, l'interaction entre l'atmosphère terrestre et la CME peut causer divers effets comme des surtensions dans les fils électriques à haute latitude, une corrosion accélérée des pipe-lines, des pannes de satellites et bien évidemment une variabilité ionosphérique importante qui diminue la précision des applications GNSS.

Les différentes causes géomagnétiques qui sont à la base de la variabilité ionosphérique sont reprises dans la section 2.2.3. Dans la section suivante, nous nous penchons sur les effets ionosphériques induits par les radiation EUV et X et leur variabilité.

2.2.2 Les radiations EUV et X

Nous avons donc vu que le rayonnement EUV et X mou est fortement corrélé avec le cycle solaire ; cette propriété explique la raison pour laquelle le TEC moyen varie avec le cycle solaire. En effet, les atomes majoritaires qui sont situés dans les hautes couches de l'atmosphère sont sensibles au rayonnement à haute énergie tel que celui porté par les photons EUV et X mous. Dès lors, l'ionisation est d'autant plus importante durant la phase de maximum d'activité solaire ; la figure 2.5 illustre ces propos.

Outre cette lente variation du TEC moyen avec le cycle solaire, il existe une autre source de variabilité ionosphérique à très courte échelle de temps : il s'agit des **éruptions solaires** (*solar flares*). Les éruptions solaires consistent en un chauffage brutal de la couronne (qui est portée à plus de 10^7 K) qui est associé à une reconfiguration

²Le nombre de taches solaires indique le niveau d'activité solaire et est caractérisé par le *Nombre de Wolf* $R_z = k(10g + f)$ avec g le nombre de groupes de taches, f le nombre de taches individuelles et k un facteur de correction qui dépend des instruments utilisés.

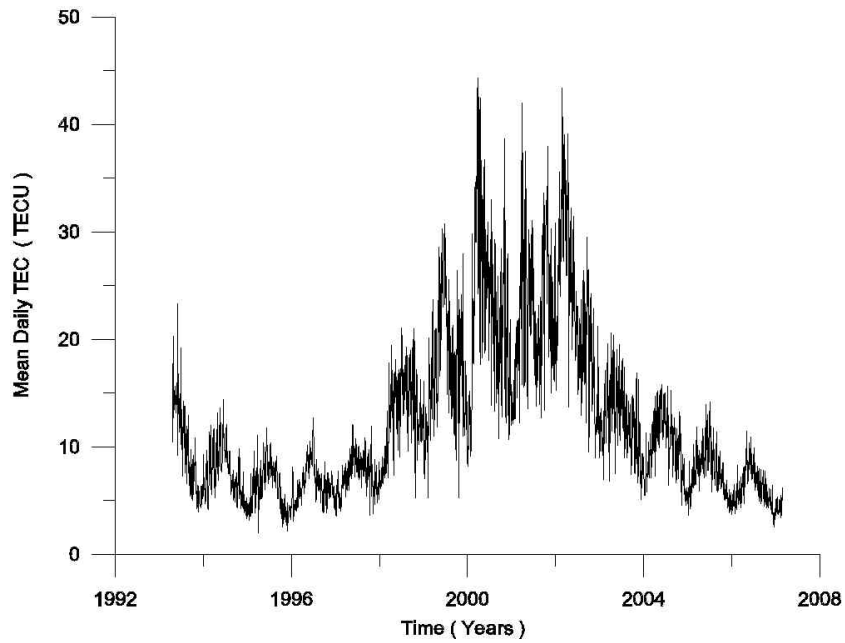
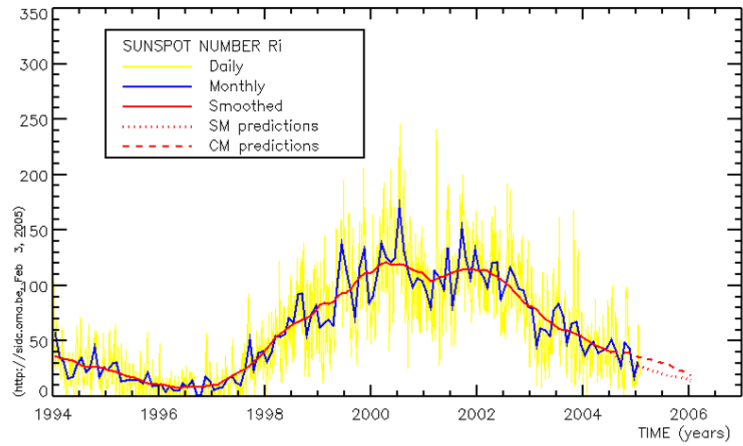


Figure 2.5: Comparaison entre l'évolution du nombre de Wolf (en haut) et du TEC moyen journalier à Bruxelles (en bas) pour le cycle solaire 23 (Source : Observatoire Royal de Belgique/SIDC)

rapide des champs magnétiques coronaux (fig. 2.6).

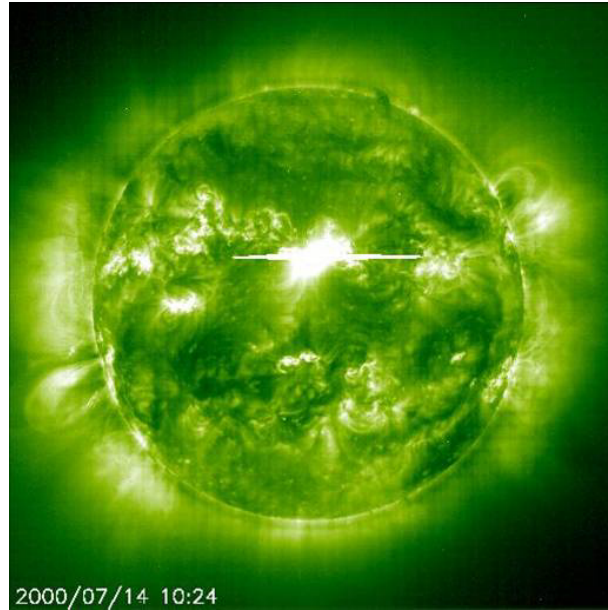


Figure 2.6: Eruption solaire près du centre du disque dans l'extrême UV à 19,5 nm dans la raie du FeXII
(Source : NASA/ESA. Image EIT)

En réalité, la topologie des boucles est fort complexe et celles-ci subissent des torsions au niveau de leur base (niveau photosphérique) : il en résulte des *reconnexions magnétiques* entre boucles voisines qui sont à la base des éruptions solaires. Durant ces éruptions, le plasma est porté à très haute température et l'émission en rayons EUV et X mous atteint des valeurs extrêmement élevées. Les effets ionosphériques relatifs à ces événements qui ne durent pas plus de quelques dizaines de minutes peuvent être de très grande amplitude. A ce titre, l'étude de cas proposée à la section 4.3 présente un exemple de l'impact des éruptions solaires sur le TEC et ses variations dans le temps.

Notons que les éruptions solaires ne sont pas des phénomènes géomagnétiques ; l'origine de la perturbation ionosphérique est simplement due au rayonnement ionisant EUV et X. Dans la section suivante, nous analysons les différentes causes de la variabilité ionosphérique qui sont liées au géomagnétisme.

2.2.3 Les perturbations géomagnétiques

La Terre peut être assimilée à un dipôle magnétique dont le champ protège l'atmosphère terrestre des particules énergétiques en les déviant de leur trajectoire (fig. 2.7). Des fluctuations du nombre, de l'énergie ou de la vitesse des particules du vent solaire

peuvent provoquer une variation du champ magnétique terrestre (orientation et amplitude) et dès lors perturber ce système de bouclier magnétique ; on parle de perturbation géomagnétique.

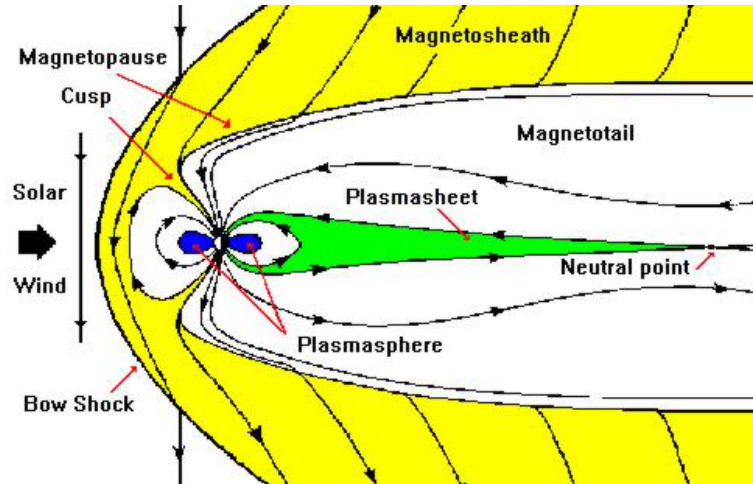


Figure 2.7: Magnétosphère terrestre (Source : NASA)

Dès lors, on réalise la caractérisation du champ magnétique terrestre et des courants électriques qui causent sa variabilité en définissant différents *indices géomagnétiques* : A_p , K_p , DST, AE...

Le plus connu d'entre eux est l'indice K_p ("p" pour *Planetary*). Celui-ci est une moyenne des indices K relatifs à 13 stations situées entre 44 et 60° de latitude ; il s'agit donc d'un indice global. L'indice K est un indice local qui caractérise la variation du champ magnétique à la station considérée par rapport à une journée calme de référence ; ces mesures sont réalisées à l'aide de magnétomètres. L'échelle de l'indice K_p comporte 10 échelons :

Indice	Signification
0, 1, 2	calme
3	instable (<i>unsettled</i>)
4	actif (<i>active</i>)
5	petite tempête (<i>minor storm</i>)
6	tempête modérée (<i>moderate storm</i>)
7	forte tempête (<i>major storm</i>)
8, 9	grave tempête (<i>severe storm</i>)

Tableau 2.1: Les échelons de l'indice K_p

L'indice **DST** (*Disturbance Storm Time*) est également utilisé pour caractériser l'amplitude d'une perturbation géomagnétique. Durant les tempêtes géomagnétiques, son intensité (mesurée en Tesla³) diminue et les valeurs peuvent devenir inférieures à -300 nT. La valeur la plus basse de l'indice DST a été atteinte durant la tempête géomagnétique la plus importante du cycle solaire 23 qui a eu lieu le 20 novembre 2003 ; la valeur de l'indice DST était de -422 nT.

Les perturbations de la magnétosphère terrestre sont dues aux variations induites par le champ magnétique interplanétaire⁴ (*Interplanetary Magnetic Field* ou IMF). Celui-ci interagit avec notre magnétosphère et perturbe l'orientation et l'intensité du champ magnétique planétaire. Il en résulte parfois des reconnections magnétiques au niveau de la magnétoqueue⁵ qui entraînent l'admission de particules chargées électriquement dans notre magnétosphère, ce qui provoque des aurores.

Les phénomènes ionosphériques observés durant les périodes d'importante activité géomagnétique sont le bruit ionosphérique (NLS) et les LSTID's ; ces dernières prennent naissance dans la thermosphère (HOCKE *et al.* 1996). En effet, durant la période d'agitation du champ géomagnétique, des ondes de gravité se forment et se propagent depuis la thermosphère jusque l'ionosphère. Ces ondes de gravité reflétant une différence de pression du gaz (atomes neutres et ions/électrons), c'est la concentration en électrons libres *Ne* qui subit également des fluctuations. De récentes études (TSUGAWA *et al.* 2003) ont permis de mettre en évidence que les LSTID's se forment au niveau des hautes latitudes géomagnétiques (zones aurorales) et se propagent vers les zones équatoriales, ce qui explique la direction de propagation préférentielle de ce type de TID's (cf. § 2.1.2).

Les différentes causes qui sont responsables de la variabilité de l'IMF (et donc des phénomènes géoeffectifs⁶) sont au nombre de trois :

- variations du vent lent ;
- régions d'interaction en corotation (CIR) ;
- éjections de masse coronale interplanétaires (ICME's).

Évidemment, des combinaisons de ces trois causes sont possibles et ont déjà été obser-

³Le *Tesla* est une unité de mesure de l'induction magnétique d'un champ magnétique.

⁴Le *champ magnétique interplanétaire* est le champ magnétique produit par le Soleil et dont les effets sont perceptibles au-delà de l'orbite terrestre.

⁵La magnétoqueue (*magnetotail* - fig. 2.7) est la région de la magnétosphère qui s'étire du côté opposé à la direction du Soleil.

⁶Le terme *géoeffectif* désigne un phénomène dont les impacts sont mesurables sur Terre. Par exemple, l'interaction entre le champ magnétique terrestre et le nuage magnétique d'une CME provoque des effets géomagnétiques quantifiables.

vées.

Dans les paragraphes qui suivent, nous tentons de détailler ces trois phénomènes. Même si elles présentent des signatures similaires du point de vue ionosphérique, chacune de ces structures possède une signature particulière dans les séries temporelles de la densité du vent solaire, de l'amplitude du champ magnétique interplanétaire selon les trois directions (X,Y,Z), de la température électronique, de la vitesse des particules... Toutes ces données sont mesurées par des sondes telles que ACE ou WIND. Un exemple d'un profil obtenu par ces satellites est exposé à la figure 2.8.

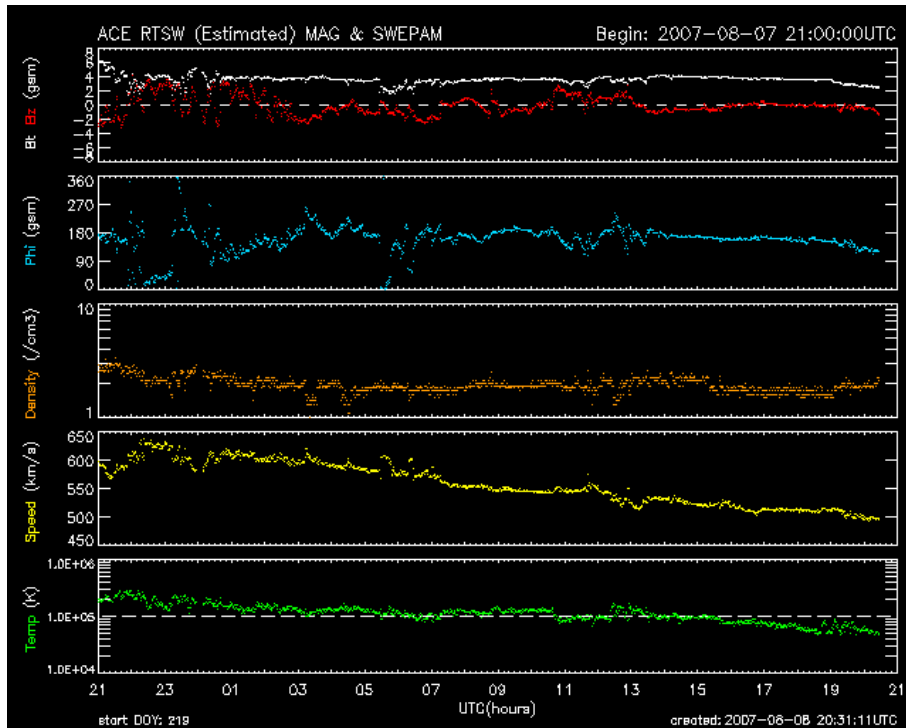


Figure 2.8: Série temporelle des différentes caractéristiques du vent solaire (Source : NASA. Données ACE). Données prises le 8 août 2007

Les irrégularités du vent lent

Comme on l'a mentionné à la section 2.2.1, le Soleil propage dans l'espace un vent lent et un vent rapide. Le vent lent prend sa source au niveau des multiples reconnections à petite échelle entre les différentes boucles magnétiques. La composition et la vitesse du vent lent sont généralement moins stables que celles relatives au vent rapide. Ainsi, l'abondance en hélium est fort variable pour le vent lent alors qu'elle est stable (3,6%) pour le vent rapide. La vitesse du vent lent est variable et généralement comprise entre

250 et 400 km/s alors que celle du vent rapide est stationnaire et comprise entre 400 et 800 km/s.

Les variations du vent lent au niveau de la composition, de la vitesse ou même de la densité se propagent à travers l'héliosphère⁷ et atteignent la magnétosphère terrestre, ce qui provoque des perturbations géomagnétiques d'amplitude faible à modérée.

Ces variations du vent solaire lent sont des phénomènes aléatoires qui ne sont détectables que lorsqu'elles atteignent les capteurs qui surveillent l'évolution des paramètres du vent solaire.

Les régions d'interaction en corotation (CIR)

Le Soleil tourne sur lui-même avec une période de révolution qui dépend de la latitude considérée, c'est le phénomène de *rotation différentielle*. Cette rotation implique que le vent solaire ainsi que le champ magnétique interplanétaire ne se propagent pas de manière radiale mais s'enroulent sur eux-mêmes pour former une spirale dont le centre est le Soleil lui-même : c'est la *spirale de Parker* (fig. 2.9).

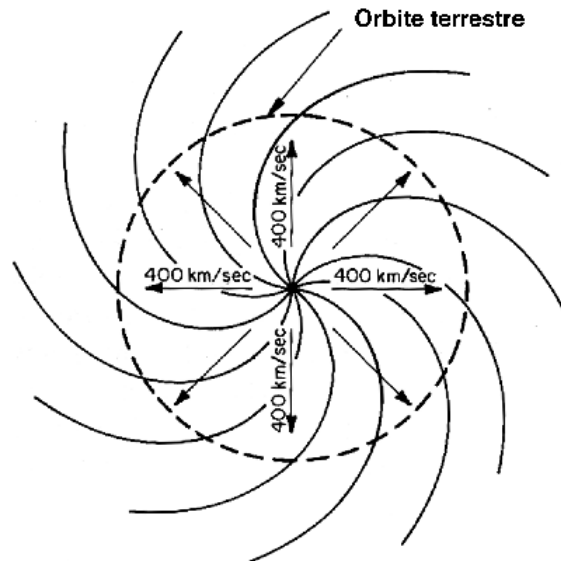


Figure 2.9: La spirale de Parker : les lignes du champ magnétique interplanétaire forment un angle de 45° avec l'orbite terrestre (Source : M.G. Kivelson & C.T. Russell)

De cette manière, le vent solaire atteint l'orbite terrestre avec un angle de 45° . Dans la section 2.2.1, on a vu que durant toute autre phase que celle du minimum solaire, il se

⁷L'héliosphère est définie comme l'extension de la couronne solaire à grande distance jusqu'à la limite du milieu interstellaire (CLETTE 2007).

produisait des trous coronaux au niveau des basses latitudes héliosphériques. Ces trous coronaux, d'où sont originaires des vent rapides, sont également sujets à la rotation du Soleil, ce qui implique que l'on observe une alternance de régions présentant des trous coronaux et de régions non sujettes à de tels phénomènes. On peut alors distinguer les secteurs de vent lent et ceux de vent rapide (fig. 2.10). Ces secteurs reflètent des courant homogènes de polarité magnétique uniforme. Lorsque le vent rapide rattrape une région de vent lent, il se forme un choc (*front shock*) car une zone de compression apparaît en avant de la zone de contact entre les deux secteurs. Ces chocs donnent donc naissance à des perturbations interplanétaires récurrentes car elles sont associées à la rotation solaire. Les régions où se collisionnent les secteurs de vent rapide et lent s'appellent des **régions d'interaction en corotation** (*Corotating Interaction Region* ou CIR).

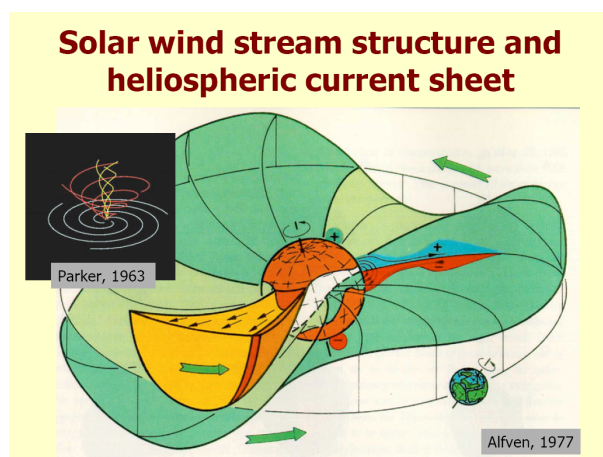


Figure 2.10: Alternance de secteurs de vents rapides et lents
(Source : CLETTE 2007)

Étant donné le caractère récurrent de ces régions d'interaction, les perturbations géomagnétiques qui leur sont associées sont également récurrentes; ces dernières sont généralement d'amplitude modérée. Les perturbations géomagnétiques relatives aux CIR sont donc prévisibles, à l'inverse des phénomènes responsables de la génération du vent lent qui sont eux aléatoires.

Les éjections de masse coronale interplanétaires (ICME's)

Les éjections de masse coronale (CME's) sont dues à la reconnexion magnétique des boucles coronales qui se produit au niveau des pieds de celles-ci. La morphologie générale d'une CME est constituée de trois éléments :

- un front brillant (clairement visible sur des images de coronographes tels que SOHO/LASCO);
- une cavité sombre;
- un plasmoïde brillant qui contient de la matière coronale dense.

Un exemple de CME est montré à la figure 2.11.

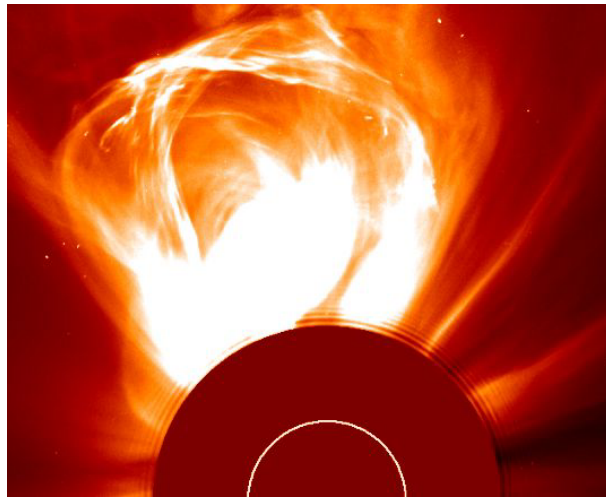


Figure 2.11: Exemple d'une CME (Source : ESA/NASA. Image SOHO/LASCO)

Les CME's se propagent dans le milieu héliosphérique en emportant un champ magnétique intense ainsi qu'un nuage dense de particules ionisées telles que des protons ou des électrons. Ces structures suivent donc la forme spiralée du champ magnétique interplanétaire pour parvenir jusqu'à notre magnétosphère; on parle alors de *CME interplanétaire* (ICME).

Les lignes du champ magnétique terrestre sont globalement orientées Sud \rightarrow Nord; toute perturbation magnétique selon cet axe entraîne des variations de l'amplitude du champ terrestre. Plus précisément, c'est lorsque les cordes de flux relatives aux ICME's sont orientées Nord \rightarrow Sud (donc dans le sens contraire à celui de notre "bouclier magnétique") que les interactions avec notre magnétosphère sont les plus importantes : la composante verticale du champ magnétique terrestre (B_z) devient négative, ce qui entraîne une diminution de l'indice DST.

Les ICME's sont à la base des tempêtes géomagnétiques les plus sévères que l'on a pu observer. L'observation directe du Soleil via des images coronographiques montre toute son importance dans la mesure où il faut entre 24 et 48 h à une ICME pour parcourir la distance Soleil-Terre : on peut alors prévoir 24 à 48 h à l'avance l'occurrence d'une tempête géomagnétique.

2.2.4 Autres causes

Dans cette section, nous présentons les causes des irrégularités ionosphériques qui ne sont pas liées directement au Soleil ou au géomagnétisme. De ce fait, les causes que nous détaillons dans ce paragraphe sont uniquement à l'origine des MSTID's et des SSTID's, ou plus particulièrement des ondes de gravité (AGW) qui leur donnent naissance. Différentes publications scientifiques ont été analysées afin de réaliser une synthèse qui concerne la génération des AGW par les phénomènes non géomagnétiques.

Bien que nous ayons distingué les TID's selon leurs caractéristiques morphologiques (cf. § 2.1.2), il faut adapter cette classification en fonction du mécanisme qui génère les AGW. En effet, les TID's les plus larges (LSTID's) sont généralement dues à la présence d'une perturbation géomagnétique tandis que les MSTID's et les SSTID's sont plutôt liées à des phénomènes météorologiques indépendants des conditions géomagnétiques. La génération des LSTID's a été abordée à la section 2.2.3 ; c'est la raison pour laquelle nous énumérons désormais les mécanismes qui génèrent les AGW responsables des MSTID's et des SSTID's.

- **Medium-Scale TID's (MSTID's)** : cette classe de TID's semble être liée à la propagation des AGW qui sont probablement dues à des phénomènes non-géomagnétiques comme les **marées atmosphériques** (*atmospheric tides* - WARNANT 2007), les **effets orographiques** (BEER 1974), le **terminateur solaire**⁸ (HERNÁNDEZ-PAJARES *et al.* 2006 & BEER 1978) ou même des effets troposphériques comme des **vents neutres** (BERTIN *et al.* 1978). La source de l'AGW n'est donc plus située exclusivement dans les zones aurorales (comme ce fut le cas pour les LSTID's), ce qui implique que la propagation des MSTID's peut se faire dans d'autres directions. A ce titre, il semblerait que la propagation Est → Ouest observée par différents auteurs résulterait du déplacement longitudinal du terminateur solaire.
- L'origine des **SSTID's** ne semble pas non plus être liée à l'activité géomagnétique mais aux **marées diurnes** et **semi-diurnes** (WARNANT *et al.* 2007). Ces dernières provoqueraient l'apparition d'AGW de faible vitesse et de faible période qui donneraient naissance aux fluctuations périodiques du TEC que l'on observe par GPS.

⁸Le *terminateur solaire* est, dans ce cas, la ligne sur l'ionosphère qui sépare les parties éclairées des parties non éclairées par le Soleil.

2.3 La météorologie de l'espace – *Space Weather*

Les sections précédentes nous montrent que les causes des perturbations ionosphériques sont nombreuses et complexes. C'est la raison pour laquelle on ne fera pas la distinction entre les différents phénomènes perturbateurs de l'ionosphère dans ce travail ; on utilisera donc le terme générique d'**irrégularité ionosphérique**.

Nous avons également vu que les effets ionosphériques les plus importants étaient dûs aux tempêtes géomagnétiques associées aux éjections de masse coronale, dont les plus puissantes se produisent généralement durant les périodes de maximum d'activité solaire. Actuellement, la surveillance des paramètres du vent solaire et l'étude des relations Soleil-Terre font l'objet de ce que l'on appelle la **météorologie spatiale** (*Space weather*). Cette science à part entière décrit non seulement l'état de l'héliosphère et du champ géomagnétique mais elle propose aussi des prévisions géomagnétiques qui peuvent être fort utiles aux utilisateurs des systèmes GNSS, par exemple. Ainsi, les scientifiques qui s'occupent de *Space weather* proposent des prévisions des indices K locaux voire même de l'indice Kp pour quelques jours à l'avance. Ce genre de prévisions est évidemment plus aisé à réaliser durant les périodes de minimum solaire où l'on n'observe que des alternances de secteurs de vents lents et rapides. En effet, les CIR sont généralement les seules sources de perturbations géomagnétiques durant le minimum solaire.

Il existe divers systèmes d'avertissements aux utilisateurs qui ont été développés par les prévisionnistes du *Space Weather* : e-mail, SMS, etc.

Chapitre 3

DÉVELOPPEMENT D'UN FILTRE POUR LES MAUVAISES MESURES

3.1 Point de départ

Le but de ce travail est d'analyser le comportement du Contenu Électronique Total (ou TEC) de l'ionosphère et ses irrégularités dans le temps pour une station de latitude moyenne. L'excellente résolution spatio-temporelle offerte par le système GPS nous permet d'obtenir une information précise en plusieurs régions de l'ionosphère appelées points ionosphériques (PI). Ainsi, le contenu électronique total peut être calculé selon chaque ligne de visée « satellite-station » ; on exprime généralement le TEC en unités de TEC (ou TECU) :

$$1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ e}^-/\text{m}^2 \quad (3.1)$$

Ces mesures du TEC sont des valeurs obliques car elles dépendent de l'élévation du satellite ; pour cette raison, la comparaison entre plusieurs valeurs simultanées du TEC est rendue difficile. Par conséquent, afin d'être utilisées dans le cadre d'études ionosphériques, il convient de ramener ces valeurs à la verticale. Pour ce faire, on utilise une fonction de projection (*Mapping Function*) qui est généralement le cosinus de l'angle zénithal du satellite au point ionosphérique, noté $\cos(z_{PI})$. La précision sur le calcul du TEC vertical par GPS est d'environ 2-3 TECU (WARNANT 1996).

De plus, on peut calculer les gradients temporels du TEC (ou ΔTEC) afin de surveiller l'évolution de la variabilité ionosphérique au cours du temps. La précision de ces gradients temporels (exprimés en TECU/min) est meilleure que 0,1 TECU/min. C'est précisément au terme de ce calcul que des valeurs anormales (c'est-à-dire un

ou plusieurs pics isolés) peuvent apparaître dans les séries temporelles de ΔTEC (fig. 3.1); on qualifie de telles données de "mauvaises mesures". Celles-ci ont un impact considérable sur les statistiques que nous établirons au chapitre 4 puisqu'un des buts de celles-ci est de mettre en évidence les comportements ionosphériques extrêmes de chaque journée d'observation afin de pouvoir isoler les "pires cas" de l'année étudiée. Ces pires cas serviront dans la suite à évaluer l'impact de cette variabilité extrême sur le positionnement de haute précision par GNSS. L'introduction de valeurs biaisées dues aux mauvaises mesures entraînerait des valeurs erronées dans nos statistiques. C'est pourquoi le but de ce chapitre est de développer un filtre automatique permettant de supprimer un maximum de ces mauvaises mesures sans écrêter les périodes agitées qui sont réellement dues au comportement variable de l'ionosphère. Ce filtre résulte donc d'un compromis que nous explicitons dans la section 3.5.

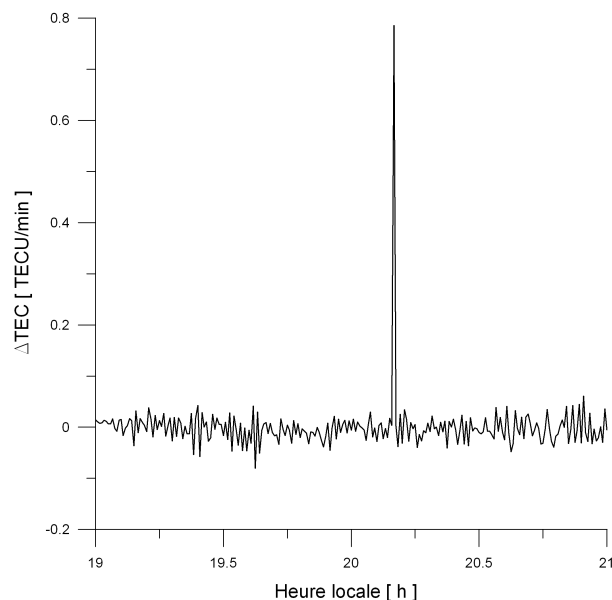


Figure 3.1: Exemple de mauvaise mesure dans la série temporelle de ΔTEC pour un satellite donné

3.2 La mesure du Contenu Électronique Total par GPS

Dans cette section, nous présentons la manière dont le TEC est calculé à l'Institut Royal Météorologique; cette technique a été développée et implémentée par WARNANT (1996).

Le système GPS permet de réaliser deux types de mesures : celles sur les codes de modulation et celles sur les phases. L'équation d'observation pour les mesures de phases s'écrit de la manière suivante :

$$\phi_i = \frac{f_i}{c}(D + T + M_i) + f_i(\Delta t^i - \Delta t_p) + N_i - \frac{f_i}{c} \left(40,3 \frac{\text{STEC}}{f_i^2} \right) + \varepsilon_i \quad (3.2)$$

avec :

ϕ_i la phase sur la porteuse L_i (L_1 ou L_2) ;

f_i la fréquence de la porteuse ;

c la vitesse de la lumière ;

D la distance géométrique entre le satellite et la station ;

T le délai troposphérique ;

M_i l'effet multi-trajet sur la porteuse L_i ;

Δt^i et Δt_p les erreurs d'horloge du satellite i et du récepteur p ;

N_i l'ambiguïté initiale sur la porteuse L_i ;

STEC (*Slant TEC*) le TEC oblique, c'est-à-dire le long du trajet satellite-station ;

ε_i le bruit de mesure sur la phase.

La méthode utilisée par WARNANT utilise la combinaison « Geometric-Free » (GF) de phases afin d'isoler la valeur du TEC. Une telle combinaison s'écrit de la manière suivante :

$$\phi_{GF} = \phi_1 - \frac{f_1}{f_2} \phi_2 \quad [\text{cycles}] \quad (3.3)$$

$$= \frac{f_1}{c}(M_1 - M_2) + N_{GF} + 0,552 \cdot 10^{-16} \text{STEC} + \varepsilon_{GF} \quad (3.4)$$

avec :

N_{GF} l'ambiguïté de la combinaison GF = $N_1 - \frac{f_1}{f_2} N_2$;

ε_{GF} le bruit sur la phase GF.

Signalons que dans les expressions (3.2) et (3.4) le terme STEC est exprimé en ϵ/m^2 . Si on néglige les erreurs dues au multipath et au bruit et que l'on exprime le STEC en TECU, on obtient la relation suivante :

$$\phi_{GF} = 0,552 \text{ STEC} + N_{GF} \quad (3.5)$$

Grâce à cette dernière équation, on peut alors calculer le STEC ; le TEC vertical (*Vertical TEC* ou VTEC) est alors obtenu grâce à l'intervention de la fonction de projection :

$$\text{VTEC} = \text{STEC} \cdot \cos(z_{PI}) \quad (3.6)$$

où $\cos(z_{PI})$ représente le cosinus de l'angle zénithal du satellite au niveau du point ionosphérique. Dans le cadre de ce travail, la hauteur de la coquille ionosphérique¹ a été posée à 400 km.

Dans la pratique, le calcul du STEC s'avère plus complexe que la simple inversion de l'équation (3.5) et la précision finale du STEC dépend de la précision des mesures effectuées sur les codes de modulation (WARNANT 1996).

Les gradients temporels du TEC oblique (ou ΔSTEC) peuvent être définis de la manière suivante :

$$\Delta\text{STEC} = \frac{\text{STEC}(t_k) - \text{STEC}(t_{k-1})}{t_k - t_{k-1}} \quad (3.7)$$

Si on utilise l'équation (3.5), ces mêmes gradients se réécrivent :

$$\Delta\text{STEC} = 1,812 \frac{\phi_{GF}(t_k) - \phi_{GF}(t_{k-1})}{t_k - t_{k-1}} \quad (3.8)$$

Ensuite, on peut calculer les valeurs de ces gradients ramenés à la verticale en utilisant la *mapping function* $\cos(z_{PI})$:

$$\Delta\text{VTEC} = \Delta\text{STEC} \cdot \cos(z_{PI}) \quad (3.9)$$

Remarques :

1. Pour notre étude, il convient d'utiliser des variations du TEC qui soient comparables entre elles ; ainsi on n'utilisera que les gradients de TEC ramenés à la verticale (*i.e.* ΔVTEC). Leur écriture sera simplifiée dans la suite de ce texte en utilisant le terme de ΔTEC à la place de ΔVTEC .
2. Dans ce travail, nous utilisons uniquement des données dont la cadence d'observation est de 30 secondes, ce qui est considéré comme une valeur standard pour les

¹Afin de modéliser l'ionosphère, on assimile celle-ci à une coquille sphérique infiniment mince située à une altitude conventionnelle. La totalité des électrons libres est alors comprise dans cette couche.

réseaux géodésiques internationaux. Afin d'exprimer ces gradients en TECU/min, il faut normaliser le calcul de l'équation (3.8) à 1 min en multipliant le résultat par un facteur 2.

3. Nous attirons l'attention du lecteur sur le fait que l'équation (3.8) n'est valable que lorsque $N_{GF}(t_k) = N_{GF}(t_{k-1})$, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de saut de cycles entre les époques consécutives t_k et t_{k-1} . Si un saut de cycles est présent, alors la valeur de ΔTEC présentera un saut proportionnel à $(N_{GF}(t_k) - N_{GF}(t_{k-1}))$.
4. La précision atteinte pour le calcul de ΔTEC est supérieure à celle relative au calcul du TEC (moins de 0,1 TECU/min pour ΔTEC contre 2-3 TECU pour le TEC) car le calcul de ΔTEC ne requiert pas les mesures effectuées sur les codes. Pour de plus amples informations, nous invitons le lecteur intéressé à consulter la méthode développée par WARNANT (1996).

La figure 3.2 montre l'évolution de ΔTEC en fonction du temps pour un satellite donné. Cette courbe présente une tendance non linéaire qui est induite par le changement de la localisation du point ionosphérique (déplacement en latitude et en longitude du satellite au cours du temps) ainsi que par l'évolution naturelle du TEC en fonction de l'heure locale. Les séries temporelles de ΔTEC contiennent donc les variations lentes dues au mouvement du satellite sur son orbite –qui elles-mêmes reflètent la dépendance du TEC en la longitude et la latitude– et au comportement journalier du TEC qui présente un maximum aux alentours de midi. Cette tendance doit être retirée afin d'isoler les variations à haute fréquence du TEC dues aux structures locales telles que les TID's. Pour ce faire, on modélise chacune des périodes de visibilité des satellites avec un polynôme du troisième degré puis on soustrait les valeurs de ΔTEC à celles du polynôme. On obtient alors les résidus de cet ajustement ; ces résidus contiennent ainsi les variations ionosphériques de haute fréquence qui sont dues aux structures locales. L'évolution des résidus pour un satellite donné est montré à la figure 3.3 ; en cas d'ionosphère non agitée, ces résidus doivent osciller autour de zéro. Les résidus, qui sont appelés *Rate of TEC* ou **RoTEC**, sont les seuls gradients temporels qui seront utilisés dans la suite du travail pour caractériser les irrégularités ionosphériques.

On définit la **variabilité ionosphérique** comme étant l'écart-type des mesures du RoTEC calculé sur des périodes de 15 min ; étant donné que la cadence des mesures est de 30 s, la variabilité ionosphérique est donc calculée sur base de 30 mesures. Si cet écart-type dépasse la valeur de 0,08 TECU/min, le programme automatique de détection de la variabilité déclare qu'un **évènement ionosphérique** a été détecté. Ces évènements ionosphériques seront employés dans le chapitre 4 pour une étude climatologique du comportement de l'ionosphère sous les latitudes moyennes. Dans

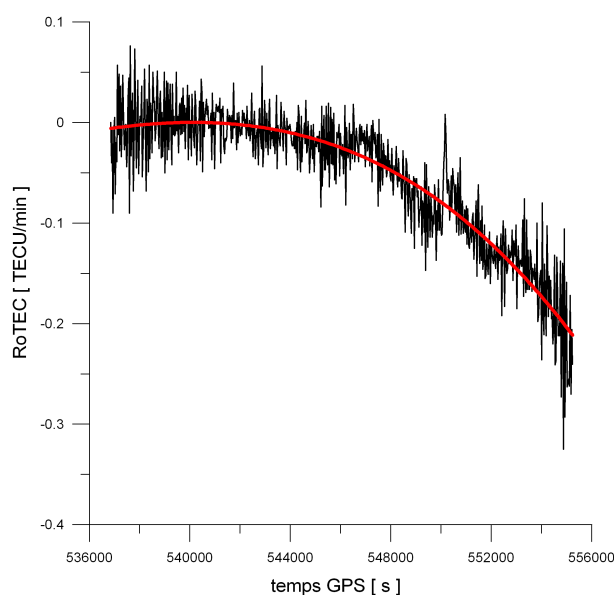


Figure 3.2: Modélisation du ΔTEC (en noir) par un polynôme du troisième degré (en rouge)

WARNANT (1996), la méthode décrite ci-dessus ainsi que les choix des valeurs seuil sont exposés en détails.

3.3 Les mauvaises mesures et leurs causes

Les séries temporelles du RoTEC sont parfois entachées de mauvaises mesures ; le plus souvent, il s'agit de points isolés comme le montre la figure 3.1.

Puisque nous avons à notre disposition les équations d'observation qui ont permis de calculer les gradients temporels du TEC, tentons de comprendre l'origine de ces mauvaises mesures.

3.3.1 Mauvaise détection de saut de cycles

Un saut de cycles est défini comme étant un saut brutal d'un nombre (généralement) entier de cycles dans la mesure de phases : à certains moments, les récepteurs GPS peuvent être incapables de mesurer de manière continue le déphasage entre le signal provenant du satellite considéré et le signal de référence du récepteur. Ceci peut être dû à diverses causes : obstruction (arbre, bâtiment), problème dans l'électronique du récepteur ou du satellite... En effet, des problèmes techniques au niveau de l'électronique du récepteur peuvent induire des problèmes dans les mesures de phases : le récepteur

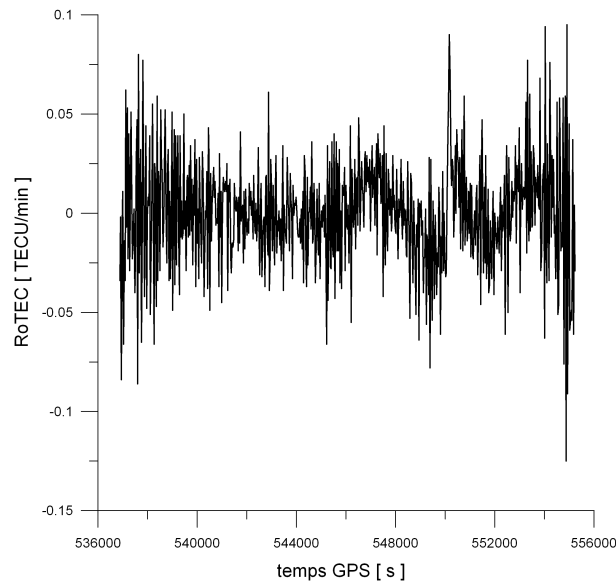


Figure 3.3: Évolution du RoTEC en fonction du temps pour un satellite donné

n'est alors plus capable de compter l'évolution de la phase de manière continue à cause, par exemple, d'une variabilité extrême du plasma ionosphérique. Celle-ci perturbe la phase du signal GPS émis par le satellite d'une manière telle qu'il est dès lors impossible pour le récepteur de compter exactement le nombre de cycles reçus. Un autre effet dû à un comportement très variable de l'ionosphère est la diminution du rapport du signal reçu par rapport au bruit (*rapport signal/bruit*) : le signal GPS devient tellement faible qu'il est impossible pour le récepteur de le capter, ce qui provoque un saut dans les mesures de phases. D'autres sources comme une surchauffe, un dysfonctionnement de l'horloge du récepteur... peuvent également induire des sauts dans les mesures de phases.

Malgré la définition du saut de cycles, il se peut que celle-ci ne soit pas un multiple de la longueur d'onde ; le saut présent n'est alors pas un nombre entier de cycles. Par exemple, SLEEWAGEN (1999) a pu mettre en évidence que les récepteurs de marque "Rogue" étaient incapables de mesurer de manière correcte la phase de deux satellites lorsque ceux-ci présentaient le même effet Doppler simultanément : le phénomène a été baptisé *Phase Surge*. Ajoutons également que les satellites peuvent également être victime d'un problème technique.

En conclusion, les causes *hardware* qui provoquent des sauts de cycles (entiers ou non) sont nombreuses et complexes, de telle manière que l'on ne s'intéressera qu'aux effets provoqués par ces sauts dans les séries temporelles du RoTEC.

La détection des sauts de cycles se fait durant la phase de *pré-processing*, c'est-

à-dire avant tout type de traitement (calcul du TEC ou de ΔTEC). Le processus de détection utilisé se base sur l'analyse de l'évolution temporelle d'une combinaison de mesures de codes et de phases préalablement filtrée. Le principal avantage de cette combinaison, appelée *Widelaning-Narrowlaning* (WLNL), réside dans le fait qu'elle est indépendante de l'effet ionosphérique au premier ordre. Ainsi, si un saut de cycles s'est produit sur une des deux porteuses (voire sur les deux porteuses simultanément), la série temporelle de cette combinaison présente une discontinuité non imputable à l'ionosphère (fig. 3.4) et l'époque de mesure incriminée est supprimée de nos données.

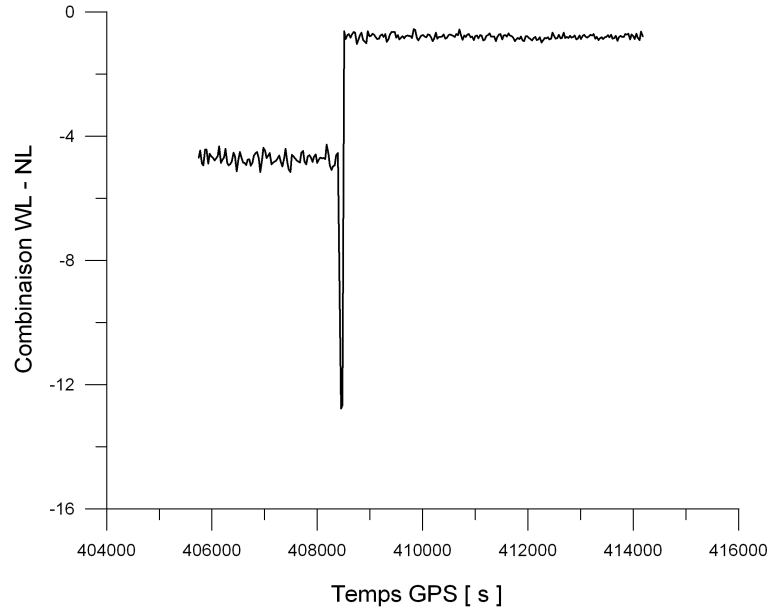


Figure 3.4: Évolution temporelle de la combinaison indépendante de l'ionosphère en présence d'un saut de cycles le jour 324/03 pour la station de Battice (sat 2)

L'inconvénient majeur de cette technique est qu'elle ne peut pas détecter les sauts de cycles dont l'importance est égale sur les deux fréquences porteuses. Par exemple, un saut d'un cycle sur L_1 et un cycle sur L_2 ne pourra pas être détecté par cette méthode (SPITS 2007).

Reconsidérons maintenant l'équation (3.8). On a vu auparavant que cette équation n'était valide que si $N_{GF}(t_k) = N_{GF}(t_{k-1})$, c'est à dire que s'il n'existe aucun saut de cycles entre les deux époques consécutives. Si un tel saut se présente, cette équation doit se réécrire de la manière suivante :

$$\Delta\text{STEC} = 1,812 \frac{\phi_{GF}(t_k) - \phi_{GF}(t_{k-1})}{t_k - t_{k-1}} + \frac{1,812}{t_k - t_{k-1}} (N_{GF}(t_{k-1}) - N_{GF}(t_k)) \quad (3.10)$$

S'il existe un saut dans la combinaison GF, l'équation (3.10) nous montre que la valeur du ΔSTEC sera augmentée du terme de droite. Un saut de cycles dans la combinaison GF produit donc un pic dans l'évolution temporelle du RoTEC. Un saut de cycles qui ne serait pas détecté durant la phase de préprocessing est donc une cause potentielle des mauvaises mesures qui entachent les séries temporelles du RoTEC.

3.3.2 L'effet multi-trajets (*multipath*) et le bruit

Multi-trajets

L'équation (3.4) nous montre que la combinaison GF utilisée pour calculer les gradients du TEC est sensible à l'effet multi-trajets. Dans les développements précédents, nous avons émis l'hypothèse que cet effet était négligeable par rapport à l'effet du TEC sur la phase de la combinaison GF. Cependant, cette influence n'est pas nulle et il importe de pouvoir la quantifier afin de la considérer comme une cause possible (ou non) des mauvaises mesures qui apparaissent dans les gradients de TEC.

L'amplitude maximale théorique de l'effet multi-trajets sur les porteuses est de 5 cm (WARNANT 2005). Cet effet est plus important à basse élévation ; c'est la raison pour laquelle nous ne considérons les satellites comme visibles qu'à partir de 20° d'élévation. Dans ce cas, l'amplitude du multi-trajets est rarement supérieure à 1 cm (sur les mesures de phases), en particulier dans des stations permanentes où la position des antennes est choisie de manière à minimiser cet effet. La question à se poser est la suivante : l'effet multi-trajets a-t-il une amplitude suffisante dans la combinaison GF pour produire un saut significatif dans la série temporelle de ΔTEC ?

Si on utilise les équations (3.4) et (3.8) et que l'on néglige le bruit de mesure, on peut reformuler l'équation du ΔSTEC de la manière suivante :

$$\Delta\text{STEC}(t_k) = \frac{1.812}{(t_k - t_{k-1})} \left[\frac{f_1}{c} (M_1(t_k) - M_2(t_k)) + N_{GF}(t_k) + 0.552 \text{STEC}(t_k) - \frac{f_1}{c} (M_1(t_{k-1}) - M_2(t_{k-1})) - N_{GF}(t_{k-1}) - 0.552 \text{STEC}(t_{k-1}) \right] \quad (3.11)$$

avec le STEC mesuré en unités de TEC (TECU).

Si on considère qu'il n'y a pas de saut de cycles, alors cette équation se réécrit :

$$\Delta\text{STEC}(t_k) = \frac{\text{STEC}(t_k) - \text{STEC}(t_{k-1})}{t_k - t_{k-1}} + \frac{1.812 \cdot f_1}{(t_k - t_{k-1}) \cdot c} [M_1(t_k) - M_1(t_{k-1}) + M_2(t_k) - M_2(t_{k-1})] \quad (3.12)$$

En pratique, l'effet multi-trajets se présente comme un phénomène périodique dont la période est d'autant plus grande que l'objet réfléchissant est proche du récepteur GPS; cette période peut s'étendre de quelques minutes à plusieurs heures. On peut donc constater que, dans l'équation (3.12), les termes $M_i(t_k)$ et $M_i(t_{k-1})$ sont corrélés dans le temps puisqu'ils représentent des valeurs du multipath à 30 s d'intervalle, ce qui est inférieur à la période de l'effet multi-trajets qui elle-même est extrêmement variable en fonction de la configuration des lieux (géométrie satellite – objet réfléchissant). Il s'agit donc ici d'évaluer la variabilité de l'effet multi-trajets sur une période de 30 s et ceci sur les deux porteuses; or on sait que l'effet multi-trajets est différent sur les deux porteuses. Vu la complexité du phénomène, il n'est pas simple d'obtenir une évaluation quantitative réaliste de l'influence de l'effet multi-trajets sur la combinaison utilisée pour calculer le RoTEC.

Pour cette raison, nous avons utilisé une autre méthode : sachant que l'effet multi-trajets dépend de la géométrie de la constellation GPS au niveau de la station d'observation, on peut considérer que celui-ci se répète de manière identique après un jour sidéral. En effet, la constellation GPS a la propriété de se présenter identique à elle-même toutes les 24 h sidérales. Cette propriété peut être utilisée pour vérifier l'attribution de la cause des mauvaises mesures à l'effet multi-trajets : si aucun pic n'est visible la veille ou le lendemain du jour où les mauvaises mesures ont été détectées, c'est que le multipath n'est pas responsable de ces erreurs dans les données.

La figure 3.5 nous montre les séries temporelles du RoTEC pour trois jours consécutifs. On voit qu'il n'y a qu'un seul jour pour lequel une mauvaise mesure apparaît; le multipath n'est donc pas responsable de celle-ci.

Bruit de mesure

Le bruit de mesure sur les phases σ_{Li} correspond à environ un centième de la longueur d'onde utilisée. Si on veut calculer le bruit de mesure sur la différence des combinaisons GF successives ($\sigma_{\Delta\text{STEC}}$), il suffit d'utiliser la théorie des erreurs qui nous apprend que :

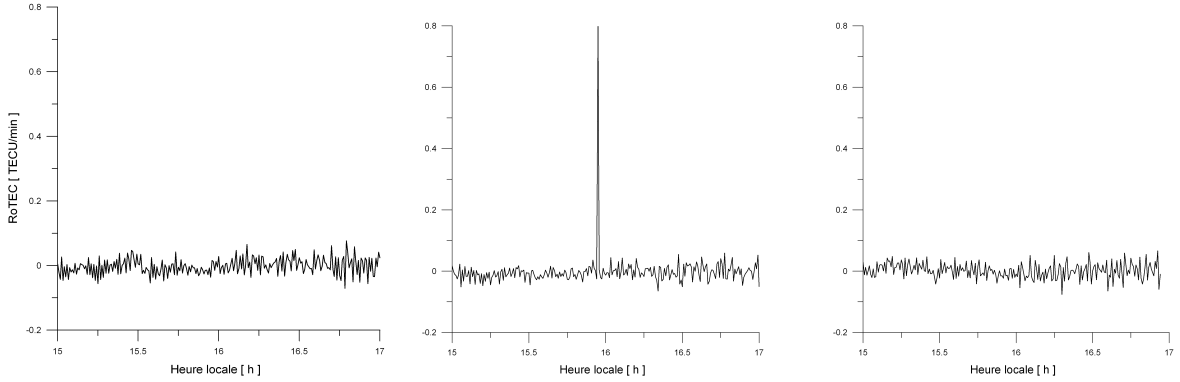


Figure 3.5: Évolution du RoTEC pour trois jours consécutifs (sat 21). A gauche, le jour 320/06 ; au milieu, le jour 321/06 pour lequel une mauvaise mesure est détectée ; à droite, le jour 322/06

$$\sigma_{\Delta STEC} = \sqrt{2 \cdot (1,812)^2 \sigma_{GF}^2} \quad (3.13)$$

$$= \sqrt{2 \cdot (1,812)^2 \left(\sigma_{L1}^2 + \left(\frac{f_1}{f_2} \right)^2 \sigma_{L2}^2 \right)} \quad (3.14)$$

$$\cong 0,0094 \text{ TECU/min} \quad (3.15)$$

L'erreur de mesure due au bruit est donc inférieure à la précision des mesures du RoTEC qui est de 0,08 TECU/min. On peut donc conclure que le bruit de mesure n'est pas capable de causer les différents pics qui apparaissent dans les séries temporelles du RoTEC.

3.3.3 Analyse pour un jour particulier

Dans les paragraphes suivants, nous tentons à titre d'illustration d'identifier la cause des mauvaises mesures qui sont présentes dans les séries temporelles du RoTEC le jour 265/06 pour la station de Bruxelles (BRUS). Cette station fait partie du réseau permanent de l'Observatoire Royal de Belgique (ORB).

Les séries temporelles du RoTEC à Bruxelles pour le jour 265/06 présentent une mauvaise mesure aux environs de 11h40 pour chaque satellite visible ; la figure 3.6 montre un exemple pour ce jour. Le fait que les mauvaises mesures soient présentes sur chaque observation "station-satellite" au même moment rend peu probable l'hypothèse qui met en cause l'électronique du satellite. En effet, dans ce cas, tous les satellites auraient dû subir un dysfonctionnement simultané, ce qui est fort peu probable. La cause est donc à chercher au niveau du récepteur : problème dans l'électronique, mauvais

fonctionnement de l'horloge, obstacle à proximité de l'antenne qui masque les lignes de visées vers les satellites et qui provoque un saut de cycles généralisé (par exemple un opérateur qui se déplace à proximité de l'antenne)... Vérifions cette hypothèse en utilisant les données d'une autre station ; nous choisissons la station de Dourbes (DOUR) qui fait également partie du réseau permanent de l'ORB.

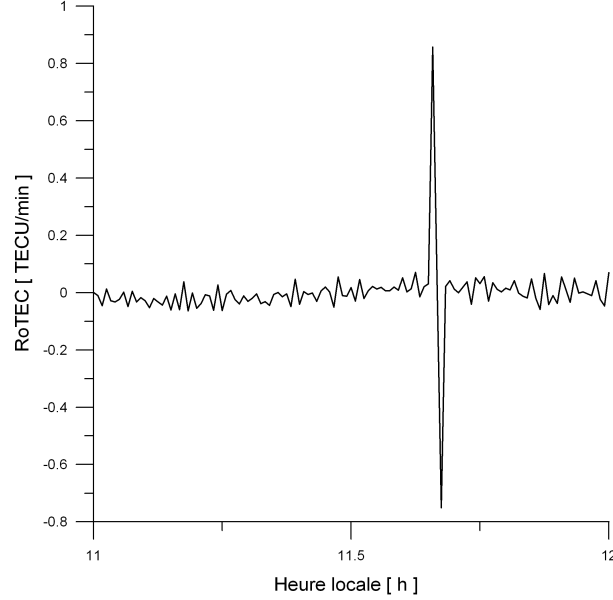


Figure 3.6: Jour 265/06 - Mauvaise mesure à BRUS pour le satellite 26

A Dourbes, aucune mauvaise mesure ne figure dans les données ; cela exclut bien une défaillance quelconque dans l'électronique des satellites comme cause probable de ces mauvaises mesures. S'il existe des sauts de cycles aux alentours de 11h40, ceux-ci peuvent être identifiés en formant des doubles différences entre deux satellites et les deux stations.

La méthode des doubles différences consiste à soustraire deux différences simples effectuées simultanément sur deux satellites. Les différences simples sont des différences entre les mesures de phases effectuées par deux récepteurs lorsque ceux-ci observent un même satellite simultanément. En d'autres termes, une simple différence entre deux récepteur A et B pour le satellite i ($\phi_{AB}^i(t)$) s'écrit de la manière suivante :

$$\begin{aligned} \phi_{AB}^i(t) = \phi_A^i(t) - \phi_B^i(t) = \frac{f}{c} (D_{AB}^i(t) + T_{AB}^i(t) - I_{AB}^i(t) + M_{AB}^i(t)) \\ + f (\Delta t_B(t) - \Delta t_A(t)) + N_{AB}^i + \varepsilon_{AB}^i(t) \end{aligned} \quad (3.16)$$

avec $*_{AB}^i = *_{A}^i - *_{B}^i$.

Les simples différences relatives à deux satellites distincts i et j sont alors soustraites l'une à l'autre pour former une double différence $\phi_{AB}^{ij}(t)$:

$$\begin{aligned}\phi_{AB}^{ij}(t) &= \phi_{AB}^i(t) - \phi_{AB}^j(t) \\ &= \frac{f}{c} (D_{AB}^{ij}(t) + T_{AB}^{ij}(t) - I_{AB}^{ij}(t) + M_{AB}^{ij}(t)) + N_{AB}^{ij} + \varepsilon_{AB}^{ij}(t)\end{aligned}\quad (3.17)$$

avec $*_{AB}^{ij} = *_{AB}^i - *_{AB}^j$.

Comme on peut le constater dans l'équation (3.17), les doubles différences contiennent des termes relatifs à la géométrie ($D_{AB}^{ij}(t)$), aux délais ionosphérique et troposphérique ($I_{AB}^{ij}(t)$ et $T_{AB}^{ij}(t)$), au multipath ($M_{AB}^{ij}(t)$), à une combinaison entière d'ambiguïtés (N_{AB}^{ij}) et au bruit de mesure $\varepsilon_{AB}^{ij}(t)$.

Les délais ionosphérique et troposphérique sont corrélés dans l'espace (autocorrélation spatiale), ce qui implique qu'une double différence ne contient plus que les termes résiduels dont l'amplitude augmente avec la distance joignant les deux stations.

Notons que les erreurs d'horloge des récepteurs et des satellites sont éliminées grâce aux doubles différences.

Si on déplace le terme de distance à gauche de l'égalité, le terme situé à droite de l'égalité oscille alors autour d'une valeur relativement stable dans le temps puisque le terme contenant les ambiguïtés est un nombre entier fixe et que, d'une manière générale, les erreurs résiduelles ne sont pas capables d'introduire des variations de trop grande amplitude dans la double différence. On peut alors ré-écrire l'équation (3.17) de la manière suivante :

$$\begin{aligned}\phi_{AB}^{ij}(t) - \frac{f}{c} D_{AB}^{ij}(t) &= \frac{f}{c} (T_{AB}^{ij}(t) - I_{AB}^{ij}(t) + M_{AB}^{ij}(t)) \\ &\quad + (N_A^i - N_A^j) - (N_B^i - N_B^j) + \varepsilon_{AB}^{ij}(t)\end{aligned}\quad (3.18)$$

Considérons maintenant qu'un saut de cycles est présent seulement pour une des deux stations (par exemple la station A). Si le saut de cycles se produit sur une seule mesure (donc pour un des deux satellites i ou j), l'équation (3.18) montre qu'une discontinuité est visible dans la série temporelle de la double différence (corrigée de la distance géométrique). Si le saut de cycles se passe sur les deux mesures simultanément (les deux lignes de visées station-satellite sont affectées), il y a deux possibilités :

- soit le saut est égal pour les deux visées "station-satellite", ce qui est très peu probable ;

- soit le saut est différent pour les deux visées.

Dans le premier cas (saut égal), la double différence ne permettrait pas de voir le saut dans la série temporelle de la double différence puisque les deux sauts s'annuleraient. Dans le second cas, on remarquerait la présence d'une discontinuité dans la série temporelle de la double différence.

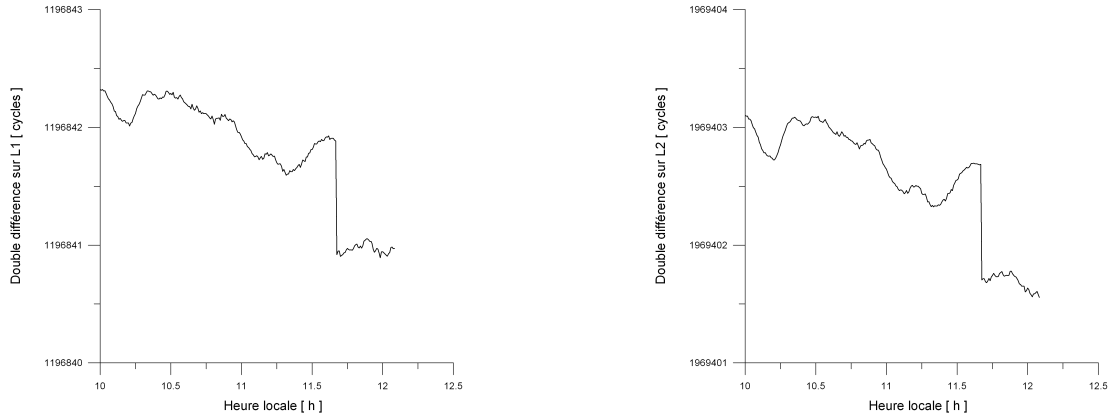


Figure 3.7: Jour 265/06 - Doubles différences sur L_1 (gauche) et L_2 (droite) corrigées de la géométrie pour les stations de BRUS et DOUR et pour la paire de satellites 9 et 26

Pour le jour 265/06, on a formé les doubles différences corrigées de la distance géométrique pour les deux fréquences porteuses L_1 et L_2 (appelées DD_{L_1} et DD_{L_2}) ; la figure 3.7 nous montre les séries temporelles de ces différences. On observe la présence d'un saut de 1 cycle pour chacune des deux mesures de phases DD_{L_1} et DD_{L_2} à la même époque que celle à laquelle s'est produite la mauvaise mesure. Les doubles différences ont donc permis d'établir qu'un saut de cycles non détecté est la cause des mauvaises mesures observées pour chaque visée "station-satellite". On peut ainsi conclure que les mauvaises mesures figurant dans les séries temporelles du RoTEC pour chaque visée sont dues à des sauts de cycles non détectés par la méthode traditionnelle durant la phase de pré-processing. En effet, rappelons que la technique de détection des sauts de cycles utilisée à l'IRM échoue lorsque l'on est en présence d'un saut de cycles égal sur les deux porteuses (SPITS 2007). Notons toutefois qu'il est impossible d'estimer le saut présent sur chaque onde porteuse pour chaque visée "station-satellite" puisque l'on observe des valeurs différentielles.

En conclusion, nous avons constaté que les causes de l'existence des mauvaises mesures ne sont pas faciles à isoler ; il est encore moins aisé de détecter toute erreur électronique (ou autre) lorsque l'on analyse les données d'une station seulement. Ainsi donc, nous avons montré que, même après l'étape de pré-processing, les données peuvent encore contenir des mauvaises mesures dues à des sauts de cycles non détec-

tés ou à des causes électroniques. Quoi qu'il en soit, il est clair qu'il s'agit d'un effet qui n'est pas lié à l'activité ionosphérique : il convient donc de filtrer ces mauvaises données. Le plus difficile est de fixer des critères "objectifs" qui permettent d'opérer la distinction entre mauvaises mesures et effets ionosphériques de manière complètement automatique.

3.4 Validation des données avant filtrage

L'objectif de cette section est d'évaluer, sur base de quelques jours de données, le nombre de mauvaises mesures présentes dans les séries temporelles du RoTEC avant de développer un filtre permettant de les détecter de manière complètement automatique.

3.4.1 Principes

Dans l'optique d'utiliser la variabilité ionosphérique –et en particulier le maximum journalier du RoTEC– pour produire une étude climatologique du comportement de l'ionosphère, on doit s'assurer que ces données sont exemptes de mauvaises mesures. Dès lors, la question à se poser est la suivante : les maxima journaliers du RoTEC sont-ils représentatifs de l'activité ionosphérique maximale des jours considérés ou reflètent-ils des mauvaises mesures dans les fichiers de données ?

Pour répondre à cette question, nous devons analyser les valeurs maximales journalières du RoTEC ($\text{RoTEC}_{max,jour}$) pour un échantillon de jours et pour certaines années seulement. En effet, dans cette étape de validation, nous étudions trois années correspondant à des phases particulières du cycle solaire. Les années étudiées sont :

- **2006** : une année de minimum d'activité solaire.
- **2003** : l'année durant laquelle se sont produites les plus importantes tempêtes géomagnétiques du cycle solaire 23.
- **2002** : une année de maximum d'activité solaire.

Nous avons vu à la section 3.2 qu'un évènement ionosphérique est détecté lorsque l'écart-type des résidus d'une période de 15 min est supérieur à 0,08 TECU/min. Par ailleurs, rappelons que, comme la cadence d'observation est de 30 s, le calcul de la variabilité ionosphérique requiert 30 mesures. Dès lors, supposons qu'il y ait une seule mauvaise mesure parmi les 30 mesures qui participent au calcul de l'écart-type. Il est alors intéressant de calculer la valeur (en TECU/min) de cette mesure telle qu'elle rende la valeur de l'écart-type supérieure à 0,08 TECU/min et entraîne ainsi la déclaration d'un évènement ionosphérique "fictif". Ainsi, si on connaît l'amplitude de cette

mauvaise mesure, on peut considérer que toutes les mauvaises mesures qui lui sont supérieures provoquent de manière systématique la déclaration d'un évènement ionosphérique "fictif". Dès lors, les jours à valider seront ceux qui présentent une valeur de $RoTEC_{max,jour}$ supérieure à cette valeur seuil et qui risquent donc de biaiser nos statistiques.

En pratique, le calcul du seuil peut se faire aisément en considérant les deux hypothèses suivantes :

1. On considère que la variabilité ionosphérique moyenne d'un jour calme est de x_i TECU/min. Par exemple, on posera que $x_i = 0,025$ TECU/min pour l'année 2006 (cf. § 4.2.3).
2. On considère que pour les 30 points servant à calculer la variabilité ionosphérique (période de 15 min), 29 d'entre eux sont assignés de la valeur moyenne de variabilité, soit 0,025 TECU/min pour l'année 2006 (cf. § 4.2.3). Le point restant est une mauvaise mesure dont il nous reste à déterminer l'amplitude.

A partir de là, le problème à résoudre –qui consiste à déterminer l'amplitude de la mauvaise mesure (en TECU/min) qui provoque une valeur de l'écart-type $\sigma = 0,08$ TECU/min– peut se mettre en équations comme expliqué ci-dessous.

L'écart-type σ s'écrit :

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n}}{n}} \quad (3.19)$$

avec :

x_i les n mesures nécessaires au calcul de la variabilité ionosphérique pour un intervalle de temps considéré ;

n le nombre de mesures nécessaires pour calculer la variabilité. Dans notre cas, l'intervalle de temps est de 30 s et $n = 30$.

On peut donc ré-écrire l'équation (3.19) en fonction de la mauvaise mesure (x_{30}) et des 29 autres mesures correspondant à la variabilité moyenne ($x_1 = 0,025$ TECU/min) :

$$30\sigma^2 = 29x_1^2 + x_{30}^2 - \frac{(29x_1 + x_{30})^2}{30}$$

Suite au développement de cette équation, on trouve un polynôme du second degré dont l'inconnue est x_{30} :

$$\underbrace{29}_{a_2} x_{30}^2 - \underbrace{58}_{a_1} x_1 x_{30} - \underbrace{29 x_1^2 + 870 x_1^2 - 900 \sigma^2}_{a_0} = 0$$

Si on remplace x_1 et σ par leur valeur respective, *i.e.*

$$x_1 = 0,025 \text{ TECU/min}$$

$$\sigma = 0,08 \text{ TECU/min}$$

on peut alors calculer la valeur de x_{30} au-delà de laquelle une mesure déplace l'écart-type au-delà de 0,08 TECU/min. On trouve alors que

$$x_{30} = 0,451 \text{ TECU/min}$$

En conclusion, si on considère qu'une seule mauvaise mesure de forte amplitude amène l'écart-type au-delà de 0,08 TECU/min, l'amplitude de cette mauvaise mesure est au minimum de 0,45 TECU/min. Rappelons que l'on a considéré que les 29 autres mesures ont une amplitude égale à 0,025 TECU/min ; cette méthode perd donc en efficacité lorsque plusieurs mauvaises mesures figurent dans la même période de 15 min. Toutefois, le seuil calculé dans ce dernier paragraphe n'est qu'un outil qui permet aisément de déterminer les jours potentiellement porteurs de mauvaises mesures.

3.4.2 Sélection des jours à valider

Pour l'année 2006, on a vu que la validation porterait sur toutes les valeurs de $\text{RoTEC}_{max, jour}$ qui sont supérieures au seuil défini par x_{30} . Étant donné que le nombre de jours qui satisfont à cette condition est trop important et que le but de cette validation est d'identifier les jours pour lesquels des mauvaises mesures sont susceptibles de biaiser nos statistiques, on décide de relever le seuil à 0,6 TECU/min. De cette manière, on analyse les valeurs de RoTEC qui sont le plus potentiellement porteuses de mauvaises mesures. Au total, ce sont 23 jours qui sont analysés. Cependant, il est également nécessaire de valider d'autres maxima ; c'est la raison pour laquelle on choisit, au hasard, 14 jours pour lesquels $\text{RoTEC}_{max, jour} \in [0,4 ; 0,6]$ et 13 jours pour lesquels $\text{RoTEC}_{max, jour} \in [0 ; 0,4]$. Au total, 50 jours sont validés en 2006.

Pour l'année 2003, on peut considérer que, comme pour l'année 2006, une variabilité moyenne de 0,025 TECU/min pour les 29 mesures est toujours réaliste car cette année se situe dans la phase décroissante du cycle solaire. Le nombre de valeurs journalières supérieures au seuil initial de 0,45 est une fois encore trop important, nous relevons également le seuil à 0,6 TECU/min. Les jours pour lesquels $\text{RoTEC}_{max, jour} \geq 0,6 \text{ TECU/min}$

sont au nombre de 41. Pour compléter la validation, nous avons choisi d'analyser au hasard 5 jours pour lesquels $\text{RoTEC}_{max,jour} \in [0,4;0,6]$ et 4 jours pour lesquels $\text{RoTEC}_{max,jour} \in [0;0,4]$. Comme pour 2006, on valide 50 jours en 2003.

Pour l'année 2002, le nombre de jours satisfaisant à la condition $\text{RoTEC}_{max,jour} \geq 0,6$ TECU/min est trop important. En effet, comme il s'agit d'une période qui correspond au maximum d'activité solaire, il est très courant d'observer des valeurs de $\text{RoTEC}_{max,jour} \geq 0,6$ TECU/min qui sont liées à l'activité ionosphérique réelle et non à la présence de mauvais points. Pour cette raison et dans le but de valider un nombre restreint de jours, le seuil est porté à 0,9 TECU/min. Cette valeur a été choisie de manière à ce que le nombre de jours pour lesquels $\text{RoTEC}_{max,jour}$ est supérieur au seuil soit inférieur à 50. De cette manière, ce sont 41 jours qui satisfont à cette nouvelle condition. La validation porte également sur 5 jours pour lesquels $\text{RoTEC}_{max,jour} \in [0,6;0,9]$ et 4 jours pour lesquels $\text{RoTEC}_{max,jour} \in [0;0,6]$. Pour cette année, ce sont encore 50 jours qui sont validés.

3.4.3 Résultats

La validation s'opère manuellement de la manière suivante : d'abord, on isole le maximum journalier dans la série temporelle du RoTEC en considérant la constellation GPS entière. Puis, si ce maximum correspond à une période d'agitation ionosphérique (comme le sommet d'une crête de TID), on peut affirmer que ce maximum reflète de manière exacte l'activité ionosphérique. Si, par contre, ce maximum correspond à une mauvaise mesure, on peut prétendre que ce point ne reflète pas l'activité ionosphérique réelle. Dans le tableau 3.1, on reprend les résultats de la validation pour les trois années analysées.

	2002	2003	2006
Nombre de mesures	50	50	50
Nombre de mauvaises mesures	16	9	24
Rapport (%)	32	18	48

Tableau 3.1: Résultats de la validation des valeurs du $\text{RoTEC}_{max,jour}$ avant le développement du filtre

On constate que le pourcentage de mauvaises mesures est maximal pour l'année 2006, *i.e.* l'année présentant la plus faible activité ionosphérique (période de minimum d'activité solaire). Ceci peut s'expliquer par le fait que la variabilité moyenne est plus faible en 2006 (cf. § 4.2.3); on distingue de ce fait plus aisément les mauvaises mesures

et un pic est clairement visible. Durant les périodes agitées, il est beaucoup plus difficile de faire la distinction entre de l'activité ionosphérique et une mauvaise mesure de faible amplitude, ce qui diminue probablement le nombre de mauvaises mesures identifiables. A ce titre, rappelons que l'identification de ces mauvaises mesures s'est faite entièrement de manière manuelle.

Dans tous les cas, ces résultats nous montrent qu'il est indispensable d'appliquer un filtre afin d'éliminer le maximum de mauvaises mesures.

3.5 Développement du filtre

Le filtre est un programme automatique qui détecte les mauvaises mesures dans les séries temporelles du RoTEC. Ce filtre est divisé en deux parties appliquées consécutivement :

- la première consiste en un filtre simple : toute valeur qui dépasse un certain seuil adaptatif est automatiquement déclarée comme mauvaise mesure ;
- la deuxième partie est un filtre sélectif, c'est-à-dire sensible à la variabilité ionosphérique.

3.5.1 Filtre simple

Le filtre simple consiste à faire passer une fenêtre glissante sur les 15 points situés de part et d'autre de la mesure à évaluer ; on calcule alors la moyenne et l'écart-type σ pour la fenêtre. De là, le *seuil de filtrage* ξ est défini comme ceci :

$$\xi = 5 \times \sigma$$

Ce seuil est donc un seuil **adaptatif** puisque l'écart-type varie pour chaque point évalué. La mesure testée (point central de la fenêtre glissante) est qualifiée de mauvaise mesure si la différence entre cette mesure et la moyenne de la fenêtre (appelée *résidu*) est supérieure à ξ . Dans ce cas, ce point voit sa valeur de RoTEC ramenée à la moyenne glissante de la fenêtre.

Ce filtre permet donc de détecter de nombreuses mauvaises mesures comme celle présentée à la figure 3.1. Cependant, comme on l'a évoqué précédemment, il est parfois difficile de distinguer la variation ionosphérique d'une mauvaise mesure ; c'est la raison pour laquelle le seuil de filtrage est élevé. Dès lors, ce premier filtre ne détecte que les mauvaises mesures qui ont une amplitude suffisamment grande, et ce indépendamment de l'activité ionosphérique.

Les mauvaises mesures de plus faible amplitude peuvent être identifiées grâce au passage d'un second filtre, appelé **filtre sélectif** (cf. § 3.5.2) ; ce dernier est capable d'opérer la distinction entre les périodes calmes et les périodes agitées du point de vue ionosphérique. De ce fait, l'incertitude sur l'existence (ou non) d'une mauvaise mesure durant une période agitée nous amène à devoir détecter exclusivement les mauvaises mesures qui se produisent durant les périodes calmes.

3.5.2 Filtre sélectif

Ce second filtre se base sur le même principe que le premier, c'est-à-dire qu'il consiste en une fenêtre de convolution que l'on applique aux séries temporelles du RoTEC. Cependant, même si le calcul de la moyenne et de l'écart-type se fait toujours de la même manière que pour le premier filtre, les résidus sont à présent calculés pour chaque mesure appartenant à la fenêtre glissante (et non plus uniquement pour le point central). En fait, ce filtre comporte trois itérations successives :

- lors de la première itération, si un ou plusieurs résidus dépassent un certain seuil fixe (appelé *seuil de participation à la moyenne*), les mesures correspondantes sont considérées comme des *outliers* : elles ne seront pas prises en compte lors de la deuxième itération ;
- lors de la deuxième itération, on réitère ainsi le calcul de la moyenne et des résidus en ayant exclu les *outliers* ; encore une fois, si un ou des plusieurs de ces résidus dépassent le seuil de participation à la moyenne, les mesures correspondantes sont exclues pour la troisième itération ;
- à la troisième itération, s'il existe encore des mesures pour lesquelles les résidus sont supérieurs au seuil de participation à la moyenne, on déclare que de la variabilité a été détectée pour la fenêtre considérée et la mesure du point central de cette fenêtre ne pourra pas être considérée comme un mauvais point. Si, par contre, la fenêtre entourant la mesure évaluée ne présente pas de variabilité (*i.e.* il n'y a plus d'*outliers* à la deuxième ou à la troisième itération), la valeur de la moyenne est gardée en mémoire.

A la suite de ces trois itérations, si aucune variabilité n'a été détectée dans la fenêtre, on évalue le résidu au niveau du point central : cette mesure peut être déclarée comme mauvaise mesure si la valeur de son résidu dépasse un certain seuil adaptatif. Ce seuil adaptatif est calculé de manière similaire que pour le filtre simple (cf. § 3.5.1), à la différence près qu'il est beaucoup plus petit que le seuil utilisé dans le premier filtre. Cette caractéristique permet au filtre sélectif de détecter des mauvaises mesures qui ne présentent pas de saut de grande amplitude dans la série temporelle du RoTEC.

Pour terminer, si le résidu au point central est supérieur au seuil adaptatif, il est considéré comme mauvaise mesure et voit alors sa valeur de RoTEC ramenée à la moyenne glissante calculée durant les trois itérations successives.

Les deux filtres sont appliqués de manière consécutive sur chacune des mesures participant aux séries temporelles du RoTEC. Ainsi, l'efficacité de détection des mauvaises mesures se voit doublée puisque les approches utilisées dans chacun de ces filtres sont différentes et complémentaires.

3.5.3 Validation du filtre

La validation du filtre, qui consiste à vérifier que les points qu'il détecte comme mauvaises mesures le sont réellement, s'effectue sur base d'un échantillon de jours. Pour ce faire, nous avons analysé les 50 jours de l'année 2002 que nous avons sélectionnés pour la validation de la section 3.4 et nous avons comparé les situations avant et après filtrage ; on obtient alors des graphiques comme ceux montrés à la figure 3.8.

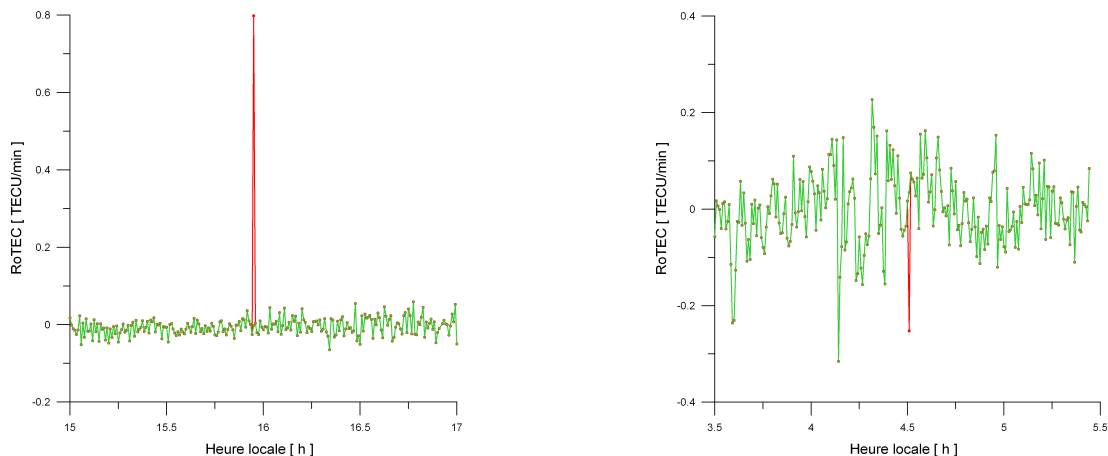


Figure 3.8: Validation du filtre : situation avant (en rouge) et après (en vert) filtrage. A gauche, une vraie mauvaise mesure ; à droite, une fausse mauvaise mesure

Si le point détecté par le filtre est réellement une mesure à éliminer, alors cette mesure est appelée "vraie mauvaise mesure". A l'inverse, le filtre détecte parfois des mesures qui ne sont pas mauvaises ; dans ce cas, on appelle ces dernières des "fausses mauvaises mesures".

On peut compter le nombre de vraies et de fausses mauvaises mesures que le filtre a détecté pour les 50 jours analysés en 2002 :

- le nombre total de mauvaises mesures détectées par le filtre est de 245 ;

- le nombre de vraies mauvaises mesures est de 182, soit $\approx 74\%$ du nombre de mesures détectées par le filtre ;
- le nombre de fausses mauvaises mesures est de 63 ; c'est-à-dire $\approx 26\%$ du nombre total de mesures détectées par le filtre.

Nous pouvons donc remarquer que le filtre détecte environ 5 mauvaises mesures par jour en moyenne et que pour les trois quarts de celles-ci, il s'agit effectivement d'une mauvaise donnée dans la série temporelle du RoTEC.

Durant la phase de développement du filtre, nous avons testé beaucoup de paramètres différents ; c'est la version que nous avons choisie et validée dans ce paragraphe qui détecte le maximum de vraies mauvaises mesures.

Si on sait qu'environ 75% des mesures détectées par notre filtre sont des mauvaises mesures, on ignore le nombre de ces mesures qui n'ont pas été détectées ; on parle alors d'**omission**. Pour évaluer le degré d'omission du filtre, on sélectionne cinq jours pour lesquels le nombre de mauvaises mesures est très élevé. De cette manière, la probabilité que le filtre détecte l'ensemble des mauvaises mesures figurant dans toutes les séries temporelles de ces jours est rendue la plus faible possible. Le contrôle des omissions se fait de la manière suivante :

1. On analyse manuellement chaque série temporelle du RoTEC (une trentaine par jour) afin de dénombrer toutes les mauvaises mesures qui se logent dans les données. Ce comptage s'effectue sur les fichiers non encore traités par le filtre et on désignera ce résultat par le terme de *vérité*.
2. On applique le filtre à toutes ces séries temporelles.
3. On compte le nombre de mauvaises mesures que le filtre a détecté ; ce nombre est appelé *observation*.
4. On peut alors faire le rapport entre le nombre de mauvaises mesures qui ont été effectivement détectées par le filtre (observations) et le nombre de ces mauvaises mesures qui auraient dû être détectées par le filtre (vérité).

Pour les cinq jours présentant le plus de mauvaises mesures détectées par notre filtre (*i.e.* les jours 085/02, 169/02, 238/02, 325/02 et 213/03), les résultats sont repris dans le tableau 3.2.

Les résultats qui figurent dans le tableau 3.2 nous permettent de calculer le **taux d'omission** par $(1 - (129/158)) \times 100 \approx 18\%$. Ce pourcentage signifie dès lors qu'environ 18% des mauvaises mesures présentes dans les séries temporelles du RoTEC n'ont pas été détectées par notre filtre.

Comme ce résultat est considéré comme satisfaisant, il clôture la validation de notre

DOY	085/02	169/02	238/02	325/02	213/03	Total
vérité	27	21	44	38	28	158
observation	21	19	41	24	24	129

Tableau 3.2: Résultats du test d'omission réalisé sur cinq jours de données

filtre.

3.6 Validation des données après filtrage

Maintenant que le filtre est développé et validé, nous pouvons réitérer une validation des maxima journaliers du RoTEC pour les années 2002, 2003 et 2006, à l'instar de ce que nous avons effectué à la section 3.4.3.

La question est de savoir si, grâce à la présence du filtre, les maxima journaliers du RoTEC sont représentatifs de l'activité ionosphérique maximale journalière ou s'ils sont encore dus à des mauvaises mesures non supprimées par le filtre.

Le tableau 3.3 nous montre les résultats de la validation effectuée de la même manière qu'à la section 3.4.3.

	2002	2003	2006
Nombre de mesures	50	50	50
Nombre de mauvaises mesures	3	4	1
Rapport (%)	6	8	2

Tableau 3.3: Résultats de la validation des valeurs du $\text{RoTEC}_{\max, \text{jour}}$ après le développement du filtre

On peut remarquer que le nombre de valeurs de $\text{RoTEC}_{\max, \text{jour}}$ auxquelles correspondent des mauvaises mesures est fortement diminué grâce au filtre. Dès lors, on pourra utiliser la valeur maximale journalière du RoTEC afin de caractériser l'activité ionosphérique maximale de la journée. Dans le chapitre 4, des statistiques ont été réalisées grâce à l'analyse de ces $\text{RoTEC}_{\max, \text{jour}}$.

Par ailleurs, cette dernière validation nous montre qu'il est désormais peu probable qu'une mauvaise mesure engendre un événement ionosphérique tel que nous l'avons défini au début de ce chapitre. Ainsi, on pourra utiliser de manière fiable les résultats en termes d'événements pour réaliser des statistiques quant à l'occurrence des phénomènes ionosphériques (cf. chapitre 4).

Chapitre 4

ÉTUDE DES IRRÉGULARITÉS IONOSPHERIQUES AUX LATITUDES MOYENNES

Ce chapitre est consacré à l'étude statistique des irrégularités ionosphériques observées par GPS aux latitudes moyennes. Les données utilisées pour réaliser ces statistiques sont issues du récepteur GPS de Bruxelles (BRUS) situé à l'Observatoire Royal de Belgique (Uccle). La période analysée est comprise entre janvier 2001 et décembre 2006 ; de cette manière, notre travail analyse le comportement de l'ionosphère sur la phase décroissante du cycle solaire 23 : le maximum est situé en juillet 2000 tandis que le minimum est prévu pour la fin de l'année 2007.

Cette étude se décompose en trois axes :

- dans la première partie, on aborde la distribution dans le temps des irrégularités ionosphériques en utilisant le nombre d'évènements ionosphériques tels qu'ils ont été définis à la section 3.2. On analyse ainsi la probabilité d'occurrence de ces irrégularités en fonction de la phase du cycle solaire, de l'heure locale ou encore des saisons.
- la seconde partie de ce chapitre porte sur la quantification des irrégularités ionosphériques ; on détaille les amplitudes moyennes et extrêmes du RoTEC que l'on peut observer à Bruxelles. Plus précisément, on définit les conditions typiques et extrêmes que l'on peut observer avec GPS pour une station de latitude moyenne.
- dans la troisième et dernière partie, on analyse le comportement de l'ionosphère pour trois jours distincts au cours desquels s'est produit un phénomène particulier : une éruption solaire, une tempête géomagnétique ou une TID de moyenne amplitude.

4.1 Étude climatologique des irrégularités ionosphériques

Il est nécessaire de rappeler que dans la suite de ce travail nous étudierons l'ensemble des irrégularités de l'ionosphère que l'on peut observer grâce aux systèmes GNSS. De cette manière, aucune distinction ne sera faite selon le type de structure observée (TID ou NLS – cf. § 2.1) ou selon la cause qui provoque les irrégularités (géomagnétique ou non) ; on utilisera donc tout au long de ce chapitre le terme générique d'irrégularité ionosphérique. Après avoir étudié le comportement statistique des irrégularités ionosphériques, nous nous pencherons sur les limitations induites par la méthode utilisée pour le calcul de ces irrégularités (cf. § 4.1.2).

4.1.1 Probabilité d'occurrence des irrégularités ionosphériques de 2001 à 2006

Étant donné que le taux d'ionisation de l'ionosphère dépend principalement du flux du rayonnement EUV solaire (cf. § 2.2.1), il faut tenir compte de trois éléments fondamentaux qui régulent la densité électronique N_e : l'activité solaire, la saison et l'heure locale. Dans un premier temps, nous analysons la relation qu'il existe entre l'activité solaire et la probabilité d'occurrence des irrégularités ionosphériques. Ensuite, nous étudions la dépendance qui existe entre les saisons, l'heure locale et cette même probabilité d'occurrence.

Influence du cycle solaire

On peut étudier la relation qui lie la phase du cycle solaire et l'activité ionosphérique en se basant sur le nombre d'événements ionosphériques détectés par notre programme automatique (cf. § 3.2). Ainsi, on somme l'ensemble des événements détectés sur tous les trajets satellite-station pour une journée entière de données ; on obtient alors une valeur journalière. On peut réaliser ce calcul pour chaque jour de données compris entre janvier 2001 et décembre 2006. La figure 4.1 nous montre alors l'évolution du nombre journalier d'événements ionosphériques détectés en fonction du temps, et plus particulièrement en fonction du cycle solaire qui décroît de manière (presque) continue de 2001 à 2006.

On constate que l'occurrence des événements est plus importante durant la période de maximum d'activité solaire (2001 et 2002). De plus, on peut isoler les 10 jours les

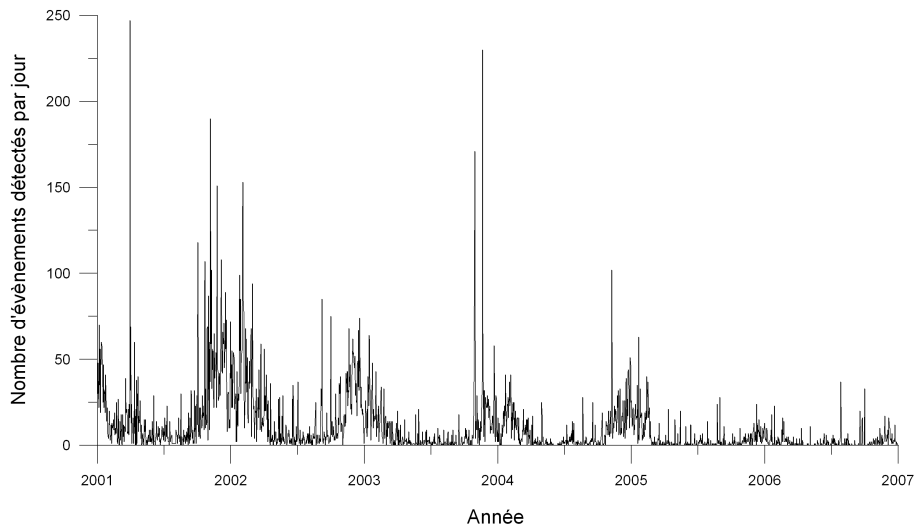


Figure 4.1: Relation entre l'activité ionosphérique journalière et le cycle solaire de 2001 à 2006

plus agités du point de vue ionosphérique en sélectionnant ceux qui présentent le plus d'évènements détectés. Ces 10 jours sont repris dans le tableau 4.1.

L'analyse de ce tableau nous montre que la majorité des jours les plus perturbés au niveau ionosphérique sont ceux qui se produisent durant les années 2001 et 2002, *i.e.* durant la période de maximum solaire.

Soulignons également le rôle très important joué par les tempêtes géomagnétiques provoquées par la propagation d'une ICME : la majorité des 10 jours figurant dans le tableau 4.1 sont dus à ce type de phénomène. Nous avons en effet déjà mentionné (cf. § 2.2.3) que les tempêtes géomagnétiques provoquées par des ICME's étaient les phénomènes géoeffectifs les plus importants en terme d'amplitude.

La figure 4.1 nous montre également que, même durant les journées moins agitées du point de vue ionosphérique, le nombre d'évènements détectés est supérieur durant les années de maximum d'activité solaire. Pour cette raison, le calcul du nombre moyen d'évènements détectés par jour se fera sur base annuelle ; les résultats figurent dans le tableau 4.2. Les chiffres obtenus confirment que le nombre quotidien moyen d'évènements détectés est maximal durant la phase de maximum d'activité solaire et tend vers une valeur minimale lorsque l'on s'approche de la période de minimum solaire.

En conclusion, on peut affirmer qu'il existe une relation entre la fréquence d'occurrence des irrégularités ionosphériques et la phase du cycle solaire. Notons toutefois que l'activité ionosphérique n'est pas nulle durant les périodes de minimum solaire ; cette dernière remarque concorde avec les résultats obtenus par WARNANT et POTTIAUX (2000).

	DOY	Date	Nombre d'évènements	Cause	Kp max	DST min [nT]
1	090/01	31/03/2001	247	Tempête Géomagnétique (TG) (ICME)	8.7	-358
2	324/03	20/11/2003	230	TG (ICME)	8.7	-422
3	310/01	06/11/2001	190	TG (ICME)	8.7	-277
4	303/03	30/10/2003	171	TG (ICME)	9	-383
5	034/02	03/02/2002	153	TID	2	-30
6	328/01	24/11/2001	151	TG (ICME)	8.3	-213
7	033/02	02/02/2002	139	multiples causes géo- magnétiques	4.7	-83
8	302/03	29/10/2003	125	TG (ICME)	9	-350
9	276/01	03/10/2001	118	TG (ICME)	7	-182
10	340/01	06/12/2001	108	TID	3	-14

Tableau 4.1: Les 10 jours les plus agités du point de vue ionosphérique entre 2001 et 2006

Année	Nombre moyen d'évènements par jour
2001	21
2002	19
2003	10
2004	8
2005	4
2006	2

Tableau 4.2: Moyenne journalière du nombre d'évènements ionosphériques détectés de 2001 à 2006

Influence de l'heure locale et de la saison

La figure 4.1 nous permet également de constater que le nombre d'irrégularités ionosphériques observées présente un maximum annuel durant les mois d'automne et d'hiver. Si on reporte le nombre d'évènements observés pour chaque mois de l'année sur un graphique, nous obtenons la figure 4.2.

L'analyse de la figure 4.2 nous apprend que le nombre d'évènements détectés présente une distribution saisonnière semblable pour chaque année mais que, comme on l'a vu précédemment, le nombre d'irrégularités diminue lorsque l'on s'approche du minimum solaire. De cette manière, on peut observer que c'est durant les mois d'automne et d'hiver (novembre, décembre, janvier et février) que l'on détecte le plus d'irrégularités ionosphériques. Les mois qui présentent le moins d'évènements sont les mois d'été : mai, juin, juillet et août. Le nombre d'irrégularités ionosphériques observées à Bruxelles dépend donc de la saison considérée ; cette constatation concorde avec les conclusions auxquelles sont parvenus TSUGAWA (2007) et HERNÁNDEZ-PAJARES (2006) lorsqu'ils ont analysé la dépendance temporelle des MSTID's.

Ces récentes publications affirment que le nombre de MSTID's observées aux latitudes moyennes est plus important durant l'hiver que durant l'été ; ils ajoutent également que les MSTID's hivernales se passent principalement durant la journée tandis que les MSTID's se produisant en été sont observées pendant la nuit. Vérifions dès lors qu'il existe une dépendance entre l'heure locale et la fréquence d'occurrence des irrégularités comme c'est le cas pour les MSTID's.

Pour ce faire, divisons les 24 heures de la journée en 96 périodes de 15 minutes chacune et sommons l'ensemble des évènements détectés pour tous les jours de l'année et pour chacune de ces 96 périodes. De cette manière, nous obtenons la distribution des évènements en fonction de l'heure locale pour l'ensemble de l'année considérée ; rappelons que nous analysons dans ce travail les années comprises entre 2001 et 2006. Les graphiques correspondants sont situés en tête de chaque figure (fig. 4.3 à 4.8). Nous pouvons remarquer que la distribution annuelle des évènements en fonction de l'heure locale est semblable pour chaque année, c'est à dire qu'elle présente un maximum principal autour de midi et un maximum secondaire durant la première partie de la nuit. Le maximum principal de la distribution voit sa valeur diminuer au fur et à mesure que l'on approche du minimum solaire ; de plus, remarquons que les maxima principal et secondaire sont pratiquement équivalents durant l'année présentant l'activité solaire la plus faible (2006).

Les deux minima de la distribution semblent être localisés de manière similaire pour toutes les années analysées, c'est-à-dire aux alentours de 6 h et de 18 h.

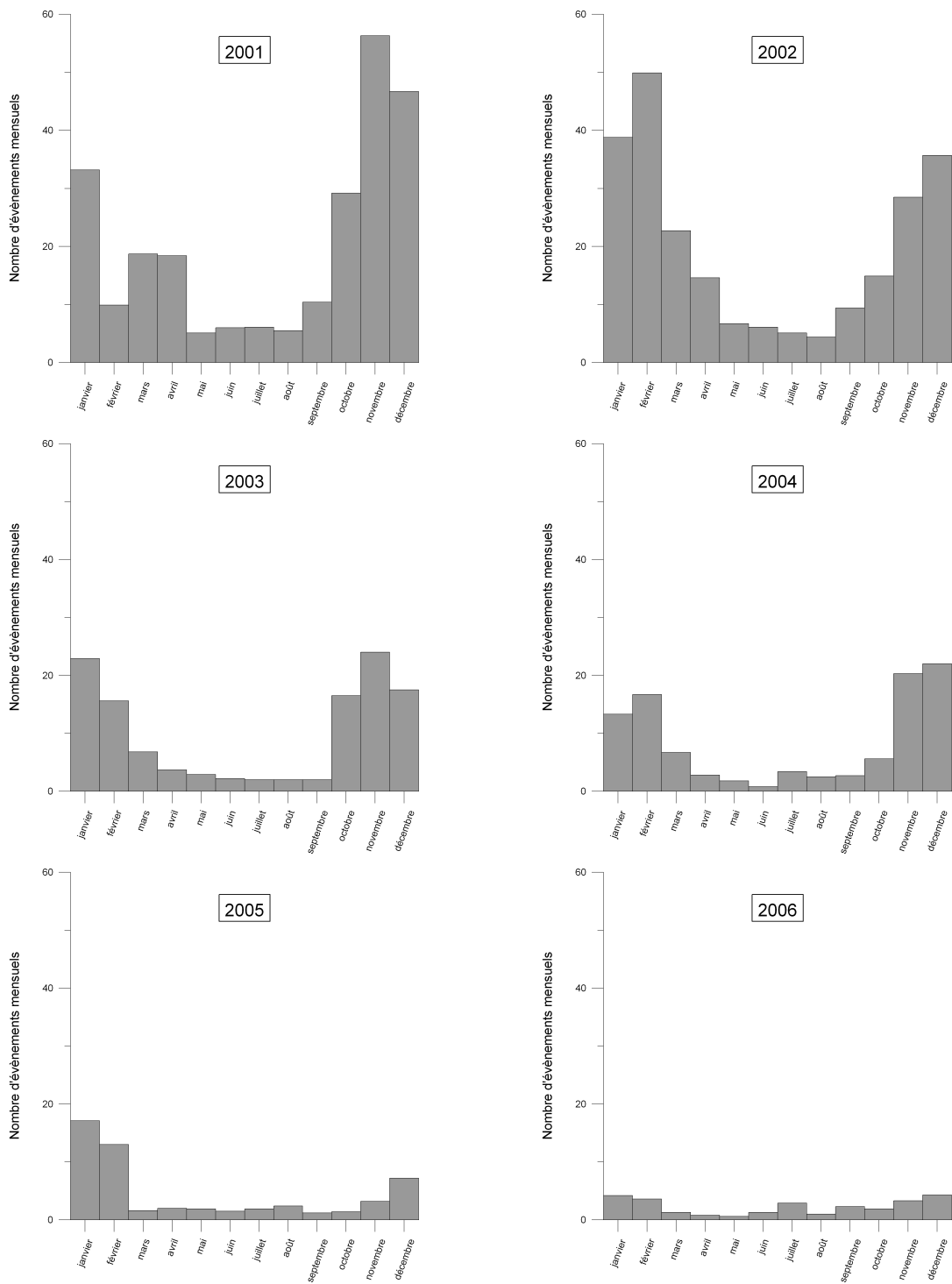


Figure 4.2: Nombre d'évènements ionosphériques détectés par mois de 2001 à 2006

Afin de pouvoir évaluer les contributions respectives des quatre saisons dans ce profil journalier basé sur la totalité des jours de l'année, il suffit de réitérer la même démarche que celle ci-dessus, à la différence près que l'on additionne les événements observés par saison et non plus sur l'entièreté de l'année. On obtient alors la distribution journalière des irrégularités pour chaque saison et on crée ainsi quatre figures par an (une par saison), et ce pour les six années étudiées (fig. 4.3 à 4.8).

On peut observer que les distributions automnales et hivernales sont fortement corrélées ; il en est de même pour les distributions printanières et estivales. En effet, ce sont les mois d'automne et d'hiver qui présentent le maximum d'évènements ionosphériques autour de midi. Par contre, les mois de printemps et d'été ne présentent pas de tels pics et leur distribution s'avère relativement constante de jour comme de nuit (histogramme relativement "plat"). Néanmoins, on peut observer un léger maximum autour de 22 h pour les mois d'été en 2006. Grâce à cette décomposition saisonnière, on peut ainsi expliquer la distribution annuelle : comme on l'avait déjà observé précédemment, on constate que ce sont principalement les mois d'automne et d'hiver qui sont responsables de la majorité des irrégularités observées durant l'année. Cette observation se vérifie de manière générale pour chaque année étudiée.

L'analyse des figures 4.3 à 4.8 montre également que l'on peut scinder les irrégularités en deux sous-groupes :

1. Celles qui se produisent en automne ou en hiver durant la journée et qui forment le maximum principal annuel. On peut constater que le maximum de la distribution de ces irrégularités n'est pas vraiment localisé vers midi : en réalité, ce sont plutôt deux maxima qui se présentent durant la matinée et au début de l'après-midi (respectivement vers 10 h et vers 14 h). Notons que la présence de ces deux maxima est surtout valable pour les mois d'hiver.
2. Celles que l'on observe le soir aux alentours de 20-22 h et auxquelles correspond le maximum secondaire. Contrairement aux irrégularités qui se produisent durant la journée, celles-ci ne présentent pas de comportement saisonnier préférenciel. Notons également que, d'une manière générale, les irrégularités nocturnes sont moins nombreuses que celles qui se produisent pendant la journée.

Ces deux catégories d'irrégularités rappellent les deux types de MSTID's décrits par TSUGAWA (2007) et HERNÁNDEZ-PAJARES (2006) : on détient alors une indication supplémentaire qui tente à prouver que la principale cause des irrégularités ionosphériques observées à Bruxelles est la présence des MSTID's.

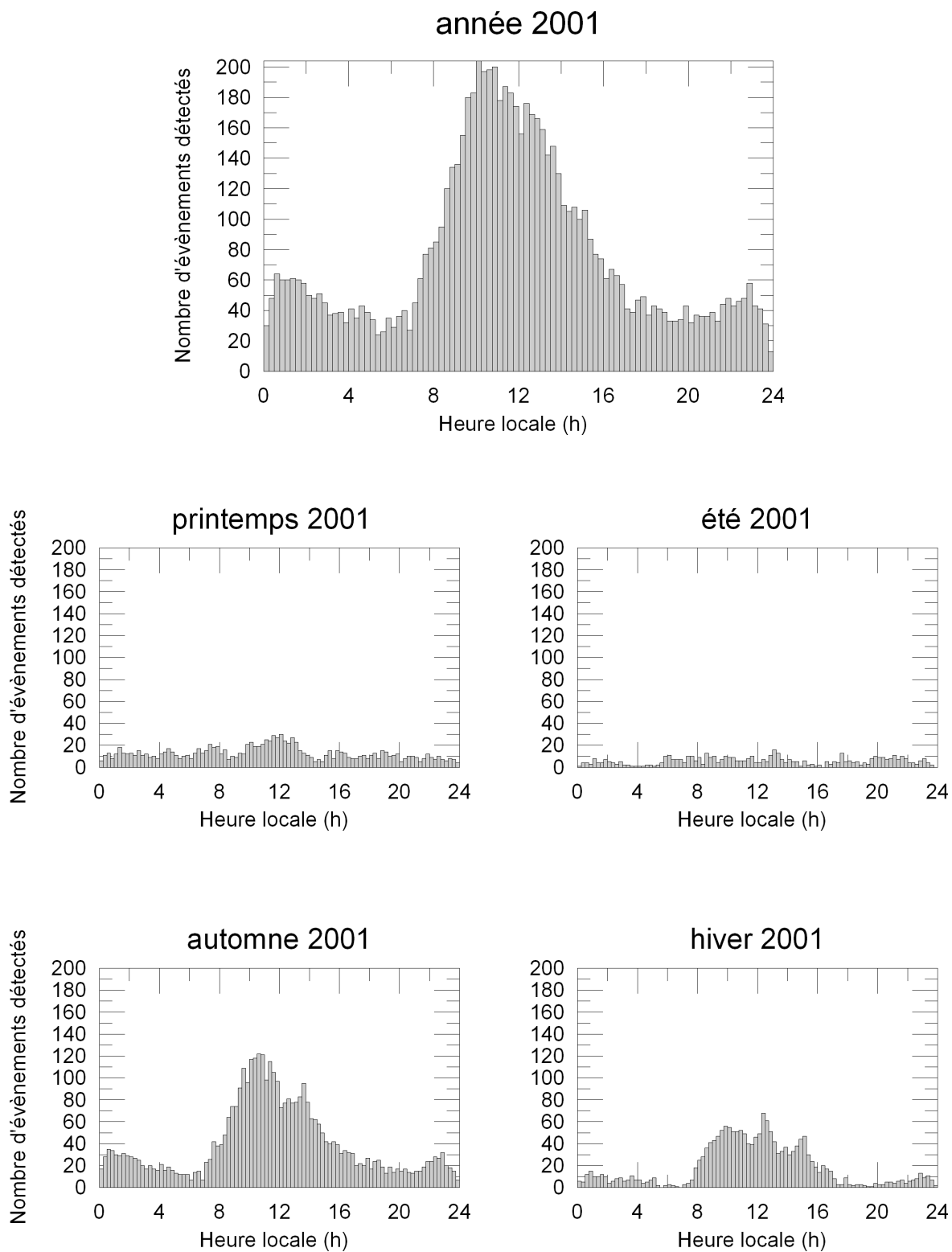


Figure 4.3: Distribution des évènements ionosphériques en 2001 en fonction de l'heure locale et de la saison

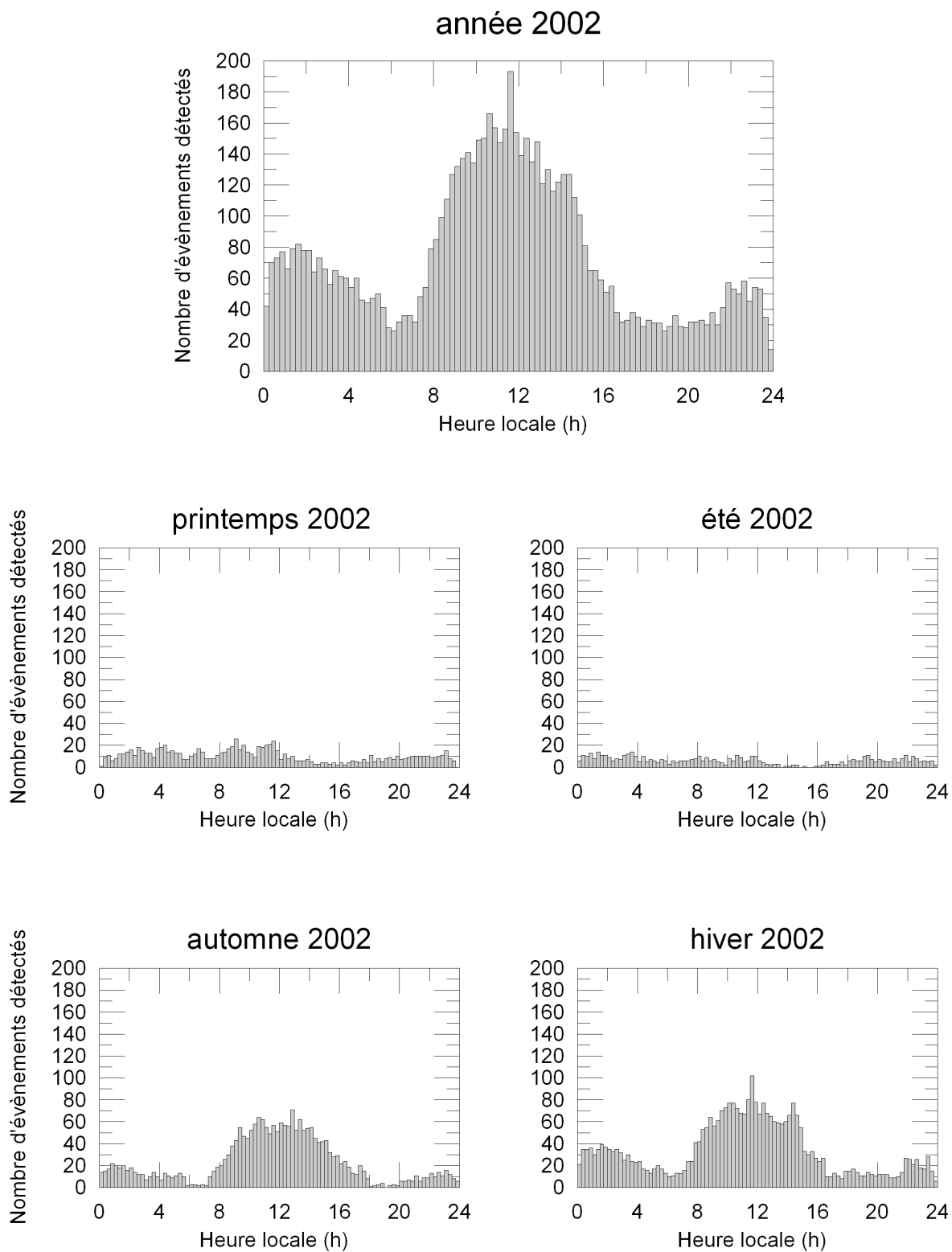


Figure 4.4: Distribution des événements ionosphériques en 2002 en fonction de l'heure locale et de la saison

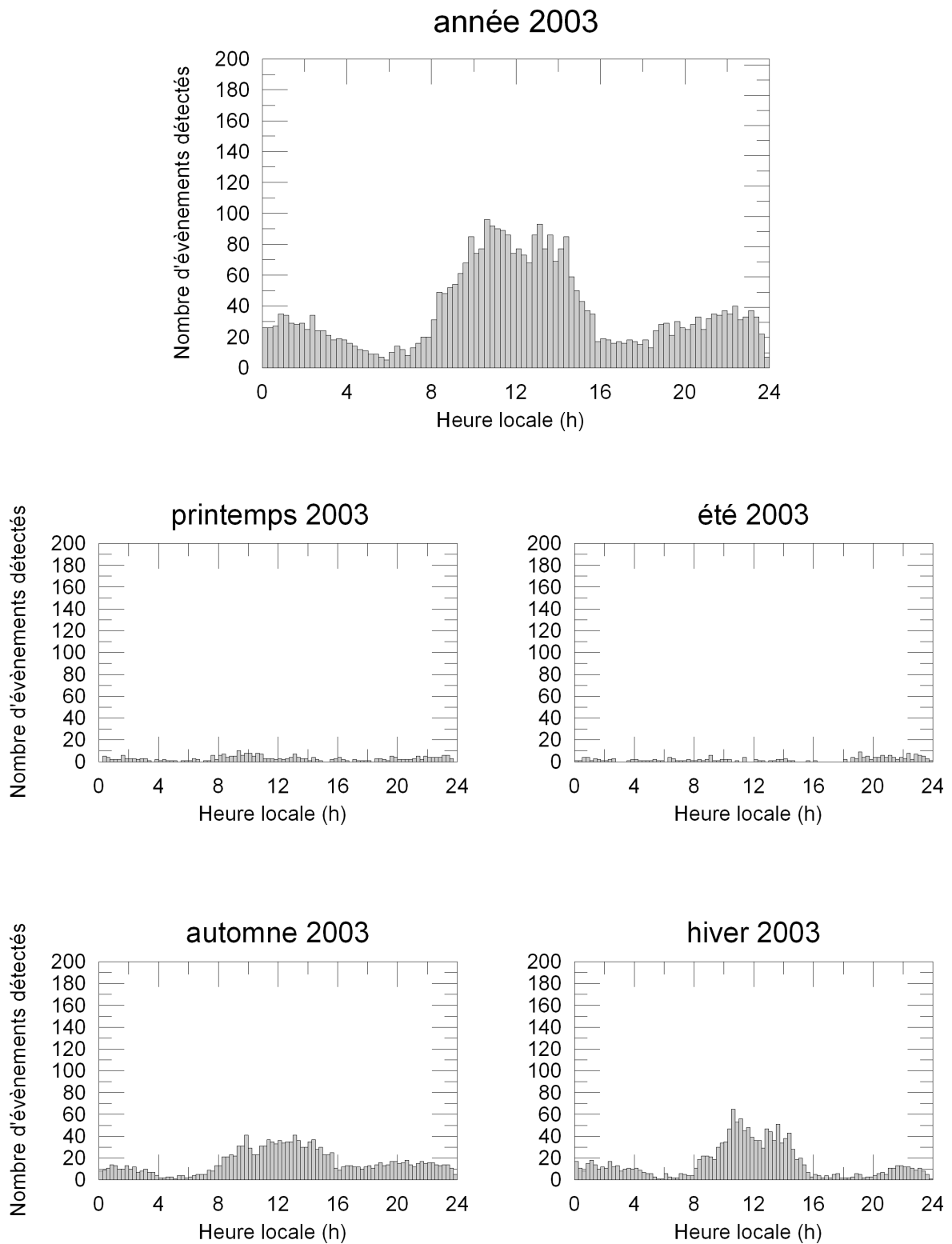


Figure 4.5: Distribution des événements ionosphériques en 2003 en fonction de l'heure locale et de la saison

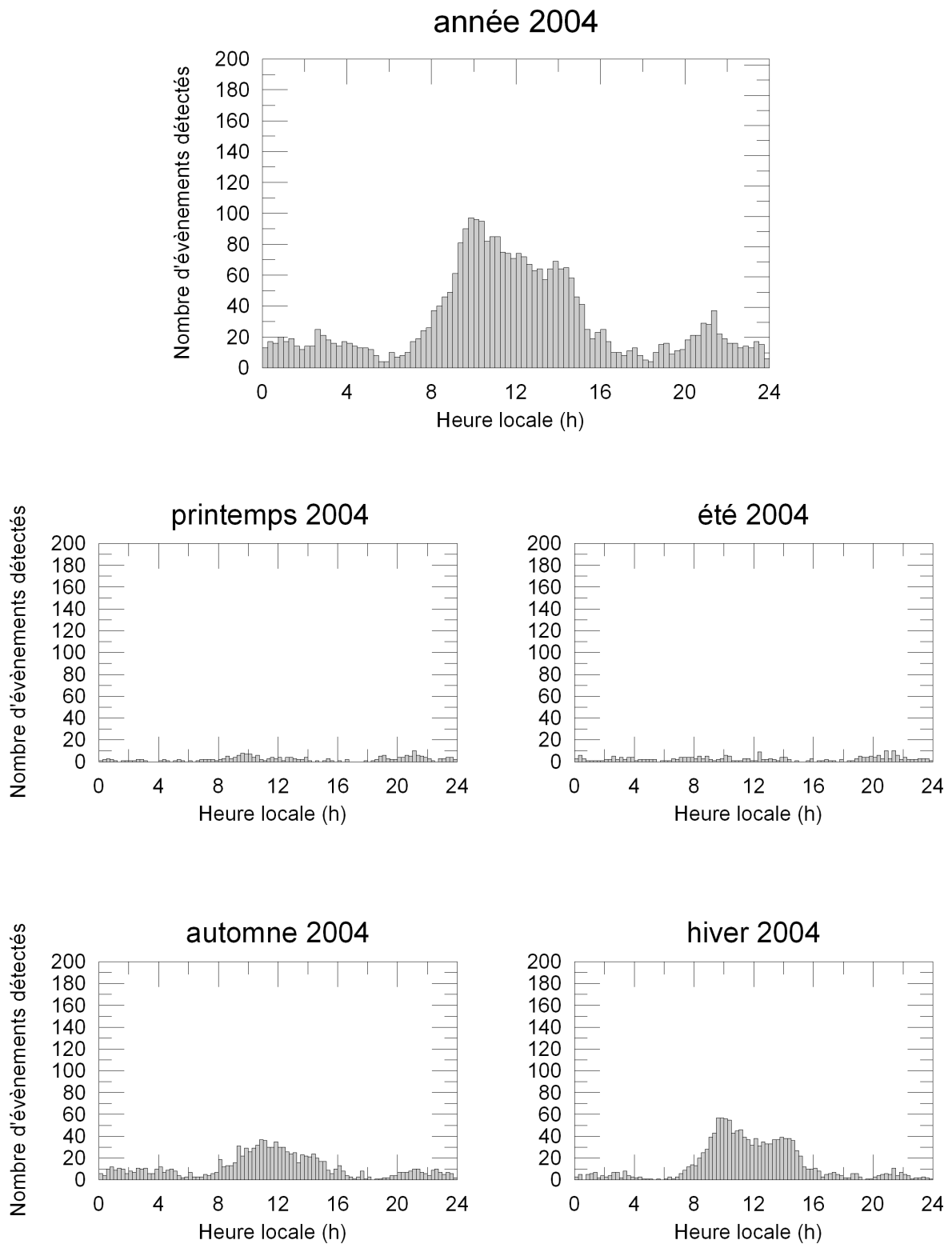


Figure 4.6: Distribution des événements ionosphériques en 2004 en fonction de l'heure locale et de la saison

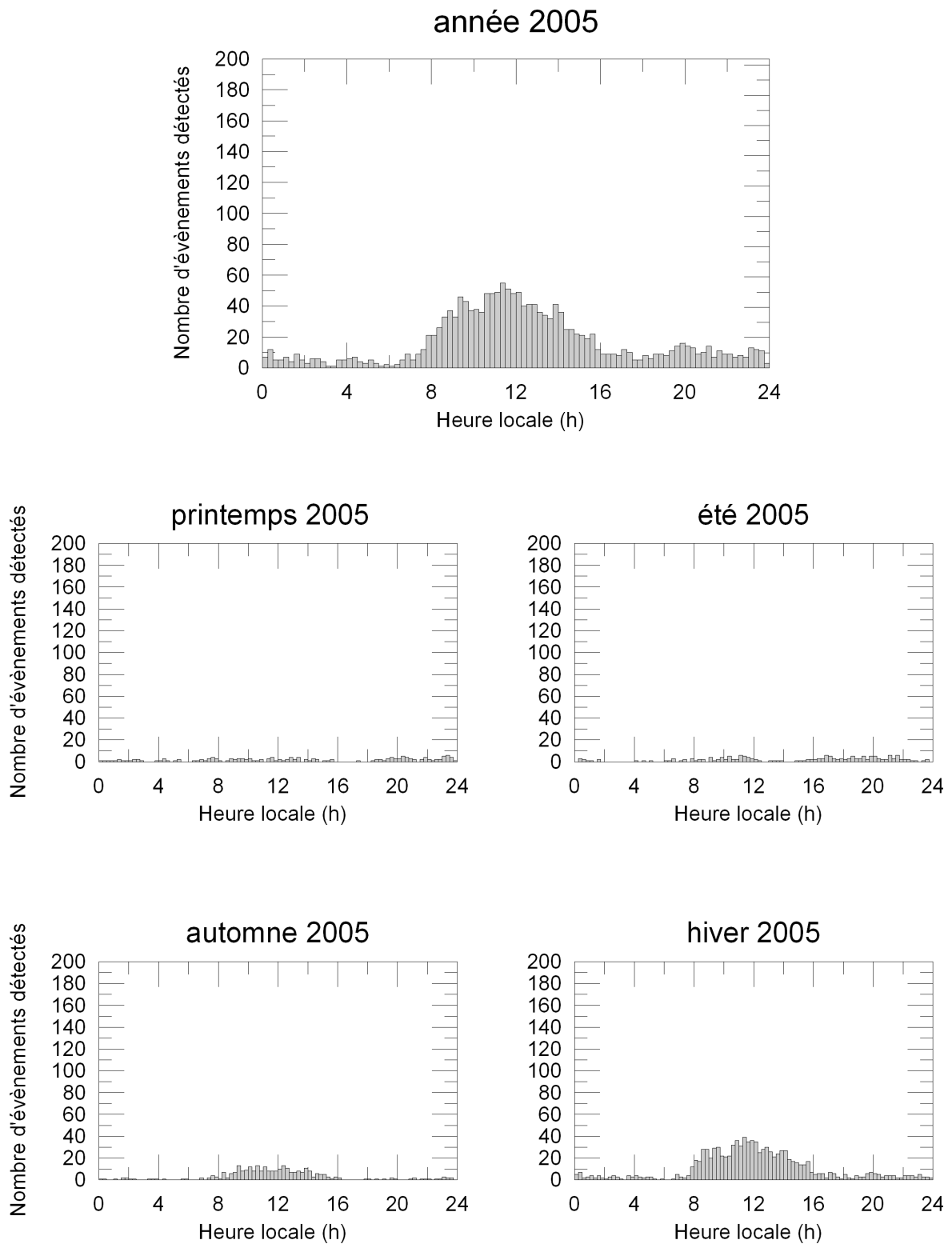


Figure 4.7: Distribution des événements ionosphériques en 2005 en fonction de l'heure locale et de la saison

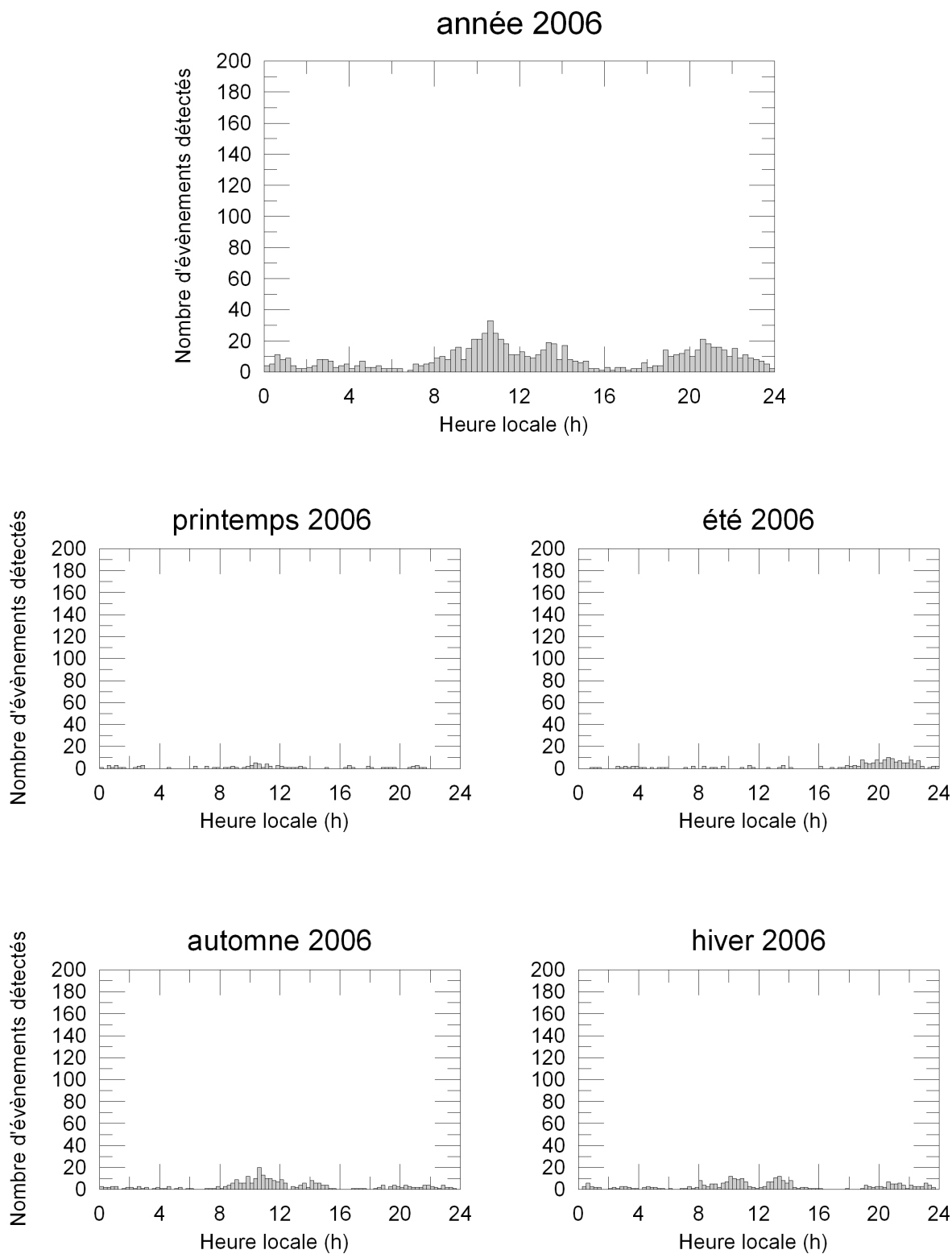


Figure 4.8: Distribution des événements ionosphériques en 2006 en fonction de l'heure locale et de la saison

4.1.2 Validité des statistiques

La section précédente nous propose une analyse de la distribution temporelle des irrégularités ionosphériques basée sur le nombre d'évènements ionosphériques détectés par un programme automatique. Cette méthode basée sur les systèmes GNSS présente de nombreux avantages : le fait que les satellites GNSS soient observables en tout point du globe et à n'importe quel moment de la journée permet à cette méthode d'être adaptée très facilement presque partout sur Terre. De plus, l'excellente résolution spatio-temporelle offerte par les systèmes GNSS permet d'obtenir de l'information pour plusieurs points de l'ionosphère (points ionosphériques) simultanément. Ajoutons que les perspectives offertes par les réseaux denses (WALCORS en Wallonie et FLEPOS en Flandre par exemple) pour la détection des petites structures ionosphériques sont importantes : grâce de tels réseaux, on peut mesurer la direction et la vitesse de propagation des TID's, même de faible longueur d'onde puisque la distance typique entre les stations est de l'ordre de 20 km. Enfin, signalons que la technique GNSS présentée dans ce travail ne nécessite qu'un récepteur dont le coût d'acquisition se veut modéré en regard des autres techniques disponibles sur le marché, comme les sondeurs ionosphériques.

Toutefois, le calcul des évènements ionosphériques présente quelques limitations qu'il est utile de mentionner dans ce paragraphe afin d'obtenir un regard critique sur les résultats présentés à la section précédente. En effet, si la tendance générale (la "forme") des différentes distributions – *i.e.* les histogrammes représentant la distribution temporelle des irrégularités ionosphériques – reste valide, le nombre d'évènements détectés n'a de sens que s'il est utilisé dans le but de comparer plusieurs situations décrites par des distributions différentes. Dans ce paragraphe, nous analysons les différentes limitations de la technique utilisée qui pourraient affecter la validité de nos statistiques ; celles-ci sont décrites ci-dessous.

1. Premièrement, comme plusieurs satellites sont observables simultanément depuis une station, une même structure ionosphérique peut être observée depuis plusieurs satellites. Cela implique que le nombre d'évènements ionosphériques détectés est artificiellement surestimé puisque l'on observe plusieurs évènements au lieu d'un seul. Cette surestimation est d'autant plus importante que le nombre de satellites de la constellation GPS est élevé ; on sait par ailleurs que celle-ci a évolué depuis la mise en application du système (fig. 4.9).

Afin d'atténuer cette dépendance à la constellation lorsque l'on additionne les évènements par quart d'heure, on peut envisager deux possibilités :

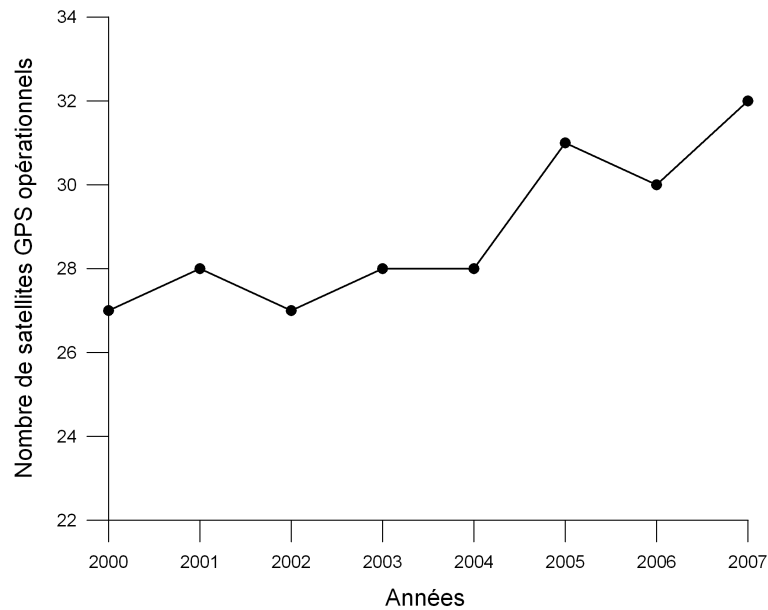


Figure 4.9: Évolution de la constellation GPS (nombre de satellites opérationnels) de 2000 à 2007 (D'après CANSPACE)

- diviser le nombre d'évènements détectés par le nombre de satellites visibles. Cette proposition est très facile à implémenter et fonctionne très bien lorsque toutes les irrégularités détectées sont relatives à la même structure ionosphérique. Cependant, le nombre d'irrégularités est sous-estimé si les satellites ont effectivement détecté plusieurs structures différentes.
- attribuer un poids à chaque évènement détecté. De cette manière, le nombre d'évènements détectés sur le quart d'heure de données serait égal à la somme pondérée des évènements :

$$\text{Nombre d'évènements}_{15 \text{ min}} = \sum_{i=1}^n P_i$$

La difficulté majeure de cette méthode réside alors dans l'attribution des poids. Toutefois, cette dépendance entre le nombre de satellites visibles et le nombre d'irrégularités détectées par notre programme automatique constitue un avantage pour les utilisateurs de GNSS. Rappelons en effet que ces derniers utilisent la totalité des satellites visibles pour se positionner, ce qui implique que le risque de dégradation de la précision du positionnement est plus important lorsque le nombre de visées "station-satellite" qui sont affectées par les structures ionosphériques est important. Le nombre d'évènements détectés par notre programme constitue dès lors un excellent outil permettant d'évaluer l'impact ionosphérique de manière qualitative sur la précision du positionnement.

2. Ensuite, la constellation GPS – tout comme la future constellation européenne Galileo – ne couvre pas la zone située au Nord de la station (fig. 4.10) : cela a pour conséquence qu’aucune information ionosphérique n’est disponible pour cette région.

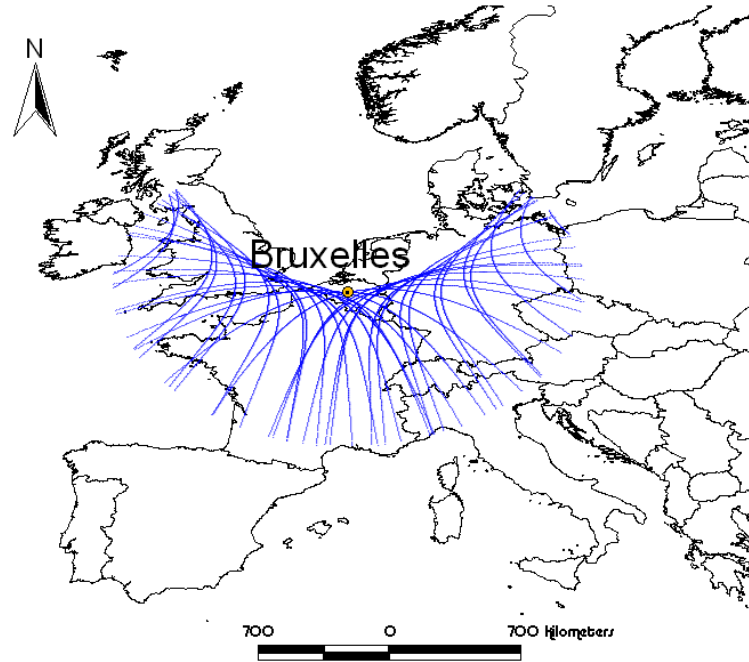


Figure 4.10: Trace des points ionosphériques à Bruxelles pour une journée de données (Source : WAUTELET 2006)

L’anisotropie de la distribution spatiale de l’information ionosphérique entraîne donc une sous-estimation du nombre d’irrégularités ionosphériques que l’on pourrait détecter à partir d’une station. Si on se place du point de vue du physicien ionosphériste, ce manque d’information au Nord de la station entraîne quelques difficultés pour l’interpolation des données entre l’Est et l’Ouest, alors que le problème ne se pose pas pour les régions situées au Sud de la station. De ce point de vue, l’information ionosphérique obtenue grâce à GPS est donc lacunaire. Par contre, si on se place du point de vue des utilisateurs GPS (ou plus généralement GNSS), le manque de données au Nord ne se fait pas ressentir puisque l’important pour eux est de se positionner le plus précisément possible, et ce indépendamment (ou presque) de la géométrie de la constellation. Ainsi, cette communauté d’utilisateurs ne s’intéresse qu’aux dégradations que subissent les signaux provenant des satellites observés, quelle que soit la position du point ionosphérique. Autrement dit, l’hétérogénéité de la distribution spatiale des PI’s autour de la station d’observation ne porte à conséquence que sur les études ionosphériques

et non sur les utilisateurs dits "de terrain".

3. Par ailleurs, la mesure de la variabilité ionosphérique donnant naissance aux événements ionosphériques (cf. § 3.2) est calculée toutes les 15 minutes. On peut se poser la question de l'influence de cette durée sur le nombre d'événements ionosphériques détectés. Le choix d'une période de 15 min est discuté dans (WARNANT & POTTIAUX 2000) et résulte d'un compromis pour détecter les MSTID's. Ce choix est tout de même pertinent puisque la majorité des irrégularités ionosphériques que nous avons détectées entre 2001 et 2006 présentent une dépendance avec la saison et l'heure locale comme c'est le cas pour les MSTID's.
4. Enfin, nous avons utilisé l'intégralité des jours de l'année afin de construire les statistiques qui précèdent. Cependant, la majorité des irrégularités observées à Bruxelles sont des MSTID's (cf. § 4.1.1). Or, comme la génération des AGW responsables des MSTID's n'est pas d'origine géomagnétique, il faudrait exclure de nos statistiques les jours présentant des indices géomagnétiques élevés afin de ne pas inclure les NLS et les LSTID's qui sont dues aux effets géomagnétiques. On pourrait par exemple choisir d'analyser les jours caractérisés par $K_p < 5$ de manière à exclure systématiquement tous les jours de tempête géomagnétique (cf. classification § 2.2.3). Si on appliquait ce type de filtrage, on pourrait alors établir de manière plus précise des statistiques climatologiques sur l'occurrence des MSTID's.

Par contre, si l'on se place du point de vue des utilisateurs quotidiens des GNSS, le fait de baser les statistiques sur l'intégralité des jours de l'année ne pose pas de problème. Dans ce cas, il importe de connaître les périodes idéales ainsi que les périodes les moins favorables pour l'utilisation de ces systèmes de positionnement. Pour cela, il s'agit d'analyser l'ensemble des perturbations ionosphériques observées à une station GNSS de moyenne latitude afin que l'on puisse représenter le plus fidèlement possible le comportement ionosphérique pour n'importe quelle phase du cycle solaire et à n'importe quel moment de la journée. C'est dans cette seconde optique que nous orientons les résultats de ce travail.

4.2 Quantification de l'amplitude des irrégularités ionosphériques

Dans cette section, nous tentons de quantifier l'amplitude des irrégularités ionosphériques en utilisant les deux variables que sont les valeurs moyennes (typiques) et extrêmes de la variabilité ionosphérique (RoTEC en TECU/min) pour une station GNSS

située aux latitudes moyennes. Comme dans la section 4.1, aucune distinction ne sera effectuée entre les TID's et les NLS ou encore entre les phénomènes dus à des effets géomagnétiques et ceux qui ne le sont pas. En effet, l'intérêt de notre travail est de quantifier l'effet provoqué par la variabilité ionosphérique sur la propagation des signaux GNSS, et cela quelle que soit la cause de cette variabilité.

Après avoir caractérisé l'amplitude des irrégularités (cf. § 4.2.1), nous mettons en évidence les principales limitations de la méthode qui portent sur la précision du calcul du RoTEC (cf. § 4.2.2).

Enfin, on définit les conditions typiques et extrêmes de l'ionosphère aux latitudes moyennes en se basant sur les résultats obtenus pour la fréquence d'occurrence des irrégularités et la caractérisation de leur amplitude (cf. § 4.1.1 et § 4.2.1). Pour rappel, la station d'observation utilisée est celle de Bruxelles (BRUS) et l'intervalle de temps considéré pour ces statistiques s'étend de janvier 2001 à décembre 2006.

4.2.1 Caractérisation de l'amplitude des irrégularités

Amplitude saisonnière moyenne

On peut caractériser le comportement moyen de la variabilité ionosphérique en calculant une moyenne journalière du RoTEC. Cette valeur journalière est le résultat d'un calcul qui moyenne le RoTEC correspondant à chaque mesure effectuée toutes les 30 s pour tous les satellites visibles depuis la station considérée. Si on veut illustrer la variation saisonnière des irrégularités ionosphériques comme on l'a démontré à la section précédente, il importe de moyenner ces valeurs journalières pour chaque saison ; on obtient alors le tableau 4.3.

	Printemps	Été	Automne	Hiver
2001	0,032	0,029	0,041	0,030
2002	0,030	0,030	0,036	0,040
2003	0,028	0,026	0,033	0,033
2004	0,026	0,026	0,029	0,031
2005	0,024	0,024	0,024	0,028
2006	0,023	0,023	0,024	0,025

Tableau 4.3: Valeurs moyennes saisonnières du RoTEC de 2001 à 2006 (exprimées en TECU/min)

L'analyse de ce tableau nous montre que la variabilité moyenne du TEC est généralement plus importante durant l'automne et l'hiver ; cette observation confirme

donc les statistiques que nous avons obtenues à la section précédente. Nous pouvons également confirmer que le comportement moyen du RoTEC évolue avec la phase du cycle solaire : en effet, le RoTEC moyenné par saison est maximum pour l'année du maximum d'activité solaire (2001) et minimum pour l'année 2006 qui se situe proche du minimum d'activité solaire.

Notons que les valeurs extrêmement élevées du RoTEC durant les tempêtes géomagnétiques sévères qui se sont déroulées durant l'automne 2003 (cf. infra) n'ont pas induit d'augmentation significative de la moyenne : celle-ci décroît en effet depuis l'automne 2001 jusque l'automne 2006 sans présenter de pic durant l'automne 2003. Les valeurs moyennes saisonnières que nous présentons dans ce travail sont donc des valeurs robustes par rapport aux phénomènes extrêmes qui se sont produits durant les six années analysées.

Amplitude saisonnière maximale

Dans ce paragraphe, nous analysons l'évolution de la valeur maximale du RoTEC observée à Bruxelles en fonction de la saison et de l'année considérée. Les valeurs maximales de RoTEC supérieures à 1,5 TECU/min sont généralement le reflet de NLS dues à des tempêtes géomagnétiques qui ont elles-mêmes été provoquées par l'interaction entre une ICME et le champ magnétique terrestre (cf. § 2.2.3). Cette affirmation s'appuie sur le fait que jusqu'à présent, on n'a identifié aucune TID dont les gradients temporels du TEC dépassent 1,5 TECU/min. Néanmoins, cette hypothèse n'est pas irréfutable puisqu'elle se base sur l'observation manuelle d'un nombre limité d'observations effectuées sur un intervalle de temps restreint. De plus, cela ne signifie pas pour autant que les valeurs maximales qui figurent dans le tableau 4.4 et qui sont inférieures à 1,5 TECU/min soient exclusivement dues à des TID's. En effet, comme on l'a vu à la section 2.2.3, il existe d'autres causes géomagnétiques susceptibles d'induire des irrégularités du TEC d'amplitude modérée.

L'analyse du tableau 4.4 nous permet de confirmer l'existence de la relation entre l'activité solaire et l'amplitude des irrégularités ionosphériques. En effet, de manière générale, les valeurs maximales observées durant les années de basse activité solaire (2005 et 2006) sont inférieures à celles observées durant les années de maximum d'activité solaire (2001 et 2002). Cependant, toutes les valeurs extrêmes relatives à l'année 2006 ne sont pas nécessairement moins importantes que celles relatives à l'année 2001. En effet, si on se base sur les valeurs observées durant les étés 2005 et 2006, on constate que la variabilité maximale estivale est supérieure durant ces années de minimum solaire que durant l'année 2001.

	Printemps	Été	Automne	Hiver
2001	6,881	1,147	4,028	9,068
2002	0,745	1,821	1,946	2,211
2003	0,693	0,653	9,839	1,231
2004	1,581	1,152	0,861	1,263
2005	1,234	2,579	0,543	1,276
2006	0,582	1,197	0,805	0,845

Tableau 4.4: Valeurs maximales saisonnières du RoTEC de 2001 à 2006 (exprimées en TECU/min)

Cette constatation nous montre que des périodes de forte variabilité ionosphérique peuvent même se produire durant des années de basse activité solaire, même si le nombre de périodes présentant des irrégularités dépend fortement de l'activité solaire. Ces statistiques prouvent donc aux utilisateurs des GNSS que les effets induits par l'ionosphère sur les signaux provenant des satellites sont potentiellement importants, et ce quelle que soit la phase du cycle solaire envisagée.

4.2.2 Validité du calcul du RoTEC

Dans le chapitre qui détaille le calcul du RoTEC (cf. § 3.2), on a établi que la précision du RoTEC est meilleure que 0,1 TECU/min. Cette précision, qui est analysée par WARNANT (1996), est obtenue en évaluant les termes résiduels dus principalement au multipath et au bruit affectant les mesures de phases. De cette manière, la précision des statistiques quantitatives établies dans les sections précédentes est également meilleure que 0,1 TECU/min. Cependant, en cas de variabilité ionosphérique très importante comme c'est le cas durant les tempêtes géomagnétiques, certaines sources d'erreurs ignorées auparavant sont à prendre en considération ; les deux sources principales sont reprises ci-dessous.

1. Lorsque que l'on convertit les gradients de TEC obliques en gradients verticaux (*i.e.* conversion du ΔSTEC en ΔVTEC), une erreur due à la la fonction de projection (*mapping function*) provoque une imprécision sur le calcul du ΔVTEC . Cette erreur est d'autant plus importante que le satellite considéré se trouve à basse élévation et que les irrégularités ionosphériques observées sont de grande amplitude (RADICELLA 2004). Cependant, notre méthode ne considère les satellites comme visibles que lorsque leur élévation est supérieure à 20° ; cette condition

implique que les données de RoTEC que nous obtenons ne sont que peu affectées par ce problème de conversion. Notons toutefois que RADICELLA montre que ces effets de conversion peuvent encore provoquer des imprécisions pour des élévations de satellites qui atteignent 30° pour des cas extrêmes (jours de graves tempêtes géomagnétiques). Cette limitation pourrait donc affecter la validité des valeurs numériques extrêmes comme celle de 9,839 TECU/min observée lors de la tempête géomagnétique du 30 octobre 2003.

2. On a vu que la conversion du ΔSTEC en ΔVTEC nécessite la connaissance de l'angle zénithal du satellite au point ionosphérique. Pour rappel, ce dernier est le point de percée de la visée "station-satellite" avec une coquille ionosphérique considérée infiniment mince et qui contient la totalité des électrons libres de l'ionosphère. La hauteur de cette coquille ionosphérique a été portée à 400 km dans nos programmes. Cependant, RADICELLA (2004) a montré que, pour des jours de tempêtes géomagnétiques, la hauteur idéale de cette coquille se situe à environ 650 km. De cette manière, les valeurs extrêmes qui figurent dans le tableau 4.4 sont entachées d'erreurs dont l'ordre de grandeur n'est pas aisément quantifiable. Pour des travaux ultérieurs, il conviendrait de pouvoir estimer l'impact du changement de hauteur de la coquille ionosphérique sur le calcul du RoTEC en cas de tempête géomagnétique sévère.

Une autre limitation de la méthode utilisée est liée au fait que, dans les réseaux géodésiques, les récepteurs sont généralement programmés pour effectuer une mesure toutes les 30 s, ce qui signifie que l'on possède une valeur du RoTEC toutes les 30 s seulement. Or, en cas de variation rapide du TEC, il se peut que de l'information soit perdue car la fréquence des variations du TEC est supérieure à la cadence de mesure. Cet effet a été démontré par WAUTELET (2006) : il a prouvé à partir de données simulées que l'amplitude des TID's mesurées par GPS avec une cadence de 30 s pouvait être inférieure à l'amplitude réelle de la TID. Cela implique que les valeurs maximales du RoTEC présentées dans le tableau 4.4 pourraient être sous-estimées.

L'utilisation généralisée des données à une cadence d'observation de 1 s améliorerait sans aucun doute la fiabilité et la précision des mesures maximales du RoTEC. Précisons cependant que le but de notre travail est d'évaluer l'influence de l'ionosphère sur les signaux émis par les satellites GNSS. Dès lors, il importe peu pour les utilisateurs des GNSS de connaître les valeurs théoriquement observables puisque ces derniers se basent uniquement sur les valeurs qu'ils ont effectivement observées. Les valeurs du tableau 4.4 reflètent donc de manière valide les effets ionosphériques extrêmes que l'on peut observer par GPS.

Une dernière remarque porte sur la fiabilité des valeurs maximales reprises dans le tableau 4.4 : en effet, rappelons qu'avant d'être utilisées pour produire des statistiques, les séries temporelles du RoTEC ont dû être filtrées afin de supprimer les mauvaises mesures qui s'y logaient. On a vu que ce filtre n'était pas capable de détecter la totalité de ces mauvaises mesures et il se peut donc que les maxima du tableau 4.4 en contiennent encore. En effet, nous avons vu à la section 3.6 qu'approximativement 2 à 8% des maxima sélectionnés pour la validation reflétaient la présence d'une mauvaise mesure. Toutefois, le jour 324/03 (20 novembre 2003) pour lequel $\text{RoTEC}_{max, jour} = 8,933 \text{ TECU/min}$ a été validé dans son entièreté de manière manuelle par SPITS (2007) lors du développement de la méthode de détection des sauts de cycles. L'auteur a prouvé que les valeurs maximales observées durant ce jour ne sont pas le reflet de mauvaises mesures dues à des sauts de cycles mal détectés mais bien à la variabilité ionosphérique extrême due à une tempête géomagnétique. Dès lors, les valeurs extrêmes présentées dans le tableau 4.4 sont tout à fait réalistes pour des événements géomagnétiques intenses. En conclusion, même si le filtre que nous avons développé ne supprime pas la totalité des mauvaises mesures, les valeurs extrêmes contenues dans le tableau 4.4 sont réalistes.

4.2.3 Conditions typiques et extrêmes

Grâce aux statistiques qualitatives et quantitatives des sections 4.1 et 4.2.1, on peut définir les conditions typiques et extrêmes que l'on peut observer avec une station GPS de latitude moyenne.

Tout d'abord, les conditions typiques sont définies comme étant les conditions ionosphériques moyennes que l'on observe par GPS pour un jour quelconque de l'année. Dans cette définition, on ne considère plus la dépendance entre l'activité ionosphérique et l'heure locale ou encore la saison que l'on a pu mettre en évidence dans la section 4.2.1 : les conditions typiques sont des moyennes annuelles.

Ensuite, les conditions extrêmes sont définies comme étant les conditions ionosphériques extrêmes qui se produisent une fois l'année : il s'agit donc des pires conditions observées sur l'année étudiée. Comme pour la définition des conditions typiques, les conditions extrêmes reflètent les "pires cas" de l'année considérée et non plus des saisons.

Conditions typiques

Si on additionne la totalité des évènements ionosphériques observés sur l'année étudiée et que l'on divise cette valeur par le nombre de jours que comporte l'année en question, on obtient le nombre journalier d'irrégularités ionosphériques détectées par GPS. De même, si on moyenne toutes les valeurs du RoTEC observées pour une année entière, on obtient la variabilité moyenne qui représente le comportement typique de l'ionosphère pour l'année considérée. Les résultats sont repris dans le tableau 4.5.

	Nombre moyen d'évènements détectés par jour	Amplitude moyenne du RoTEC [TECU/min]
2001	21	0,033
2002	19	0,034
2003	10	0,030
2004	8	0,028
2005	4	0,025
2006	2	0,024

Tableau 4.5: Conditions ionosphériques typiques basées sur les données annuelles

Le tableau 4.5 nous montre que la valeur moyenne annuelle du RoTEC pour une année de basse activité solaire (2006) est de 0,024 TECU/min ; ce résultat justifie le choix de la variabilité moyenne d'une année de basse activité solaire que nous avons estimée à 0,025 TECU/min. Cette hypothèse utilisée pour le calcul du seuil de sélection des jours à valider était donc valide.

Conditions extrêmes

Si on classe les jours de l'année par ordre décroissant du nombre d'évènements ionosphériques détectés au cours de l'année, on peut en extraire le "pire cas" (du point de vue de la variabilité ionosphérique) observé pour l'année considérée. De même, si on isole la valeur maximale du RoTEC pour l'année considérée, on obtient le "pire cas" (du point de vue des gradients temporels du TEC) observé pour cette année. Les résultats figurent dans le tableau 4.6.

Ce dernier tableau confirme le fait que, même durant des années de basse activité solaire comme 2006, des journées très perturbées au niveau ionosphérique peuvent avoir lieu. Par conséquent, des dégradations assez importantes de la position obtenue par GPS peuvent apparaître et ce, probablement à l'insu de l'utilisateur.

	Nombre maximal d'irrégularités détectées pour 1 jour	Amplitude maximale du RoTEC [TECU/min]
2001	247	9,068
2002	153	2,211
2003	230	9,839
2004	102	1,581
2005	63	2,579
2006	37	1,197

Tableau 4.6: Conditions ionosphériques extrêmes basées sur les données annuelles

4.3 Étude de cas particuliers

Dans cette section, nous analysons en détails les effets ionosphériques induits par trois causes distinctes : une éruption solaire, une grave tempête géomagnétique et une TID de moyenne amplitude. Pour chacun de ces phénomènes – qui correspondent chacun à un jour particulier – nous analysons le comportement du RoTEC ainsi que celui du TEC au moment du passage de la perturbation. Cette section a donc pour but d'illustrer les différentes structures ionosphériques que l'on peut observer par GPS et de quantifier les amplitudes du RoTEC et du TEC dues à ces structures.

4.3.1 Éruption solaire du 28 octobre 2003 (DOY 301/03)

On a vu qu'une éruption solaire peut être définie comme un chauffage extrêmement rapide de la couronne solaire associée à une reconfiguration rapide des champs magnétiques coronaux (cf. § 2.2.2). Ce phénomène de chauffage où la température peut atteindre plus de $10 \cdot 10^6$ K provoque une importante libération d'énergie sous forme de rayonnement électromagnétique. Ce rayonnement émis couvre un large domaine de longueurs d'onde (radio, visible, UV...) mais ce sont principalement les photons EUV et X mous qui influencent de manière considérable la chimie de l'ionosphère en augmentant d'une manière très importante le taux d'ionisation.

L'effet d'une éruption sur l'ionosphère est donc de provoquer une augmentation brutale de la concentration électronique N_e et ce, pour la partie de l'ionosphère qui se trouve dans la partie éclairée par le Soleil. L'effet d'une éruption sur la partie de l'ionosphère située à la verticale d'un lieu d'observation dépend principalement de l'angle zénithal du Soleil à la station : plus celui-ci est élevé, plus l'augmentation de

N_e est faible. En effet, si le Soleil est bas sur l'horizon (angle zénithal élevé), les photons énergétiques traversent une couche d'atmosphère plus importante que si le Soleil est proche du zénith, ce qui induit une plus faible augmentation de N_e .

On peut classer les éruptions solaires sur base de l'intensité de leur émission en rayons X mous ; l'émission dans cette bande spectrale semble être corrélée à l'émission en rayons EUV qui est principalement responsable de l'ionisation du plasma ionosphérique. Cette classification est basée sur une échelle logarithmique contenant le flux maximum en rayons X mous dans la bande 1-8 Å (cf. tableau 4.7).

Classe	Flux maximum (1-8 Å) $\log_{10}(P)$ en W/m^2
A	-8
B	-7
C	-6
M	-5
X	-4

Tableau 4.7: Classification des éruptions solaires sur base du flux maximum dans la bande 1-8 Å (D'après CLETTE 2007)

Cette classification illustrée dans le tableau 4.7 signifie qu'une éruption de classe M voit son flux maximum dans la bande 1-8 Å situé entre 10^{-5} et 10^{-4} W/m^2 . Dès lors, les éruptions solaires les plus importantes sont celles de classe X. Depuis le début des mesures du flux intégré entre 1 et 8 Å par les satellites GOES (NASA), l'éruption solaire la plus puissante qui ait été observée était de classe X28, soit une puissance $P = 2,8 \cdot 10^{-3}$ W/m^2 .

L'éruption solaire qui s'est produite le 28 octobre 2003 est une éruption de type X17,2 ; il s'agit de la quatrième émission la plus puissante dans le domaine de longueur d'onde 1-8 Å. Il s'agit cependant de l'émission la plus puissante jamais enregistré par le satellite SOHO (module CELIAS/SEM) dans le spectre EUV entre 260 et 340 Å. Cette dernière information justifie à elle seule l'intérêt que nous portons à l'étude de la réponse ionosphérique suite à une telle stimulation électromagnétique.

L'éruption solaire s'est produite vers 11 h (heure UTC) et le comportement du TEC et du RoTEC est présenté à la figure 4.11 pour le satellite 7.

On peut remarquer que la valeur du TEC augmente de manière très importante au moment où l'éruption solaire se produit. Cette augmentation d'environ 14-15 TECU en quelques minutes nous permet d'affirmer que l'éruption solaire a provoqué une augmentation approximative de 30% du TEC ambiant (avant éruption). Notons que des

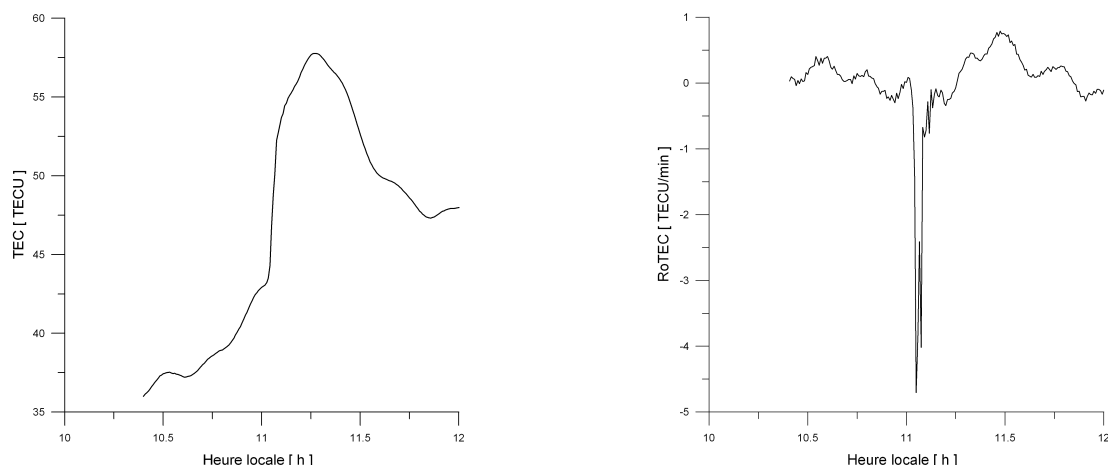


Figure 4.11: Effets induits par l'éruption solaire du 28 octobre 2003 sur le TEC (à gauche) et sur le RoTEC (à droite) pour le satellite 7

profils identiques à ceux proposés à la figure 4.11 ont été obtenus pour chaque satellite observé à Bruxelles durant l'éruption, avec les mêmes ordres de grandeurs que ceux décrits ci-dessus pour le satellite 7.

De plus, des travaux menés par TSURUTANI *et al.* (2005) montrent que de tels gradients ont été observés pour toutes les stations GPS éclairées par le Soleil et qu'aucun effet n'avait été constaté du côté "nuit" de l'ionosphère. Il a également constaté que l'augmentation du TEC est plus faible lorsque l'angle zénithal solaire est important, ce qui confirme les propos tenus ci-dessus. L'auteur fait aussi remarquer que le TEC met plusieurs heures pour retrouver sa valeur ambiante pré-éruptive alors que le flux EUV décline de manière plus rapide. Pour TSURUTANI *et al.*, cette constatation constitue une preuve que l'essentiel de la production ionique dans la haute atmosphère est due au rayonnement EUV et non à la présence des photons X mous.

La figure 4.11 nous montre également que les gradients de TEC présentent des valeurs extrêmes qui approchent 5 TECU/min au moment de l'éruption. Ces valeurs sont supérieures à toutes les amplitudes de TID's que l'on a pu observer jusqu'à présent. Les effets d'une éruption solaire sur la variabilité de l'ionosphère sont donc très brutaux et très importants.

4.3.2 Tempête géomagnétique du 20 novembre 2003 (DOY 324/03)

La tempête géomagnétique observée le 20 novembre 2003 trouve son origine dans l'interaction entre une ICME et le champ magnétique terrestre. La composante verti-

cale du champ magnétique interplanétaire (B_z) contenu dans l'ICME était fortement négative, ce qui a entraîné des perturbations très importantes de l'intensité du champ magnétique terrestre : l'indice DST a atteint la valeur de -422 nT, ce qui est la valeur la plus basse observée durant le cycle solaire 23. L'indice Kp observé était de 9 entre 15 et 21 h, ce qui confirme la présence d'une grave tempête géomagnétique (*severe geomagnetic storm* – cf. § 2.2.3).

L'évolution du TEC et du RoTEC est montrée à la figure 4.12 pour le satellite 2. Tous les satellites observés durant cette période présentent les mêmes effets ionosphériques avec des amplitudes semblables.

On peut constater que l'augmentation du TEC induite par la tempête géomagnétique est légèrement supérieure à 20 TECU, ce qui correspond à une augmentation de plus de 300% du TEC ambiant. Ce pourcentage important est dû au fait que la valeur du TEC avant la tempête géomagnétique n'était que de 6 TECU. À ce propos, remarquons que le TEC présente une augmentation importante durant l'après-midi alors que le comportement naturel du TEC à ce moment de la journée est décroissant. Cela signifie que les effets ionosphériques induits par la tempête géomagnétique sont clairement supérieurs à la variation naturelle du TEC qui est provoquée par le mouvement du Soleil dans le ciel local.

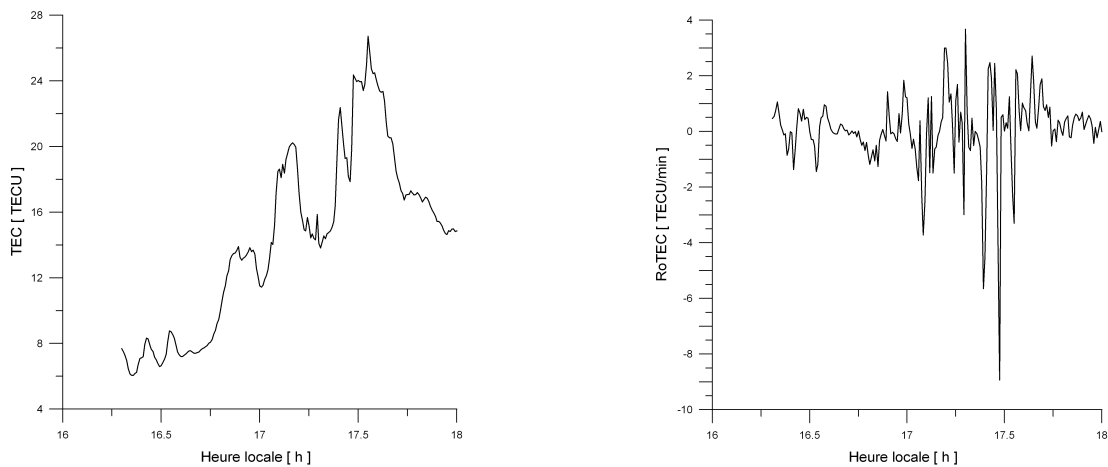


Figure 4.12: Effets induits par la tempête géomagnétique du 20 novembre 2003 sur le TEC (à gauche) et sur le RoTEC (à droite) pour le satellite 2

Dans la série temporelle du RoTEC, on constate que la valeur extrême observée pour ce jour 324/03 est de $8,933$ TECU/min. On soulignera que, même si la tempête géomagnétique de ce jour 324/03 est la plus importante du cycle solaire 23 en terme d'indice DST, la valeur extrême du RoTEC qui lui correspond n'est pas la valeur

extrême observée pour le cycle 23. Cette dernière a été observée durant la tempête géomagnétique du 30 octobre 2003 (jour 303/03) et était égale à 9,839 TECU/min.

4.3.3 TID du 24 décembre 2004 (DOY 359/04)

Le dernier cas d'irrégularité ionosphérique que nous illustrons dans le cadre de ce travail est le passage d'une TID de moyenne amplitude. La TID est observée entre 10 et 12 h dans plusieurs séries temporelles du RoTEC (sat 2, 5, 6, 14, 17, 14 et 30) mais c'est dans celle relative au satellite 17 que l'amplitude est la plus importante ; la figure 4.13 illustre le comportement du TEC et du RoTEC pour le satellite 17 durant le passage de la TID.

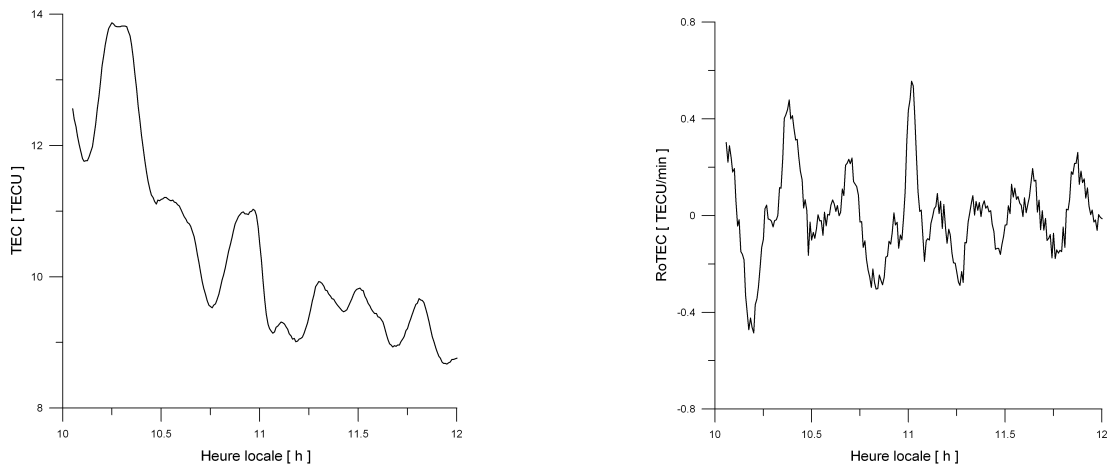


Figure 4.13: Effets induits par la TID du 24 décembre 2004 sur le TEC (à gauche) et sur le RoTEC (à droite) pour le satellite 17

L'analyse de cette figure montre que le passage de cette TID provoque des valeurs de RoTEC qui atteignent 0,6 TECU/min. L'ordre de grandeur des irrégularités ionosphériques dues au passage de TID's est donc beaucoup moins important que l'ordre de grandeur des irrégularités provoquées par des phénomènes d'origine solaire comme les éruptions ou les tempêtes géomagnétiques. Cependant, rappelons que la TID analysée dans ce paragraphe est de moyenne amplitude : nous avons en effet déjà pu observer des TID's qui présentent des valeurs de RoTEC avoisinant 1,3 TECU/min. Comme on l'a mentionné dans la section 4.2.1, on considère que la valeur maximale du RoTEC due au passage d'une TID est d'environ 1,5 TECU/min.

La série temporelle qui illustre l'évolution du TEC durant le passage de la TID (fig. 4.13) nous montre que la TID provoque une variation pic-à-pic de pratiquement 5 TECU.

Comme pour le jour où s'est produite la tempête géomagnétique, on peut remarquer que la série temporelle du TEC évolue de manière contraire à la variation naturelle du TEC. En effet, le TEC de ce jour 359/04 décroît globalement de 10 h à midi alors que la variation naturelle du TEC consiste en une augmentation de sa valeur jusque midi solaire.

4.4 Conclusions

De mauvaises conditions ionosphériques provoquées par d'importants gradients temporels du TEC peuvent induire des erreurs de plusieurs décimètres dans les méthodes de positionnement différentiel telles que le *Real Time Kinematic* (RTK) utilisé par les géomètres (LEJEUNE 2006). Il existe cependant des outils qui permettent de prévoir les conditions géomagnétiques quelques heures à l'avance, par exemple sur base de la prévision de l'indice global Kp : ceux-ci permettent aux utilisateurs d'être conscients des risques encourus s'ils venaient à utiliser des applications GNSS de haute précision durant les périodes agitées du point de vue géomagnétique. Toutefois, on a vu qu'une partie importante des irrégularités ionosphériques observées aux latitudes moyennes pouvaient être identifiées comme des MSTID's qui ont la particularité d'être indépendantes des conditions géomagnétiques. La prévision de tels phénomènes n'est donc pas possible mais l'utilisation des statistiques développées dans ce chapitre permet de minimiser les risques d'utilisation : si on connaît les périodes les plus perturbées de la journée, on évitera d'utiliser les systèmes GNSS durant ces périodes.

Cependant, vu les besoins de certaines applications GNSS, il n'est pas toujours possible d'éviter ces périodes. Dans ce cas, les utilisateurs pourront toujours utiliser les statistiques présentées dans ce chapitre afin d'obtenir un regard critique vis-à-vis des résultats qu'ils ont obtenus.

En pratique, sur base des statistiques que nous avons menées dans la première section de ce chapitre (cf. § 4.1), nous pouvons affirmer que les meilleures conditions d'utilisation des systèmes GNSS (du point de vue ionosphérique) sont les suivantes :

- pendant la journée (avant 20 h) durant les mois de printemps et d'été ;
- tôt le matin (avant 8 h) ou dans la seconde partie de l'après-midi (après 16 h) durant les mois d'automne et d'hiver.

Évidemment, le risque d'observer le passage d'une TID est d'autant plus faible que l'on se situe près du minimum d'activité solaire et ce, quelle que soit l'heure locale ou la saison.

Dans la deuxième et la troisième sections de ce chapitre, nous avons pu caractériser

l'amplitude des irrégularités ionosphériques et en déduire les conditions ionosphériques typiques et extrêmes en fonction de l'année considérée. Toutefois, si on peut affirmer que les phénomènes géomagnétiques induisent des irrégularités ionosphériques de plus grande amplitude que les TID's, il est difficile d'estimer de manière quantitative l'effet pour un utilisateur à un endroit et à une époque donnée. Par ailleurs, il semblerait que les effets sur le positionnement induits par une TID soient semblables (voire supérieurs) à ceux provoqués par une grave tempête géomagnétique (LEJEUNE 2006). Néanmoins, la caractérisation des amplitudes des irrégularités ionosphériques est utile pour étudier de manière méthodique les effets des structures sur le positionnement ; des travaux ultérieurs dans ce domaine seront d'ailleurs menés sur base des conclusions de ce chapitre.

Signalons que, sur base de la méthode développée par WARNANT (1996), l'IRM a développé une interface WEB qui permet d'évaluer en temps réel l'effet ionosphérique observé pour une station GPS. Cette interface propose une échelle de couleurs qui permet d'évaluer de manière qualitative l'effet ionosphérique sur les signaux GPS et en particulier sur la dégradation possible de la précision des applications à haute précision comme le RTK :

- **vert** : pas de variabilité ionosphérique
- **orange** : variabilité ionosphérique active
- **rouge** : variabilité ionosphérique importante
- **noir** : variabilité ionosphérique extrême

Grâce à ce service en temps réel, les utilisateurs ont la possibilité de contrôler la validité des résultats qu'ils ont obtenus. De plus, l'interface propose d'un service d'alerte par courrier électronique lorsque des conditions rouges ou noires ont été détectées une heure auparavant ou lorsque de telles conditions sont attendues pour les prochaines heures.

Chapitre 5

CONCLUSIONS

Ce travail présente une méthode qui permet de détecter les irrégularités temporelles du Contenu Électronique Total de l'ionosphère en se basant sur les données d'une seule station GPS. Le principal avantage de la technique GPS est de présenter une excellente résolution spatio-temporelle : au moins quatre satellites sont visibles à tout instant pour n'importe quelle région du globe. Ainsi, grâce aux données GPS, on obtient de l'information ionosphérique toutes les 30 s en plusieurs points de l'ionosphère (points ionosphériques), ce qui nous permet de détecter les irrégularités ionosphériques pour chacune des visées "station-satellite". Plus précisément, on caractérise les périodes agitées du point de vue ionosphérique en définissant l'«événement ionosphérique» : un événement est détecté lorsque la variabilité du RoTEC sur une période de 15 min est supérieure au seuil de 0,08 TECU/min. Dès lors, on peut utiliser ces événements ionosphériques comme données de base pour analyser la distribution temporelle des irrégularités ionosphériques.

La première étape de notre travail consiste à développer un filtre permettant d'éliminer les mauvaises mesures des séries temporelles du RoTEC. En effet, celles-ci présentent des pics qui ne sont pas liés à l'activité ionosphérique, ce qui provoque des erreurs d'interprétation du programme automatique qui détecte alors des événements ionosphériques fictifs ; les statistiques relatives aux irrégularités sont alors biaisées. Le filtre que nous avons développé est constitué de deux routines complémentaires qui détectent de manière automatique la présence de mauvaises mesures dans les données. Durant l'étape de validation du filtre, nous avons établi que le filtre détecte 82% des mauvaises mesures existantes et que les valeurs maximales journalières du RoTEC analysées ($\text{RoTEC}_{\text{max, jour}}$) contiennent encore 2 à 8% de mauvaises mesures selon l'année considérée.

La seconde étape de notre travail consiste à établir une étude climatologique des irrégularités ionosphériques. Les statistiques que l'on établit dans cette section se basent sur les données du RoTEC calculées à Bruxelles entre janvier 2001 et décembre 2006 et qui ont été préalablement filtrées. L'étude se divise en deux parties.

La première partie analyse la fréquence d'occurrence des irrégularités en fonction du cycle solaire, de la saison et de l'heure locale. Les résultats obtenus dans ce cadre nous permettent de tirer les conclusions suivantes.

1. D'une manière générale, le nombre d'irrégularités ionosphériques observées par GPS est maximal durant la phase de maximum d'activité solaire et que ce nombre tend vers une valeur minimale lorsque l'on s'approche du minimum solaire.
2. Par ailleurs, quelle que soit la phase du cycle solaire considérée, la distribution des irrégularités présente un comportement saisonnier. Plus précisément, les irrégularités sont plus nombreuses durant l'automne et l'hiver que durant le printemps et l'été.
3. Enfin, il existe une dépendance entre l'occurrence des irrégularités ionosphériques et l'heure locale : les irrégularités qui se produisent durant l'automne et l'hiver sont généralement observées durant la journée tandis que celles qui se produisent au printemps et en été sont nocturnes. Cette conclusion est en accord avec les récentes publications qui décrivent le comportement des *Medium-Scale TID's* (MSTID's) en fonction du temps (HERNÁNDEZ-PAJARES *et al.* 2006 & TSUGAWA *et al.* 2007). Étant donné la similitude qu'il existe entre les résultats de ces études et nos conclusions, on peut affirmer de manière réaliste que la majorité des irrégularités ionosphériques observées à Bruxelles sont des MSTID's.

La seconde partie de l'étude statistique consiste à caractériser l'amplitude des irrégularités ionosphériques et en extraire des conditions typiques (moyennes) et extrêmes de la variabilité ionosphérique pour une station de latitude moyenne. Les principales conclusions de cette analyse sont reprises ci-dessous.

1. L'analyse de la variabilité moyenne par saison confirme le fait que l'automne et l'hiver sont les saisons qui présentent l'activité ionosphérique la plus importante de l'année, quelle que soit la phase du cycle solaire considérée. La variabilité ionosphérique moyenne (*conditions typiques*) que l'on peut observer pour la station de Bruxelles se situe entre 0,024 TECU/min en 2006 et 0,034 TECU/min en 2002.
2. L'étude de la variabilité extrême entre 2001 et 2006 montre que les valeurs de RoTEC les plus importantes ont été observées durant les années de maximum d'activité solaire et sont dues à de graves tempêtes géomagnétiques. La valeur

extrême annuelle que l'on peut observer à Bruxelles (*conditions extrêmes*) se situe entre 1,197 TECU/min en 2006 et 9,839 TECU/min en 2003. Cette dernière constatation prouve que l'on peut observer des périodes présentant une variabilité ionosphérique importante en dehors des périodes de forte activité solaire. Cette conclusion s'avère importante pour les utilisateurs quotidiens des applications GNSS de haute précision puisque la probabilité de subir des dégradations importantes de la précision n'est pas nulle durant les périodes de minimum solaire.

A l'avenir, la méthode de détection des irrégularités présentée dans ce travail servira de base à des travaux ultérieurs. En effet, les mesures du RoTEC seront utilisées comme données de base pour l'analyse du comportement spatio-temporel des TID's grâce à la méthode de cross-corrélation étendue développée à l'IRM. Cette méthode se base sur les séries temporelles du RoTEC relatives à une multitude de stations appartenant à un réseau dense de récepteurs GPS (comme WALCORS ou FLEPOS). La méthode de cross-corrélation étudiée permet *in fine* d'identifier la direction et la vitesse de propagation des TID's qui ont été observées pour toutes les stations considérées. De plus, notre méthode permet d'extraire de manière simple la variabilité ionosphérique moyenne et extrême, ce qui permet d'isoler les jours présentant un intérêt ionosphérique. Les données relatives à ces jours particuliers peuvent alors être analysées à l'aide de méthodes basées sur les doubles différences par exemple. L'enjeu de ces analyses est de pouvoir mettre en relation l'erreur de positionnement subie parfois à son insu par l'utilisateur GNSS et les structures ionosphériques détectées. Dès lors, on peut envisager de développer une application destinée à fournir en temps réel à l'utilisateur GNSS une estimation quantitative de la dégradation de sa précision.

Bibliographie

- [1] Site internet de l'ESA : www.esa.int.
- [2] Site internet de la NASA : www.nasa.gov.
- [3] Site internet du *Solar Influences Data Analysis Center* (SIDC) : <http://sidc.oma.be>.
- [4] Site internet du *Canadian Space Geodesy Forum* (CANSPACE) : <http://gge.unb.ca/resources/canspace.html>.
- [5] BEER T. *Atmospheric waves*. Adam Hillger, London, 1974.
- [6] BEER T. *On atmospheric wave generation by the terminator*. *Planetary and Space Science*, 26 :185–188, 1978.
- [7] BERTIN F., TESTUD J., KERSLEY L., and REES P. *The meteorological jet stream as a source of medium scale gravity waves in the thermosphere : an experimental study*. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 40 :1161–1183, 1978.
- [8] CLETTE F. *L'atmosphère solaire, phénomènes d'activité et relations Soleil-Terre*. notes de cours, 2007. Université de Liège, Faculté des Sciences, inédit.
- [9] GERARD J-C. *Physique de l'atmosphère et de l'environnement terrestres*. notes de cours, 2007. Université de Liège, Faculté des Sciences, inédit.
- [10] GOPALSWAMY N., BARBIERI L., LU G., PLUNKETT S.P., and SKOUG R.M. *Introduction to the special section : Violent Sun-Earth connection events of October–November 2003*. *Geophysical Research Letters*, 32, 2005.
- [11] HERNÁNDEZ-PAJARES M., JUAN J.M., and SANZ J. *Medium-scale traveling ionospheric disturbances affecting GPS measurements : Spatial and temporal analysis*. *Journal of geophysical research*, 111, 2006.

- [12] HOCKE K. and SCHLEGEL K. *A review of atmospheric gravity waves and travelling ionospheric disturbances : 1982–1995. Annales Geophysicae*, 14 :917–940, 1996.
- [13] KAUFMANN P., RIZZO PIAZZA L., HENRIQUE FERNANDEZ J., and ROCHA DA SILVA M. *Solar flares not producing sudden phase advances. Journal of Geophysical Research*, 107, 2002.
- [14] KAUFMANN P., RIZZO PIAZZA L., SCHAAL R.E., and IACOMO JR. P. *A statistical analysis of soft X-rays effects in the low terrestrial ionosphere and some interferences on the nature of solar flares. Annales of Geophysics*, 34 :105–112, 1978.
- [15] LASTOVICKA J. and SMILAUER J. *Satellite Measurements of Solar X-Ray Flux and their Use for Interpretation of Sudden Ionospheric Disturbances. Pure and Applied Geophysics*, 98 :178–183, 1972.
- [16] LEJEUNE S. and WARNANT R. *A novel method for the quantitative assessment of the ionosphere effect on high accuracy GNSS applications which require ambiguity resolution. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2006. sous presse.
- [17] RADICELLA S.M., NAVA B., COÏSSON P., KERSLEY L., and BAILEY G.J. *Effects of gradients of the electron density on Earth-space communications. Annals of Geophysics*, 47 (suppl. to no. 2/3) :1227–1246, 2004.
- [18] SENGUPTA P.R. *Solar X-ray control of the D-region of the ionosphere. Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 42 :339–355, 1980.
- [19] SLEEWAGEN J.M. *Modeling, quality analysis and management of GPS data : an instrumental approach.* PhD thesis, Université Libre de Bruxelles, 1999. thèse de doctorat en Sciences Appliquées.
- [20] SOLOMON S.C., BAILEY S.M., and WOODS T.N. *Effects of solar soft X-rays on the lower ionosphere. Geophysical Research Letters*, 28 :2149–2152, 2001.
- [21] SPITS J. *Analyse, évaluation et ajustement du module de détection des sauts de cycles dans le software "GPS-TEC".* Technical report, Institut Royal Météorologique de Belgique, 2007.

- [22] TSUGAWA T., KOTAKE N., OTSUKA Y., and SAITO A. *Medium-scale traveling ionospheric disturbances observed by GPS receiver network in Japan : a short review. GPS Solutions*, 11 :139–144, 2007.
- [23] TSUGAWA T., SAITO A., OTSUKA Y., and YAMAMOTO M. *Damping of large-scale traveling ionospheric disturbances detected with GPS networks during the geomagnetic storm. Journal of Geophysical Research*, 108(A3), 2003.
- [24] TSURUTANI B.T. *et al.* *The October 28, 2003 extreme EUV solar flare and resultant extreme ionospheric effects : Comparison to other Halloween events and the Bastille Day event. Geophysical Research Letters*, 32, 2005.
- [25] WARNANT R. *Étude du comportement du Contenu Électronique Total et de ses irrégularités dans une région de latitude moyenne. Application aux calculs de positions relatives par le GPS.* PhD thesis, Université Catholique de Louvain, 1996. thèse de doctorat en Sciences.
- [26] WARNANT R. *Les systèmes de positionnement par satellites.* notes de cours, 2005. Université de Liège, Faculté des Sciences, inédit.
- [27] WARNANT R., KUTIEV I., MARINOV P., BAVIER M., and LEJEUNE S. *Ionospheric and geomagnetic conditions during periods of degraded GPS position accuracy : 1. Monitoring variability in TEC which degrades the accuracy of Real Time Kinematic GPS applications. Advances in Space Research*, 39(5) :875–880, 2007.
- [28] WARNANT R., KUTIEV I., MARINOV P., BAVIER M., and LEJEUNE S. *Ionospheric and geomagnetic conditions during periods of degraded GPS position accuracy : 2. RTK events during disturbed and quiet geomagnetic conditions. Advances in Space Research*, 39(5) :881–888, 2007.
- [29] WARNANT R. and POTTIAUX E. *The increase of the ionospheric activity as measured by GPS. Earth Planets Space*, 52 :1055–1060, 2000.
- [30] WAUTELET G. *Étude des TID's à l'aide des GNSS : influence de la géométrie de la constellation*, 2006. mémoire de licence en Géométrie et Géomatique.
- [31] WITHERS P., MENDILLO M., WROTEN J., RISHBETH H., HINSON D., and REINISCH. *Observations of the Effects of Solar Flares on Earth and Mars.* In *Fall AGU #SA53B-1165*, San Francisco, USA, 2005.