

N°d'ordre : 11/2015 – M/ST

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère D'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene

Faculté des Sciences de la Terre, Géographie et Aménagement du Territoire



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MAGISTERE**

EN : Sciences de la Terre

Spécialité : Géophysique

Par : BOUMELIT Zine laabidine

**Activité Solaire, Vent Solaire et Géomagnétisme
durant les Cycles Solaires N°23 et24**

Soutenu publiquement le : 14 /03 /2015, devant le jury composé de :

M^r M. SAIDI	Professeur (USTHB)Président
M^{me} N. ZAOURAR	Professeur (USTHB) Directrice de mémoire
M^{me} Y. YAHIAT	Professeur (USTHB)Examinatrice
M^r A.BOUDELLA	Professeur (USTHB) Examineur
M^r M.HAMOUDI	Professeur (USTHB)..... Examineur

PROMOTION 2014 / 2015

Remerciements

Tout d'abord je remercie *ALLAH* qui m'a aidé à réaliser ce mémoire.

J'exprime mon profonde reconnaissance et je remercie les plus profonds et les plus respectueux à ma promotrice Mme ZAOURAR qui m'a fait l'honneur de diriger mon travail ainsi qu'à pour tout le soutien et la facilité qu'elle m'a apporté afin que mon projet s'achève dans les meilleures conditions possibles.

Je tiens à exprimer tout mon respect et ma gratitude pour tous les enseignants de la FSTGAT

D'avoir fait de moi ce que je suis devenu aujourd'hui et en particulier: Mr Boudella, Mr Bounif, Mr Boughacha, Mr Hamoudi, Mme Yahiat, Mme Abdeslam et Mr Saidi .

A tous nos camarades et nos amis

Z.Boumelit

Sommaire

Introduction générale	1
-----------------------------	---

Chapitre I : Environnement spatial: Notion de base

Introduction	3
I.1. Les champs magnétiques solaires: de la photosphère a la couronne	3
I.1.1. Structure de soleil	3
I.1.2. Structure interne	4
I.1.3. Structure externe	4
I.2. Activité solaire et cycle des taches.....	5
I.2.1. Taches solaires.....	6
I.2.2. La dynamo solaire.....	7
I.2.3. Les manifestations des champs magnétiques solaires	8
I.2.3.a Les éruptions solaires	8
I.2.3.b Ejections des masses coronales	9
I.2.4. Particules solaires énergétiques	10
I.3. vent solaire et magnétosphère.....	11
I.3.1 Découverte du vent solaire.....	11
I.3.2 Les sources du vent solaire	12
a Les trous coronaux.....	12
b La couche neutre	13
I.3.3 Portrait de la magnétosphère.....	13
I.3.4 Interaction vent solaire magnétosphère	15
Les principaux courants	15
I.4. Le champ magnétique terrestre.....	17
I.4.1 La contribution interne	17
I.4.1.a Le champ principal B_p	17
I.4.1.b Le champ lithosphérique B_a	18
I.4.2. La contribution externe	18
I.4.3. Eléments du champ magnétique terrestre.....	19
I.5 Effets de l'activité solaire sur l'environnement terrestre.....	20

Chapitre II Données solaires et géomagnétiques.

II. 1. Données géomagnétiques du réseau InterMagnet.....	21
II.1.1 Observatoire de Tamanrasset	22
II.1.2 Variations transitoires du champ magnétique terrestre	23
II.1.3 Variations diurnes régulières du champ magnétique terrestre.....	24
II.1.4 Variations diurnes irrégulières du champ magnétique terrestre.....	24
II.2. Activité magnétique	24
II.2.1 Les débuts brusques d'orages.....	24
II. 2.2 Les indices géomagnétique.....	25
II.2.3 Indice magnétique équatorial Dst.....	26
II.3 Les paramètres du vent solaire	27
Ejection de masse coronale (CMEs)	28

Chapitre III Analyse des données géomagnétiques des cycles solaires N°23 et N°24

III.1 Les données solaires des cycles solaires N° 23 et N°24.....	31
III.2 Analyse morphologique de l'activité géomagnétique	32
III.3 Analyse multiéchelle des perturbations du champ magnétique.....	35
III.3.1 Analyse en ondelettes continue	35
III.3.2. Analyse des perturbations du champ magnétique du cycle N°23	36
III.3.2.1 Etude de l'année 2000 du cycle solaire N°23.....	36
III.3.2.2. Etude de l'année 2001 du cycle solaire N°23	37
III.3.2.3. Etude de l'année 2003 du cycle solaire N°23	38
III.3.3. Analyse des perturbations du champ magnétique du cycle N°24	40
III.3.3.1. Etude de l'année 2011 du cycle solaire N°24	40
III.3.3.2. Etude de l'année 2012 du cycle solaire N°24	42
Conclusion	45
Bibliographie	46

Introduction

Cette étude s'inscrit dans une approche globale du système Soleil- Terre. C'est une tentative pour relier à grande échelle l'activité solaire et le vent solaire au géomagnétisme et à l'ionosphère équatoriale.

L'interaction du vent solaire avec le champ magnétique terrestre crée dans la magnétosphère un courant électrique qui induit un déplacement (convection) du plasma de la queue magnétosphérique vers la terre. Au cours de ce mouvement, les particules magnétosphériques interagissent avec la composante de la haute atmosphère qu'on appelle ionosphère. L'utilisation des données d'observatoires pour étudier le champ magnétique est une idée fiable pour expliquer les courants électriques ionosphériques, magnétosphériques, les champs magnétiques qui en découlent ainsi que leurs différentes singularités (les orages, sous orages tempêtes éruptions...) et leurs variations (diurnes, journalières, séculaires...etc). Le champ magnétique terrestre est l'un des premiers phénomènes physiques auxquels s'est intéressé l'Homme depuis la découverte de la «pierre d'aimant». La prospection magnétique est également l'une des premières méthodes de la géophysique appliquée.

Dans notre travail on va s'intéresser, grâce aux données collectées par l'observatoire géomagnétique du réseau mondial Inter Magnet nous étudions les variations de la composante horizontale H du champ magnétique terrestre, la composante verticale Bz du champ magnétique interplanétaire pour relier à grande échelle l'activité solaire et le vent solaire aux variations transitoires du champ géomagnétique et la vitesse du vent solaire.

Le Chapitre 1

nous présentons toutes les notions nécessaires pour comprendre les interactions entre le soleil, le vent solaire, les éléments du champ magnétique terrestre et la magnétosphère.

Le chapitre 2

Nous présentons dans ce chapitre les données géomagnétiques, notamment la composante horizontale H du champ magnétique terrestre (CMT) ainsi que l'indice Dst relatifs aux cycles solaires N° 23 et N° 24. Nous passerons en revue également les événements solaires et les paramètres du vent solaire, la composante verticale Bz du champ magnétique interplanétaire et la vitesse du vent solaire Vx.

Le chapitre 3

Nous exploitons les données géomagnétiques de l'observatoire de Tamanrasset des deux derniers cycles solaires N°23 et N° 24. Le but de ce chapitre est de montrer l'influence des vents solaires lents et rapides sur l'activité géomagnétique. Nous montrons que les périodes les plus agitées sont caractérisées par des vents solaires rapides, accélérées par des éjections de CME provoquant d'importantes perturbations géomagnétiques

INTRODUCTION

Le soleil est un formidable réservoir d'énergie dont l'expression la plus spectaculaire reste les éjections de masse coronale ou (CME, signifiant Coronal Mass Ejection). Cette bulle de plasma, gaz composé de particules chargées positivement et négativement, peut atteindre des proportions gigantesques (typiquement quelques dizaines à centaines de rayons terrestres RT) et n'est pas sans conséquence pour l'environnement terrestre. Se déplaçant à une vitesse d'environ 100–1200 km/s, elle met typiquement 3 jours pour atteindre la Terre et son champ magnétique, provoquant des orages magnétiques.

Le soleil émet aussi en permanence un flux de plasma, appelé le vent solaire et se déplaçant en moyenne à 450 km/s. Le champ magnétique interplanétaire est la composante du champ magnétique solaire gelée dans le vent solaire et transporté dans le milieu interplanétaire.

Dans ce chapitre, nous présentons toutes les notions nécessaires pour comprendre les interactions entre le soleil et la magnétosphère.

I.1- LES CHAMPS MAGNETIQUES SOLAIRES : DE LA PHOTOSPHERE A LA COURONNE

I.1.1 structure du Soleil

Le soleil est une étoile qui se compose de 74% d'hydrogène, 24% d'hélium et d'une fraction d'éléments plus lourds (Lilensten & Bornarel, 2000). A lui seul, le soleil rassemble 99,8 % de la masse totale du système solaire. La puissance rayonnée totale est de l'ordre de $4 \cdot 10^{26}$ W.

Il tourne sur lui-même, n'étant pas un objet solide, il subit une rotation différentielle plus rapidement à l'équateur (25 jours) qu'aux pôles (35 jours).

Age : environ 4,6 milliards d'années.

Masse : $1,9891 \cdot 10^{30}$ kg.

Diamètre : 1 392 000 km.

Période de révolution : 25,4 jours à l'équateur 35 jours aux pôles

Inclinaison de l'axe de rotation / écliptique : $7^{\circ},25$

Vitesse à la latitude 0° : 7 008,17 km/h

Température : 151MK au centre 5800 K en surface 5 MK dans la couronne

Distance terre – soleil : environ 150 millions km.

Temps mis par la lumière pour atteindre la terre : 8mn 20s

I.1.2 Structure interne

Le noyau:

Plus de 50% de la masse du Soleil est contenue dans le noyau (Fig. I.1). Occupant environ un quart du rayon solaire, la densité est de l'ordre de $1,6 \cdot 10^5 \text{ kgm}^{-3}$, avec une température de l'ordre de 15 millions de degrés, ce qui permet les réactions de fusion nucléaire transformant l'hydrogène en hélium via le cycle proton-proton.

La zone radiative:

Cette zone s'étend jusqu'à $0.7 R_{\odot}$. L'énergie issue des réactions nucléaires est à environ 80% sous forme de radiation. Ces photons sont dans un environnement fortement ionisé. Ils vont fortement interagir avec les électrons libres ainsi qu'avec les ions. Ces photons sont d'abord absorbés, puis émis, puis de nouveau absorbés puis réémis.

La zone convective:

Le transport des photons via des mouvements de plasma est efficace pour évacuer l'énergie jusqu'à la surface. Des remontées de plasma chaud croisent du plasma froid qui redescend dans les couches plus profondes. Un photon ne met qu'une dizaine de jours pour traverser la zone convective. Ensuite le milieu est suffisamment peu dense pour que l'énergie puisse de nouveau être évacuée radiativement car le milieu devient optiquement mince et est sans interaction avec les photons, c'est l'atmosphère solaire. On définit la photosphère comme la surface du Soleil

I.1.3 Structure externe

La photosphère est la plus profonde des couches visibles et constitue la surface apparente, émettant la majeure partie du rayonnement. C'est donc la photosphère qui localise l'hydrogène neutre et constitue l'enveloppe de la structure solaire.

La chromosphère apparaît comme une couche hétérogène dont la température croît vers l'extérieur, elle a un éclat 100 fois plus faible que celui de la photosphère. Son rayonnement est caractérisé par des raies d'émission brillantes.

La couronne est la couche externe du Soleil. C'est un plasma de faible densité. Sa température augmente à nouveau et passe de 10 000 K à la base de la zone de transition à 2 000 000 K dans la couronne. Ce phénomène surprenant de "chauffage" de la couronne est encore à l'heure actuelle un des grands sujets de recherche en physique solaire.

L'héliosphère est une bulle dans le milieu interstellaire engendrée par les vents solaires. Cette bulle s'étend jusqu'à 100 UA du Soleil.

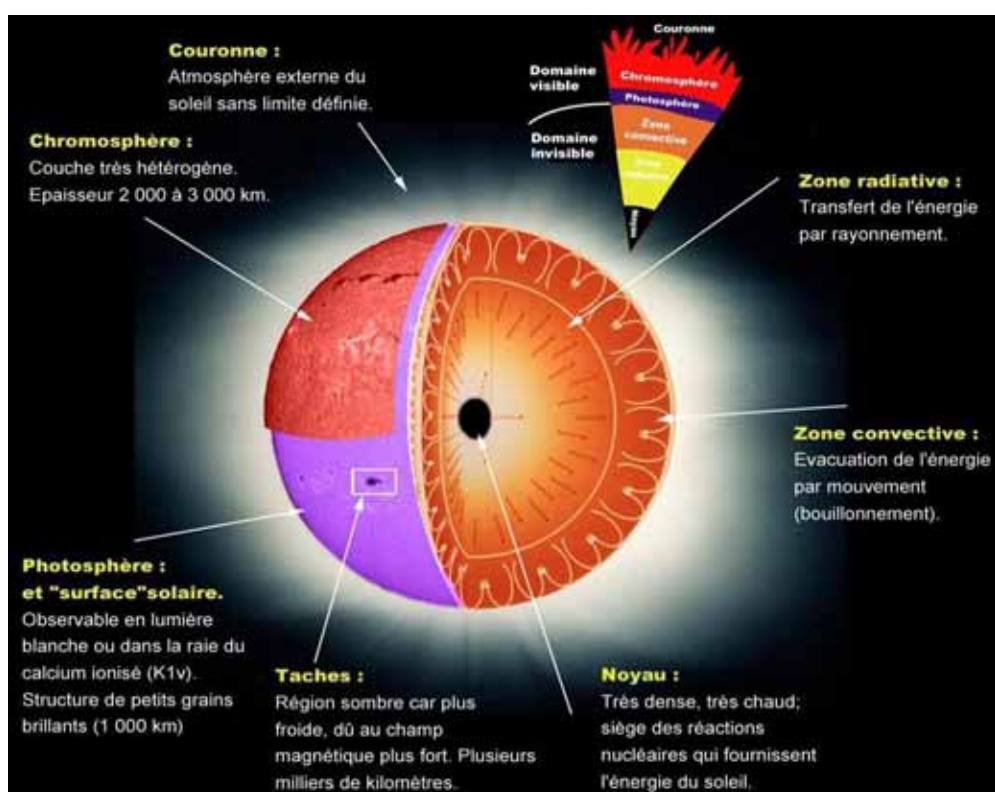


Fig. I.1 Structure du soleil (Photo Soho)

I.2 Activité solaire et cycle des taches

Un cycle solaire est une période pendant laquelle l'activité du soleil varie en reproduisant les mêmes phénomènes que pendant la période de même durée précédente (Fig. I.2). L'activité solaire est réglée par un cycle d'une période moyenne de 11,2 ans d'un maximum et peut varier entre 9 et 14 ans.

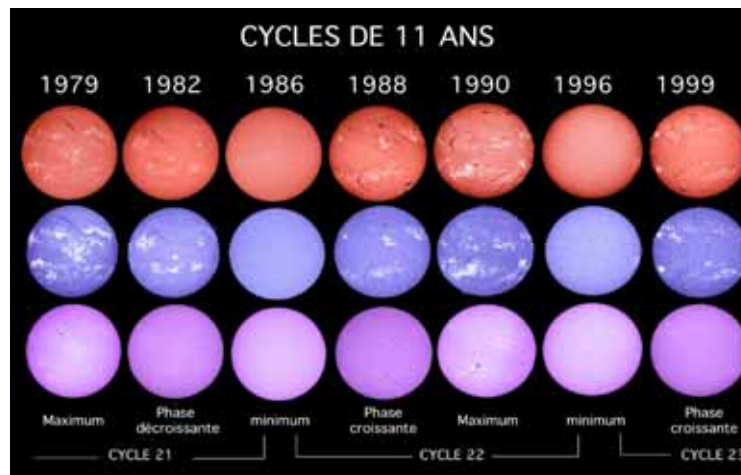


Fig. I.2 Le cycle de 11 ans observé à Meudon au spectrohéliographe.

I.2.1 Les taches solaires

Le soleil tourne sur lui-même, plus rapidement à l'équateur (25 jours) qu'aux pôles (35 jours). Le mouvement des particules (protons, électrons, atomes ionisés) produit un puissant champ magnétique à l'origine de phénomènes particuliers : les tâches solaires (Fig. I.3). Une tache solaire, zone sombre où le champ magnétique est vertical, entourée d'une région plus claire où le champ magnétique est plutôt horizontal à la surface du soleil, est caractérisée par une température inférieure à celle de son environnement proche et présentant une intense activité magnétique de l'ordre de 0,3 Tesla.

Les tâches facilement observées, apparaissent par paire de polarité opposée dans la photosphère. Elles sont formées de structures magnétiques alignées le long des parallèles (toroïdales). Une tache solaire a une durée de vie moyenne de deux semaines. L'ensemble des mesures réalisées indique un cycle principal dont la période varie entre 9 et 13 ans ce qui nous conduit à une moyenne statistique de 11,2 ans. Dans chaque période apparaît un maximum et un minimum d'activité. La surveillance de ces tâches est un excellent moyen pour mesurer l'activité solaire et prédire ses répercussions terrestres.

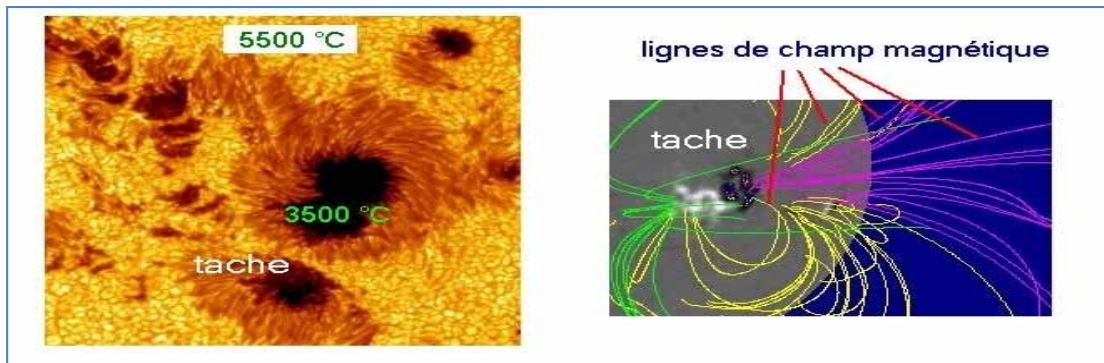


Fig. I.3 Les tâches solaires. (a) : zones sombres caractérisées par une température de 3500°C, inférieure à celle de son environnement proche de 5500°C. (b) Lignes de champ magnétique à configuration toroïdale.

I.2.2 La dynamo solaire

L'origine du champ magnétique solaire est causée par la rotation différentielle (le taux de rotation étant une fonction de la latitude et du rayon du Soleil). La rotation fonctionne comme une dynamo de l'électricité. C'est la rotation différentielle du Soleil en fonction de la latitude. La polarité s'inverse avec l'évolution des lignes de force qui s'enroulent suivant les mouvements tourbillonnaires de la convection de la rotation du Soleil (le soleil maintient sa vitesse de rotation sur lui-même). Sachant que sa vitesse va plus vite à l'équateur qu'au pôle, cette différence a donné naissance aux deux composantes du champ magnétique solaire, qui sont le champ poloïdal et le champ toroïdal (Fig.1.4).

Ainsi on a proposé le modèle de la composante dipolaire qui est responsable de 91,5% de l'activité géomagnétique. Seulement 8,5% de l'activité magnétique est lié au cycle des tâches solaires. Cela signifie que le cycle d'activité solaire est directement lié à l'évolution de ces deux composantes au cours du temps.

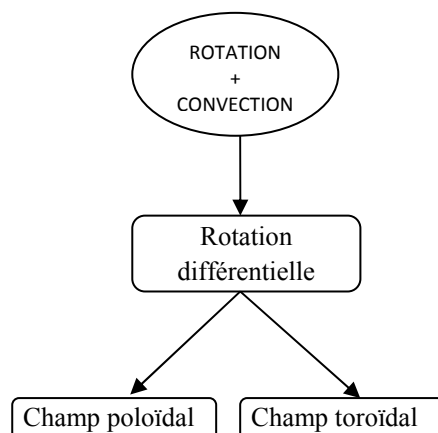


Fig. I.4 Fonctionnement de la dynamo-solaire

Quand le soleil tourne, chacune des lignes se rapproche l'une de l'autre en accroissant localement le champ magnétique. Lorsque l'intensité magnétique est assez élevée, faisant alors une boucle dont la base est constituée de deux taches de part et d'autre de l'équateur, considéré comme zone de production où la torsion est la plus élevée (Fig.1.5). Les champs magnétiques de ces régions se trouvent soumis aux courants de la matière, qui disparaissent peu à peu, en même temps, étirés par la rotation différentielle. Le champ de la dernière tâche, de polarité inversée plus proche du pôle, diffuse alors vers lui.

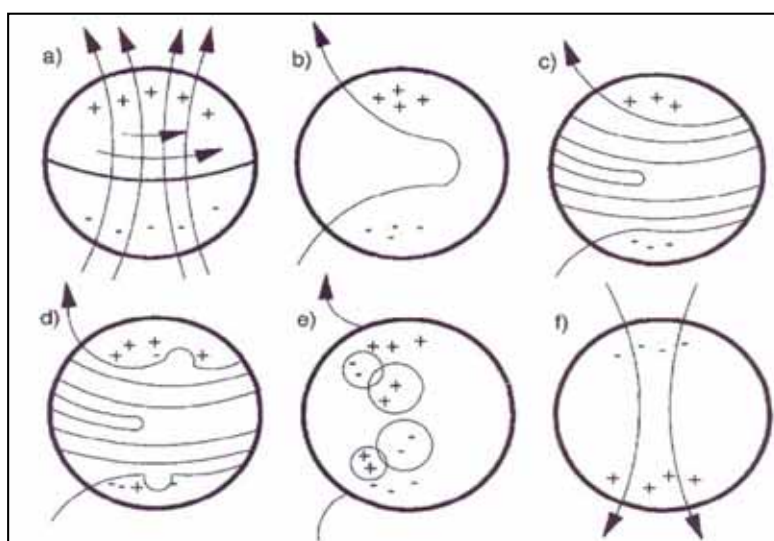


Fig. 1.5: Cycle solaire magnétique (Paterno, 1998)

I.2.3 Les manifestations des champs magnétiques solaires

Le Soleil est une étoile dynamique ! Son atmosphère est structurée par des champs magnétiques évolutifs dont les manifestations sont citées dans ce qui suit.

I.2.3 a Les éruptions solaires

Une éruption est un phénomène complexe, à la fois dans sa géométrie et dans sa séquence temporelle. Dans une région active, elle correspond à la libération brusque (en quelques minutes) d'une énergie importante (jusqu'à 10^{25} joules). Cette libération d'énergie donne lieu à l'échauffement du plasma (108 K) et à l'accélération de particules (électrons, protons, ions). On détecte alors des émissions intenses dans tout le domaine spectral, depuis les rayons X jusqu'aux ondes radioélectriques. Certaines éruptions particulièrement intenses donnent également lieu à des émissions de rayons gamma par interaction des noyaux accélérés avec

les couches de la basse atmosphère solaire. Electrons et protons accélérés peuvent s'échapper de l'atmosphère solaire et être détectés dans le milieu interplanétaire.

I.2.3 b Les éjections de masse coronale (CME)

A plus grande échelle, le Soleil éjecte vers le milieu interplanétaire des quantités importantes de plasma (Fig.1.6), avec une fréquence de plusieurs événements par jour en période de maximum d'activité solaire. Ces éjections qui renforcent le vent solaire permanent correspondent à la libération de « bulles » magnétiques formées par un processus de reconnexion au sommet de boucles magnétiques instables, à l'occasion d'éruptions ou d'instabilités de protubérances.

Les éjections de masse coronale (CME) transportent des milliards de tonnes de matière et perturbent fortement le milieu interplanétaire. Elles jouent donc un rôle important dans la météorologie solaire. Elles surviennent à toutes les phases du cycle solaire. On observe une CME par semaine au minimum solaire tandis qu'on a deux ou trois CMEs par jours au cours du maximum solaire. Toutes les CMEs ne sont pas dirigées vers la Terre, mais celles qui y parviennent sont susceptibles d'engendrer des orages magnétiques. Les CMEs jouent un rôle important dans la caractérisation de l'activité solaire, se manifestant par les ondes de choc (les CMEs suivent le cycle de tache).

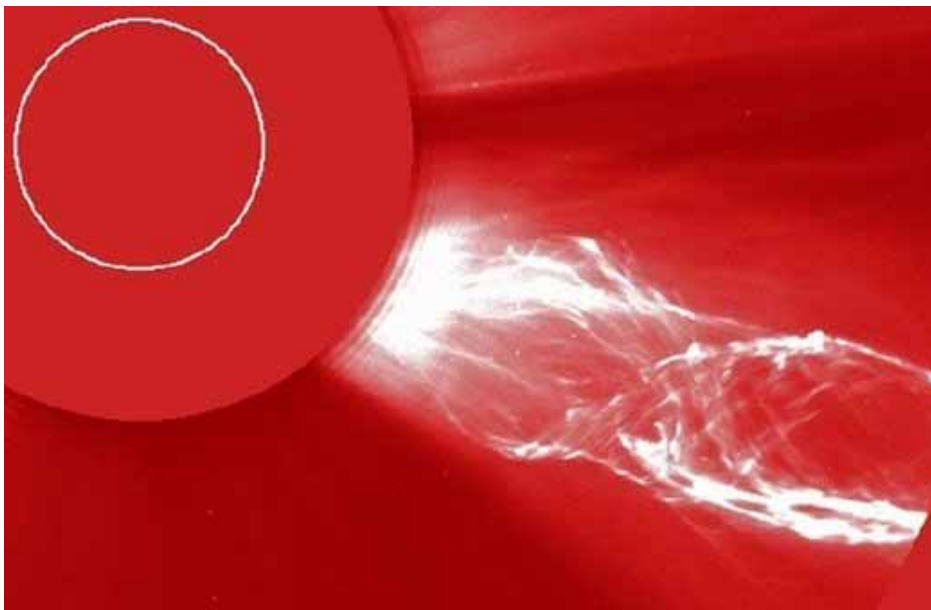


Fig.1.6 Ejection de masse coronale (Vue par le coronographe C2 de SOHO en lumière blanche)

I.2.4 Particules solaires énergétiques

Les particules solaires énergétiques (protons et électrons), appelés SPE (Solar Particle Events) sont des événements liés aux éruptions solaires (Fig. I.7). Ils se produisent préférentiellement en période de maximum solaire et un peu après (-2 ans, +4 ans). Les protons énergétiques (jusqu'à quelque centaines de MeV) arrivent en moins d'un jour au voisinage de la Terre, modifiant par un facteur important la population la plus énergétique, celle traversant la magnétosphère et ce pendant plusieurs jours, au maximum 15 jours du fait de la rotation solaire. Des électrons énergétiques sont également détectés durant ces périodes, mais la population de plus haute énergie est absente de la magnétosphère. A l'extérieur de la magnétosphère, ces particules très énergétiques sont évidemment présents, ce sont eux qui peuvent mettre en danger une mission spatiale lointaine, en route vers d'autres planètes ou vers la Lune.

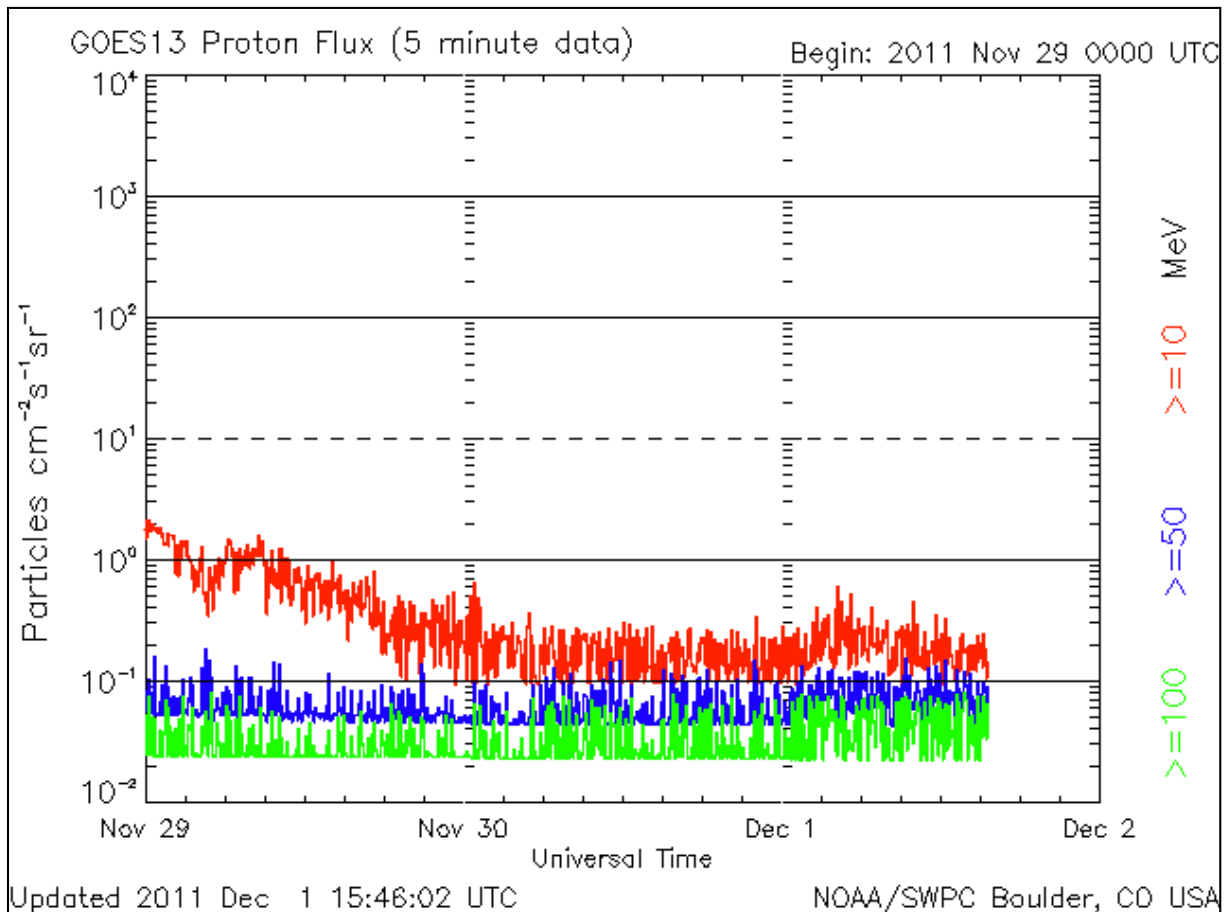


Fig.1.7 Exemple d'évènement à protons

I.3 VENT SOLAIRE ET MAGNETOSPHERE

1.3.1 Découverte du vent solaire

La conception de ce qui est défini actuellement comme le vent solaire s'est faite graduellement et bon nombre de ses manifestations n'ont pu être évaluées qu'à partir du début de la conquête spatiale. L'idée de matière s'échappant du Soleil sous forme de nuages ionisés est émise par certains chercheurs au début du siècle dernier.

Chapman et Ferraro (1931) proposent une théorie décrivant l'expansion de la couronne solaire et proposent qu'un nuage de plasma, éjecté du Soleil, ne peut pénétrer le champ géomagnétique et le contourne. Les premières théories de l'expansion solaire sont proposées par Parker (1958, 1959), qui montra que la couronne solaire n'est pas en équilibre hydrostatique mais en expansion permanente et libre de la matière dans l'espace, et ce à des vitesses supersoniques. Cette expansion représente le vent solaire.

Vers les années 1960, l'existence du vent solaire est vérifiée et grâce à l'analyse des données fournies par Pioneer I.

Sonett (1960), montre que le vent solaire transporte avec lui son propre champ magnétique, dit interplanétaire. Ce champ magnétique interplanétaire (CMI), dont l'existence était déjà supposée par Alfvén en 1957, est de l'ordre de 5 nT mais il peut être multiplié par 5 lors de fortes perturbations de l'activité solaire.

Globalement, le vent solaire est un flux permanent de plasma constitué par un mélange d'électrons, de protons, d'environ 5% d'hélium et de neutrinos, sous produits des réactions nucléaires du cœur du Soleil. Les caractéristiques du vent solaire sont très variables et suivent les cycles de l'activité solaire, celui des tâches solaires par exemple. En moyenne, la densité y est de 5 particules par cm^3 ; les protons atteignent des énergies de l'ordre du keV, l'énergie des électrons étant de l'ordre d'une dizaine d'eV. La vitesse du vent solaire est également très variable ; elle est comprise entre 200 km/s et 900 km/s avec une moyenne de 450 km/s au niveau de l'orbite terrestre.

Les variations des caractéristiques du vent solaire sont importantes et mènent à une diversité de phénomènes physiques qui se répercutent sur l'ensemble de l'environnement terrestre. En dehors des variations régulières, le vent solaire subit une vaste gamme de perturbations sporadiques, parfois très violentes. Les variations de vitesse, l'orientation du champ magnétique interplanétaire, les éruptions solaires (accompagnées d'éjection de matière coronale ou CME pour les plus importantes), les perturbations dues aux ondes de choc associées aux événements solaires ont des effets qui affectent la structure du vent solaire.

La mesure des différents paramètres du vent solaire permettent de comprendre les différentes variabilités du soleil et les influences du champ magnétique solaire sur le champ magnétique terrestre

I.3.2 Les sources du vent solaire

On trouve comme source du vent solaire

Les trous coronaux

Ils correspondent à des régions de champ magnétique unipolaire de faible intensité dont les lignes de forces s'ouvrent sur le milieu interplanétaire. Les trous coronaux constituent une source de vent solaire de grande vitesse émis sous forme de jets magnétisés dans le milieu interplanétaire (Fig.1.8). On distingue deux types de trous coronaux :

- Les trous coronaux polaires, situés près de chaque pôle du Soleil, qui émettent des jets de vent solaire de faible densité et de grande vitesse ($\sim 800\text{km/s}$). Ces trous apparaissent durant les deux ou trois années qui précèdent le minimum de tâches.
- Les trous coronaux équatoriaux, qui se manifestent entre le maximum de tâches et le début de l'apparition des jets d'origine polaire. Dans ces trous, le vent solaire est aussi émis sous forme de jets de grande vitesse. Leur durée de vie ne dépasse pas un an.

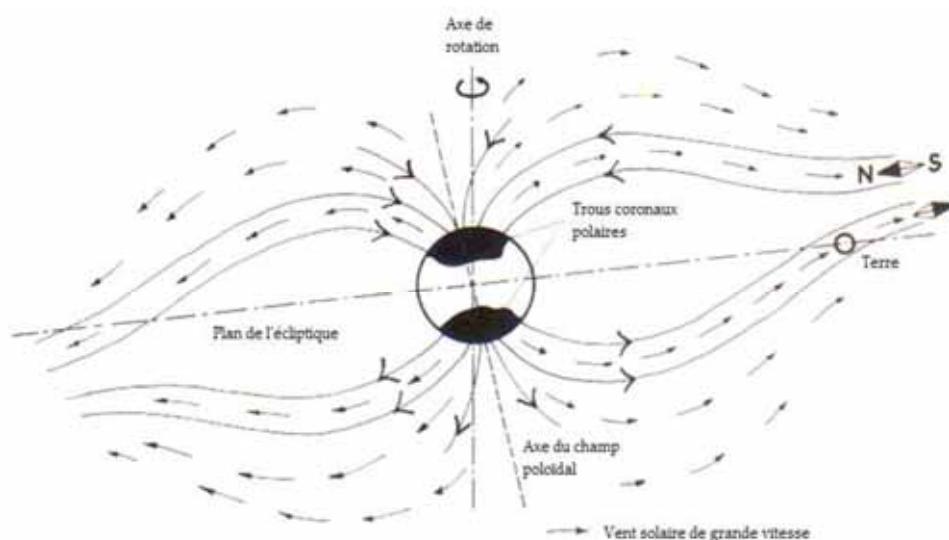


Fig. I.8: Schéma représentant les lignes de force du champ magnétique poloidal et la trajectoire du vent solaire rapide émanant des trous coronaux polaires

La couche neutre

Cette couche neutre est appelée aussi « heliosheet » est une couche, située au voisinage de l'équateur solaire. Cette couche est créée par l'inversion des polarités des lignes du champ magnétique poloidal qui émerge du soleil vers l'espace interplanétaire. Le vent émis par cette source est de faible vitesse ($\sim 300\text{km/s}$) et de forte densité (Fig.1.9).

La contribution de cette couche est dominante aux environs du minimum de taches du fait que les écoulements de vent solaire lent au niveau du plan équatorial avec une vitesse de 250 à 400 km/s et de forte densité.

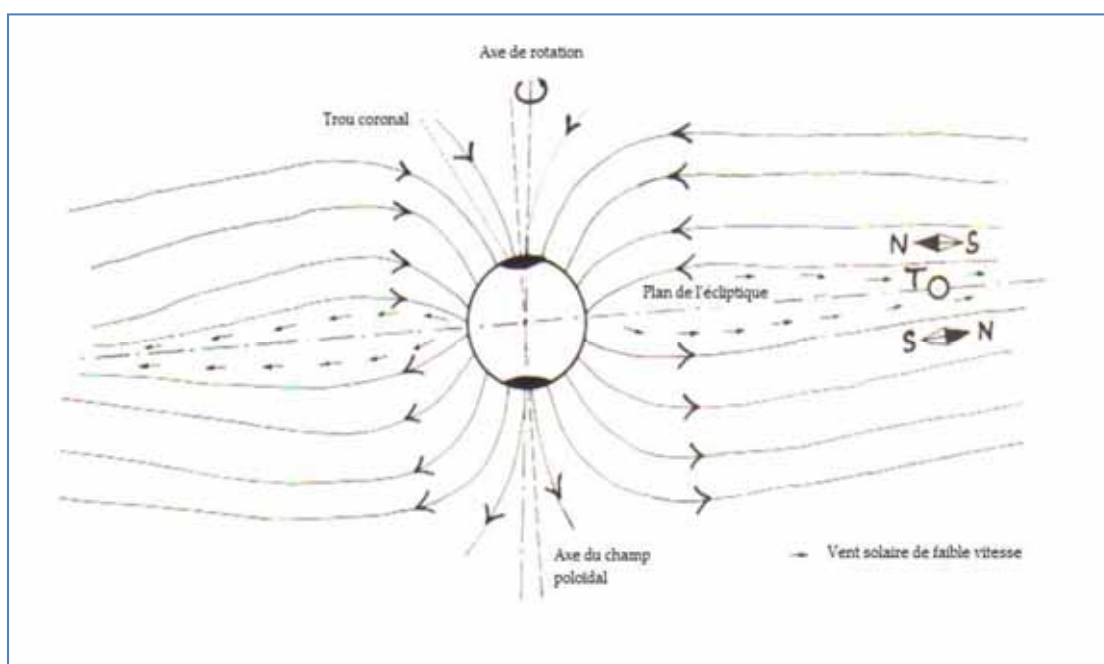


Fig. 1.9 Vent de faible vitesse et de forte densité

I.3.3 Portrait de la magnétosphère

La magnétosphère est une cavité née de l'interaction entre le vent solaire et le champ magnétique terrestre CMT. Deux mécanismes physiques sont évoqués pour expliquer ce transfert (*Mazaudier et Cohen, 1990*).

- l'interaction visqueuse entre le vent solaire et la magnétosphère (*Axford et Hines, 1961*).
- la reconnexion des champs magnétiques terrestre et interplanétaire (*Dungey, 1961*).

Formation de la magnétosphère terrestre

La collision du vent solaire avec le CMT établit un champ électrique à grand échelle dans la magnétosphère passant par les différentes zones (Fig. I.10)

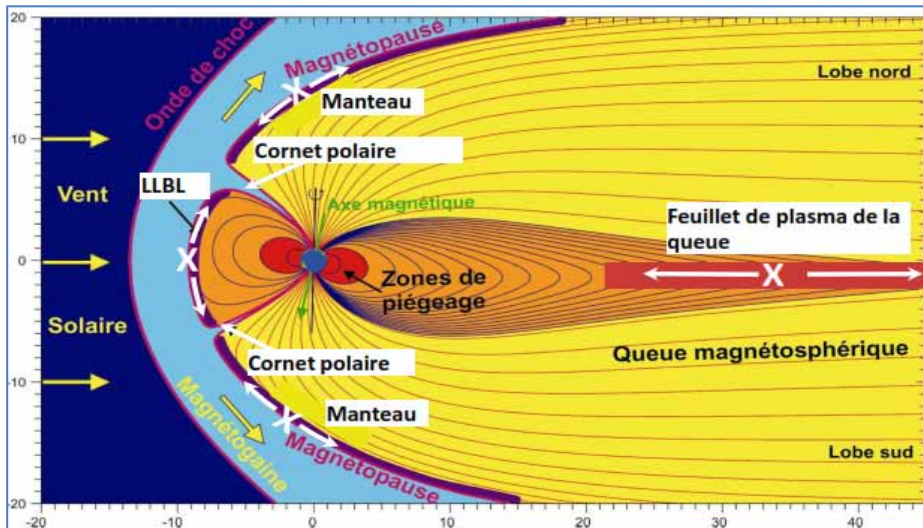


Fig. I.10 Portrait de la magnétosphère

- L'onde de choc : provoquée par l'interaction vent solaire CMT, elle est située à environ 3-4 rayons terrestres (R_T) en amont de la magnétosphère. Une fois l'onde de choc passée, le vent solaire est comprimé et chauffé et devient subsonique dans une région turbulente : la magnétogaine. Le vent solaire s'écoule vers le côté nuit en contournant la magnétopause puis se refroidit à nouveau. On estime qu'il retrouve ses caractéristiques initiales vers 100-200 R_T dans la queue. Entre temps, une partie du plasma solaire a pu pénétrer dans la magnétosphère.
- La position de la magnétopause est déterminée par l'équilibre entre l'énergie du plasma du vent solaire, dominée par sa composante cinétique et, d'autre part, l'énergie du plasma magnétosphérique dominée par sa composante magnétique. Sa position est extrêmement variable car sujette aux variations du vent solaire, elle se situe à environ 13 R_T en période de faible activité et peut s'approcher jusqu'à 6 R_T lors d'événements solaires importants.
- Les cornets polaires, sont des points neutres topologiques situés au-dessus des pôles magnétiques où s'annule le CMT. Ils séparent les lignes de force fermées du côté jour des lignes fermées qui s'étirent du côté nuit. Liés à des lignes de champ non connectées, les cornets polaires s'ouvrent sur la magnétogaine et permettent ainsi l'entrée directe du plasma du vent solaire, du côté jour, depuis la magnétogaine dans l'atmosphère (Reiff et al., 1977). La position en latitude et temps magnétique local, ainsi que l'extension spatiale des cornets polaires est contrôlée par le CMI
- La queue de plasma est une région instable de piégeage sur laquelle les particules chargées suivent les lignes de force du CMT B_T , dans les échanges avec les régions voisines, surtout les cornets polaires.

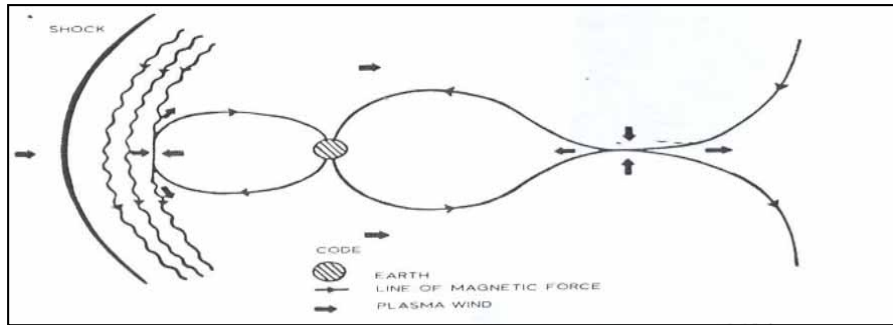


Fig. I.11 (a) Interaction visqueuse entre les vents solaires et la magnétosphère (Axford and Hines, 1961)

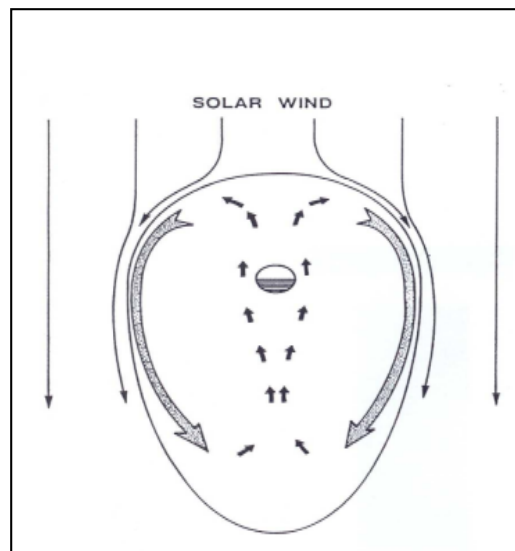


Fig. I.11 (b) Mécanisme de reconnexion entre CMI-CMT (Dungey, 1961)

I.3.4 Interaction vent solaire magnétosphère

Les principaux courants

Différents courants apparaissent dans la magnétosphère et l'ionosphère. Ces courants sont responsables des perturbations magnétiques dont les plus dramatiques sont les orages magnétiques.

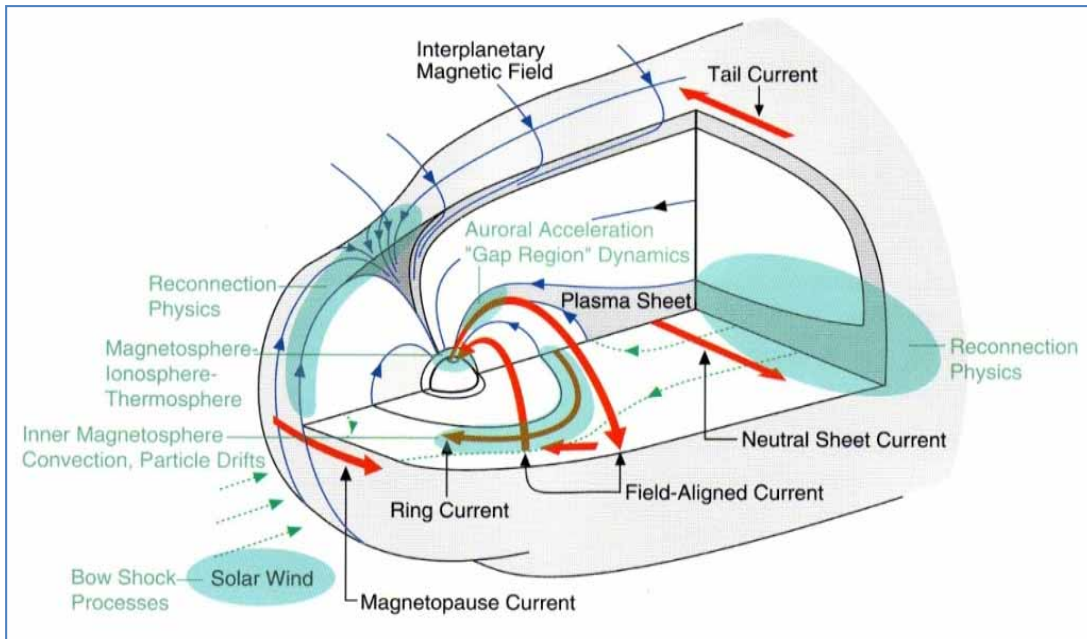


Fig. I. 12 Configuration des courants dans la magnétosphère.(Kivelson et russell ,1995)

- **Courant de magnétopause** : lors du choc, la déviation des particules par le champ terrestre implique un excès d'électrons du côté matin et un excès de protons du côté soir produisant un courant du matin vers le soir (Chapman-Ferraro). Il se ferme par un courant similaire qui traverse la queue magnétosphérique de l'aube vers le crépuscule (courant de queue)

- **Les courants alignés** : ce sont des courants de grande échelle circulant le long des lignes de champ magnétique (Birkeland, 1800-1900). Deux systèmes de courants alignés :

- Les courants alignés de région-1. associés aux lignes de champ magnétique ouvertes dans le vent solaire. Ils entrent dans l'ionosphère côté matin et en sortent côté soir.
- Les courants alignés de région-2 associés aux lignes de champ magnétique fermées (c.-à-d. connectées à la Terre de part et d'autre de l'équateur magnétique). Ils entrent dans l'ionosphère côté soir et en sortent côté matin

- **Courant annulaire** : Dans la magnétosphère interne, le plasma chaud subit les dérives de courbure et de gradient. Electrons et ions dérivent en sens opposé et engendrent le courant annulaire, circulant tout autour de la Terre. Ce courant est plus intense côté nuit, car des particules sont injectées depuis la queue de la magnétosphère.

I.4 LE CHAMP MAGNETIQUE TERRESTRE

A la surface de la Terre le champ magnétique terrestre total résulte de la superposition d'un champ interne, un champ externe et un champ induit (Alexandrescu, 1996). Son expression est donnée par :

$$\mathbf{B}_{\text{total}} = \mathbf{B}_{\text{interne}} + \mathbf{B}_{\text{externe}} + \mathbf{B}_{\text{induit}}$$

I.4.1 La contribution interne

- Le champ principal B_p :

également appelé "champ nucléaire" représente en moyenne 99% de l'intensité du champ total (Le Mouél, 1976) .Il est engendré par les mouvements animant la partie fluide, électriquement conductrice du noyau de la terre, composée principalement de fer ou un alliage de fer et de nickel ce processus , appelé dynamo, permet de transformer de l'énergie mécanique en énergie magnétique (Campbell, 1997 ; Merrill et al .,1998) .

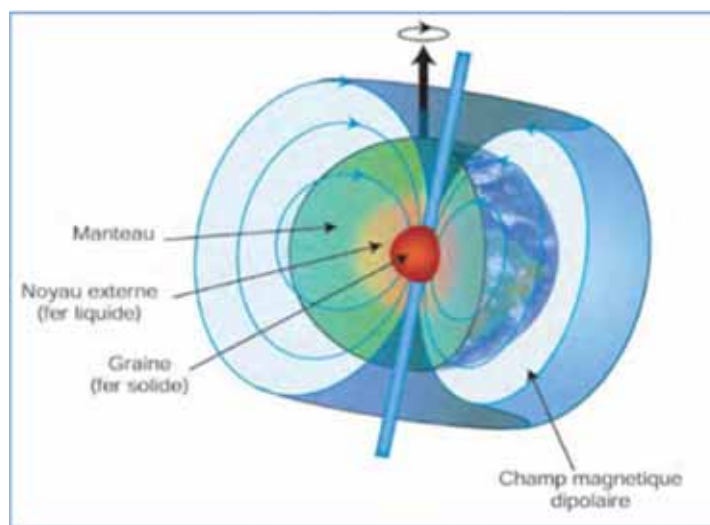


Fig. I. 13: La dynamo interne générée par les mouvements du noyau liquide, à l'origine du champ géomagnétique principal. Les lignes (bleues) du champ magnétique ont une structure grossièrement dipolaire.

- Le champ lithosphérique B_a

Encore appelé champ d'anomalies, a ses sources dans la croûte terrestre et le manteau supérieur (source interne) ; ses anomalies peuvent atteindre des centaines des nano Tesla à la surface de la terre

I.4. 2 La contribution externe

Le champ externe B_e est engendré par des courants électriques circulants dans l'ionosphère et la magnétosphère. Au delà d'une altitude de quelque 100 km. Les variations transitoires du champ magnétique terrestre, représentées par B_e , correspondent aux effets magnétiques des systèmes de courants circulant dans l'ionosphère et la magnétosphère (champ d'origine externe). Le caractère transitoire de B_e induit des courants dans le lithospère, à l'origine du champ induit B_{ind} . Les amplitudes des composantes B_e et B_{ind} sont de l'ordre de 10 à 1000 nT. Les variations transitoires du champ magnétique terrestre dues aux sources extérieures présentent des variations à des échelles de temps variant de la fraction de seconde au cycle solaire (22 ans). $B = B_e + B_{ind}$. Les courants électriques à l'origine de ces variations transitoires sont générés par deux actions dynamos, à savoir "la dynamo vents solaires/magnétosphère" et "la dynamo ionosphérique".

I.4.3 Eléments du champ magnétique terrestre

Les différents éléments de champ sont représentés dans la figure ci –dessous (Fig. 1. 14).

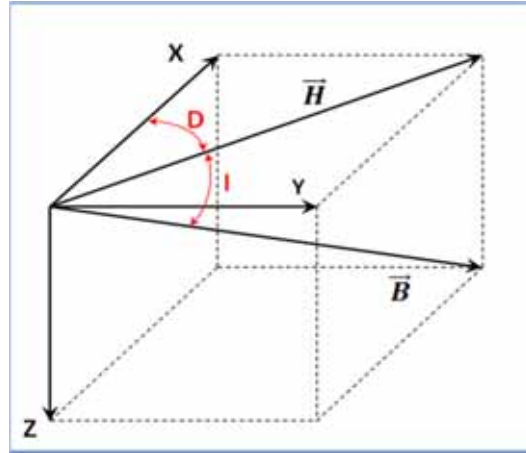


Fig. 1. 14. Les éléments du champ magnétique terrestre

Où :

X - composant nord du champ magnétique dans la direction Nord géographique

Y - composant du champ magnétique dans la direction Est géographique.

Z - composant verticale pointant vers le centre **de la terre**.

H - intensité horizontale du champ magnétique. $H = \sqrt{X^2 + Y^2}$

D - angle de déclinaison, angle entre le plan méridien nord géographique et le nord magnétique

$$D = \tan^{-1}\left(\frac{Y}{X}\right)$$

I - Angle d'inclinaison. L'angle entre B et le plan horizontal $I = \tan^{-1}\left(\frac{Z}{H}\right)$

B- L'intensité totale du CMT

$$B = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$$

D et I en Degré (°), alors que les autres éléments sont exprimés en nano-Tesla (nT).

L'intensité du champ magnétique terrestre varie entre ~30 000 nT (à l'équateur) et ~ 70000 nT (aux pôles).

I.5. EFFETS DE L'ACTIVITE SOLAIRE SUR L'ENVIRONNEMENT TERRESTRE

L'activité solaire produit trois types de phénomènes pouvant interagir avec l'environnement terrestre:

- des ondes électromagnétiques (ou des photons), qui effectuent le trajet soleil- terre en 8 minutes,
- le vent solaire, dont l'onde de choc atteint la terre en 2 jours,
- des protons énergétiques produits par les éruptions solaires atteignent la terre en une heure.

Les ondes électromagnétiques ou de manière équivalente, les photons, sont responsables de l'ionisation de la haute atmosphère et de la création de l'ionosphère. Les perturbations de l'ionosphère sont responsables des perturbations des communications radio. Les ondes électromagnétiques sont également responsables du chauffage de l'atmosphère, (qui a pour conséquence un freinage accru des satellites).

Le vent solaire

En interagissant avec la magnétosphère terrestre, induit des variations du champ magnétique terrestre : c'est l'activité géomagnétique. Les particules du vent solaire interagissant avec la magnétosphère terrestre subissent un trajet compliqué. Elles précipitent sur la terre au niveau des régions aurorales (régions où peuvent s'observer les aurores boréales) après avoir été accélérées dans la queue de la magnétosphère. Elles sont responsables d'une charge importante des satellites.

Les protons énergétiques

Ils créent par interaction avec l'ionosphère des particules secondaires qui contribuent à perturber l'état de l'ionosphère. Par ailleurs, ces protons énergétiques produisent des inhomogénéités dans le plasma interplanétaire qui diffusent les rayons cosmiques (particules cosmiques de très forte énergie, de l'ordre de 50000 MeV) protégeant de ce fait la terre et son environnement de ces rayonnements.

INTRODUCTION

Le Soleil influence tous les paramètres géophysiques dans l'environnement terrestre suivant des processus physiques variés comme nous l'avons décrit dans le premier chapitre. Pour mieux exploiter les données régissant les relations Soleil- Terre, il faut trouver les processus physiques qui étaient actifs dans le système Terre Soleil lorsque les données ont été acquises. Cette constatation nous conduit à proposer une approche dans laquelle les processus physiques traversant les différents milieux du soleil à la terre sont couplés.

Nous présentons dans ce chapitre les données géomagnétiques, notamment la composante horizontale H du champ magnétique terrestre (CMT) ainsi que l'indice Dst relatifs aux cycles solaires N° 23 et N° 24. Nous passerons en revue également les événements solaires et les paramètres du vent solaire

II. 1.DONNEES GEOMAGNETIQUE DU RESEAU INTERMAGNET

InterMagnet signifie International Real-time Magnetic Observatory Network, un réseau global d'observatoires magnétiques, transmettant leurs données en temps quasi-réel. Ce réseau (www.intermagnet.org/apps/dl_data_def_f.php) fournit des données et des informations relatives aux observatoires magnétiques.

Ce réseau tire son origine de discussions tenues à l'occasion de l'Atelier international sur les instruments des Observatoires Magnétiques à Ottawa (Canada) en aout 1986 et à Chambon-La-Forêt (France) en mai 1987.

InterMagnet fournit un support technique pour la maintenance et la mise à niveau des données. Cet organisme participe souvent à la création de nouveaux observatoires.

Tous ces observatoires envoient leurs données aux Centre d'informations géomagnétiques (GIN). La figure II.1 présente la distribution des observatoires magnétique du réseau InterMagnet à travers le monde.

Dans ce travail, nous avons exploité les données géomagnétiques relatives aux cycles solaires N° 23 et N° 24, enregistrées au niveau de l'observatoire de Tamanrasset.

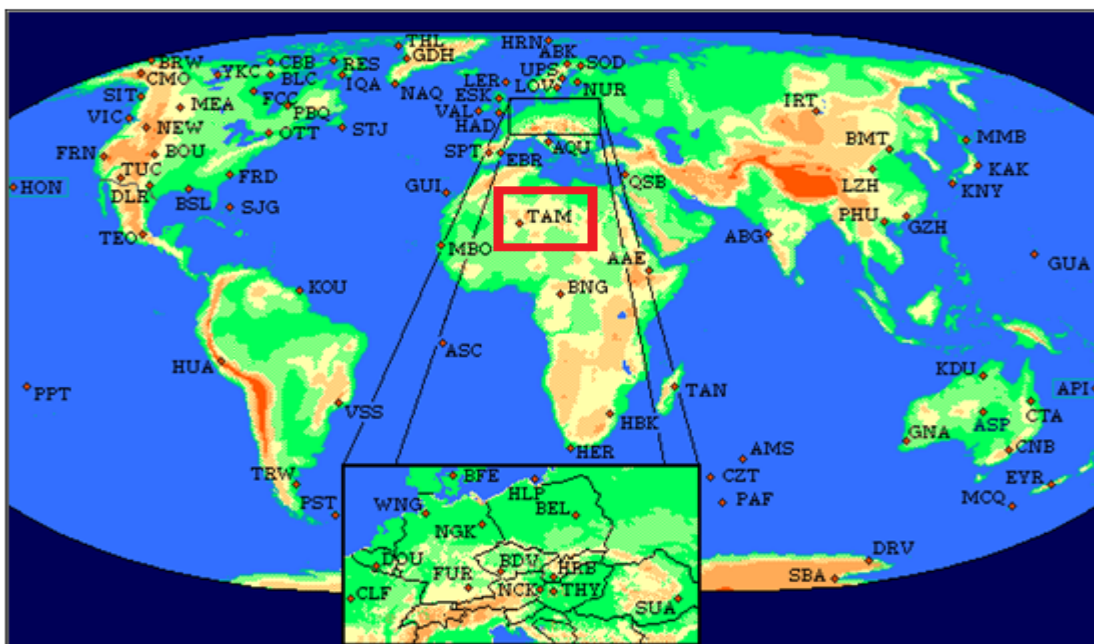


Fig. II.1 : Carte de la distribution des observatoires magnétiques du réseau Intermagnet (document Intermagnet)

II.1.1 Observatoire de Tamanrasset

L'Observatoire national de Tamanrasset a été inauguré le 14 janvier 1932, structure à laquelle il restera rattaché et qui est devenue aujourd'hui Le Centre de Recherche en Astronomie Astrophysique et Géophysique (CRAAG).

La création de l'Observatoire de Tamanrasset (sous le code IAGA : TAM) s'est inscrite dans le projet mondial de mise en place d'observatoires magnétiques (exemple Bangui,...) pour une meilleure connaissance du champ magnétique terrestre. L'observatoire a eu donc pour mission essentielle à sa création, de contribuer à la connaissance du champ magnétique terrestre à la connaissance de la géologie du Hoggar et à la connaissance des potentialités minières de la région par investigations géophysiques.

Depuis l'année 1993, la station magnétique de Tamanrasset a connu une amélioration notable avec le passage de l'acquisition analogique à l'acquisition numérique avec son intégration au réseau magnétique mondial InterMagnet en coopération avec l'institut de physique du globe de Paris.

Au début de l'année prochaine, cette station passera de l'acquisition minute à l'acquisition seconde des données géomagnétiques, ce qui ouvrira plusieurs domaines d'études et de recherche supplémentaires. Cette résolution permettra en particulier, une meilleure modélisation des courants ionosphériques.



Fig. II. 2 Observatoire de Tamanrasset (Document CRAAG)

L'observatoire de Tamanrasset est situé à une latitude de $22,7925^{\circ}\text{N}$, avec une longitude de $5,532^{\circ}\text{E}$ et une altitude de 1373 m dans le sud de l'Algérie. De longues séries magnétiques ont été acquises depuis 1930 grâce aux différents instruments magnétiques. Aujourd'hui, on considère la Station de Tamanrasset comme référence pour l'établissement de la carte magnétique de l'Algérie. En raison de sa situation aux moyennes latitudes, nous avons utilisé en plus des données du CMT, l'indice magnétique Dst, lié à la variation du courant magnétosphérique annulaire.

II.1.2 Variations transitoires du champ magnétique terrestre

Toutes les variations rapides du champ magnétique terrestre sont d'origines externes. Au fur et à mesure des recherches, l'environnement de la terre se révèle de plus en plus complexe.

Au-dessus de l'atmosphère terrestre, des mouvements des particules chargées sont associées à des courants à hautes latitudes et, par suite, à des champs magnétiques. Le vent solaire interagit violemment avec le champ magnétique terrestre dans les régions éloignées de la terre. On parle à cet égard d'activité géomagnétique ou, selon les cas, d'orages magnétiques. On voit ainsi que le champ externe produit à la surface de la terre des fluctuations couvrant un spectre quasi continu, depuis les périodes les plus courtes (moins d'une seconde) aux périodes les plus longues. Les variations transitoires (Amari et al. 1999;

Dubois & Diament, 1997) du champ magnétique observées à la surface de la Terre résultent des courants externes circulant dans l'ionosphère et la magnétosphère.

II.1.3 Variations diurnes régulières du champ magnétique terrestre

Les variations régulières du champ magnétique terrestre sont associées à des sources permanentes trouvant leur origine dans l'activité solaire. La principale d'entre elles étant les courants atmosphériques, qui résultent du chauffage et de l'ionisation de l'atmosphère côté jour. Ces sources sont toujours présentes, que la situation magnétique soit calme ou agitée. Les variations régulières ne sont observées seules que durant les périodes calmes du point de vue magnétique. Leurs forme et leurs position sont à peu près constantes dans un système de référence fixe par rapport au Soleil, mais leurs variabilité jour à jour n'est cependant pas négligeable.

II.1.4 Variations diurnes irrégulières du champ magnétique terrestre

Les variations irrégulières du champ magnétique présentent une grande variabilité de forme et d'amplitude et apparaissent irrégulièrement au cours du temps. Elles sont principalement provoquées par l'interaction du vent solaire et le champ magnétique terrestre. Cette interaction se traduit par l'apparition d'orages et de sous orages provoquant des fluctuations principalement sur la composante horizontale H du champ magnétique terrestre. Les caractéristiques morphologiques majeures de ces variations présentent :

- des constantes de temps caractéristiques qui varient généralement de quelques minutes à quelques heures.
- une forte intensité observée dans les latitudes géomagnétiques comprises entre 60 et 75° (Ovale auroral).

Des fluctuations de plus hautes fréquences et les variations rapides font aussi partie des variations géomagnétiques transitoires. C'est en particulier le cas des orages à début brusque qui sont des impulsions brutales suivies par un orage géomagnétique, ou par un changement de l'activité magnétique durant une heure environ.

II.2. Activité magnétique

II.2.1 Les débuts brusques d'orages

Les débuts brusques d'orages magnétiques appelés SSC (Sudden Storm Commencement) sont des événements très importants dans la classification de l'activité géomagnétique. En

effet, un SSC correspond à un changement brusque, visible par une augmentation de la composante horizontale H du CMT suivi d'un orage magnétique ou d'une augmentation de l'activité magnétique qui dure moins une heure. La connaissance exacte des dates de SSC permet de meilleures estimations de la signature magnétique des différentes éruptions solaires et des éjections de masses coronales (CMEs) dans le milieu interplanétaire et dans l'environnement proche de la Terre. La figure II. 3 présente une page permettant l'acquisition des dates de (SSC).

Les dates de début brusque d'orages (SSC) traduisent les variations rapides du champ géomagnétique dues aux éjections de masses coronales pour l'identification des jours de chocs. Ces dates de SSC sont fournies par le site suivant : <http://isgi.latmos.ipsl.fr/>



The screenshot shows the ISGI website interface. At the top, there are logos for IAGA, SIIG (Service International des Indices Géomagnétiques), ISGI (ISGI Publication Office), and FAGS. The main heading is "DATA". Below this, there is a section "Description of indices:" with a list of indices: [aa, Kpa](#), [am, Kpm](#), [Dst](#), [AE](#), [ssc](#), [Sfe](#), [Quiet days](#), [Kp](#), and [PC](#). A button labeled "Download the corresponding yearly file" is present. Below this is a section "Download The Monthly File:" with the instruction "Select the index:". There are two columns of radio buttons for selecting an index: aa, Kpa (since 1868), am, Kpm (since 1959), Dst (since 1957), AU, AE, AL (since 1957), ssc (since 1868), Sfe (since 1953, not currently available), Quiet days (since 1932), and Kp (since 1932). Below the radio buttons is a text input field with the label "Enter the begin date at MMYYYY format:" and a "submit" button next to it, and a "reset" button below it.

Fig. II. 3 représentations de l'acquisition des dates des SSC

II. 2.2 Les indices géomagnétiques

L'étude du champ magnétique terrestre présente un système physique complexe, en ce qu'elle intègre les effets des différents courants électriques existant dans le système Soleil-Terre. Pour rendre plus commode l'analyse des variations du champ magnétique terrestre des scientifiques ont élaboré de nombreux indices.

Les indices d'activité aurorale AU (Auroral Electrojet Est) et AL (Auroral électrojet Ouest) sont utilisés pour l'étude des courants annulaires. Pour connaître le niveau principal de l'activité magnétique nous avons les indices Km, Am, Kp et Ap. Pour comprendre l'impact de l'activité solaire sur l'activité géomagnétique, on utilise l'indice Aa.

Cette série de données a commencé à être homogénéisée depuis 1868 pour aa (amplitudes déduites de l'indice k pour deux stations antipodales subaurorales), 1932 pour Kp, et 1959 pour Am (amplitudes déduites de l'indice k pour chaque secteur de longitude)(Menvielle, 1998). Le service international des indices géomagnétiques (I.S.G.I.) est chargé de l'élaboration et de la diffusion de cette base de données à partir des mesures d'observatoires géomagnétiques qui sont, selon leurs positions à la surface de la terre, utilisées dans le calcul des indices (Chambodut, 2004).

II. 2 .3 Indice magnétique équatorial Dst.

L'indice Dst « Disturbance Storm Time » permet d'étudier les courants magnétosphériques, notamment le courant de Chapman Ferraro et le courant annulaire. Le Dst est exprimé en nT et est basé sur la valeur moyenne de la composante horizontale H du CMT mesurée d'heure en heure dans quatre observatoires géomagnétiques proches de l'équateur. Cet indice est utilisé pour la détection du commencement des orages magnétiques (Mayaud, 1980, Menvielle, 1991). La valeur négative du Dst est la signature de l'amplitude d'un orage magnétique et représente la variation du courant magnétosphérique -annulaire qui circule dans le plan équatorial de la magnétosphère. Le Dst est calculé suivant la relation :

$$Dst = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{H_n - H_q}{\cos \phi_n}$$

Où

H_n : est la composante horizontale du CMT B mesurée à la station n

H_q : caractérise un jour calme de référence.

N : nombre de stations utilisées

Φ_n : latitude magnétique de la station n

L'indice magnétique équatorial Dst permet de définir l'intensité de l'orage magnétique.

Les orages violents Dst $-400\text{nT} \leq \text{Dst} \leq -200\text{ nT}$

Les orages intenses l'indice $-200\text{nT} \leq \text{Dst} \leq -100\text{ nT}$

Les orages modérés l'indice $-100\text{nT} \leq \text{Dst} \leq -50\text{nT}$


Les orages faibles l'indice $-50\text{ nT} \leq \text{Dst} \leq -30\text{nT}$.

Dans la dernière partie de ce chapitre, nous décrivons successivement les sources de perturbations du CMT, provoquées par l'interaction Soleil-Terre.

II. 3 LES PARAMETRES DU VENT SOLAIRE

Le vent solaire s'écoule continuellement autour de la magnétosphère terrestre à la vitesse moyenne de 400 km/s, générant un champ électrique dynamo E_y de grande échelle, exprimé par la relation ($E_y = V_x \cdot B_z$) avec V_x la vitesse du vent solaire et B_z la composante verticale du champ magnétique interplanétaire. Nous montrons au chapitre III.3 que lorsque B_z se dirige vers le sud, nous observons alors une très forte reconnexion avec le champ magnétique terrestre (CMT).

Depuis 1962, une base de données des paramètres du vent solaire constituée à partir de la compilation de données prises à bord de plusieurs satellites est disponible sur le site <http://omniweb.gsfc.nasa.gov/ow.html>. Ce site permet l'obtention des différents paramètres du vent solaire (Fig. II.4).



The screenshot shows the OMNIWeb interface with the following elements:

- Header: NASA logo, OMNIWeb title, and SPDF+Goddard Space Flight Center.
- Navigation menu: About, Browse, FTP, Input-Data, News, Feedback.
- Section: Interface to produce plots, listings or output files from OMNI 2.
- Link: How to get data from command line.
- Radio buttons: Plot data, List data, Create file (file?).
- Section: Select resolution.
- Radio buttons: Hourly averaged, Daily averaged, 27-day averaged.
- Text: Click here to specify Y scale ranges for data plots (optional).
- Text: Click here to get time spans for individual parameters.
- Section: Enter start and stop dates (Use yyyyddd or yyyyymmdd).
- Form fields: Start 20050101, Stop 20050301.
- Section: Plasma.
- Checkboxes for parameters:
 - Proton Temperature, K
 - Proton Density, n/cc
 - Flow Speed, km/sec
 - Flow Longitude, deg.
 - Flow Latitude, deg.
 - Alpha/Proton Density Ratio
 - Flow Pressure, nPa
 - Sigma-T
 - Sigma-Np
 - Sigma-V
 - Sigma-Flow-Longitude
 - Sigma-Flow-Latitude
 - Sigma-Alpha/Proton Ratio

Fig.II. 4 : Acquisition des paramètres du vent solaire.

Ejection de masse coronale (CMEs)

Pour connaître les dates de CMEs nous avons utilisé le catalogue fourni par le coronographe (the Large Angle and Spectrometric Coronagraph) embarqué à bord du satellite Soho (the Solar and Heliospheric Observatory). Ce catalogue se présente sous la forme d'une matrice Années - Mois (Fig. II. 5) et permet d'obtenir la liste de toutes les CMEs impactant la Terre au cours des cycles solaires N° 23 et N° 24.

YEAR	MONTH											
1996	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
1997	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
1998	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
1999	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
2000	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
2001	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
2002	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
2003	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
2004	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
2005	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
2006	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
2007	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
2008	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
2009	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
2010	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
2011	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep			

Cliquer sur un mois pour obtenir la liste de toutes les CMEs de ce mois

Fig. II. 5: catalogue donnant les dates des CME.

INTRODUCTION

Nous exploitons les données géomagnétiques de l'observatoire de Tamanrasset des deux derniers cycles solaires N°23 et N° 24. Le but de ce chapitre est de montrer l'influence des vents solaires lents et rapides sur l'activité géomagnétique. Nous montrons que les périodes les plus agitées sont caractérisées par des vents solaires rapides, accélérées par des éjections de CME provoquant d'importantes perturbations géomagnétiques.

III.1 LES DONNEES SOLAIRES DES CYCLES SOLAIRES N° 23 ET N°24

Le cycle solaire N°23 apparaît, avec ces particularités, comme étant le cycle solaire le plus long de ce dernier siècle. D'une durée moyenne de 13 ans (1996-2009), a débuté en Octobre 1996 et a atteint son maximum principal au milieu de l'année 2000.

Après une légère baisse vers 2000 -2001, une reprise notable de l'activité a eu lieu depuis la deuxième moitié de l'année 2001.

Un an et demi plus tard, l'activité de notre étoile se maintient sans affaiblissement. En effet, les mois de juillet et août 2002 ont vu l'apparition de plusieurs zones actives spectaculaires accompagnées de taches solaires de grande dimension et de leur pourcentage d'éruptions. Malgré une légère baisse des moyennes, l'activité est restée soutenue en septembre-octobre et au début de l'année 2003, le cycle 23 se caractérise par une année remarquable, tant par ses phénomènes majestueux (fortes éruptions solaires en Octobre et Novembre 2003) que par l'intensité de son activité solaire qui se démarque des autres années du cycle par son nombre très réduit de jours calmes.

Les différentes progressions de la phase ascendante du cycle solaire N°24 sont représentées dans l'analyse de l'année 2011 (Octobre) et 2012 (Mars, Juillet, Octobre).

Nous avons considéré toutes les valeurs vitesses du vent solaire correspondant aux périodes fortement agitées.

Pour ces périodes, nous avons fait la correspondance temporelle entre les « Sudden Storm commencement » (SSC), c'est-à-dire les orages magnétiques à début brusque et les éjections de masse coronale (CME).

Les dates des CME et des événements solaires à protons (SPE) sont indiquées dans le catalogue représenté en figure II.5 (voir chap.II). Nous groupons dans le tableau III.1 les dates de tous les événements importants survenus durant les cycles N°23 et N° 24, ainsi que les vitesses des vents correspondants.

Les dates des(SSC) sont colorées en vert, sans tenir compte du nombre de SSC observés dans une même journée. Nous relierons les événements CME ou SPE correspondants aux dates des (SSC) qui nous intéressent, c'est-à-dire caractérisés par une forte valeur de l'indice géomagnétique $Dst < -150nT$.

La dernière colonne du tableau résume l'ordre de grandeur moyenne des vitesses (km/s) du vent solaire par mois de chaque année, évaluée de 400 à 1000 km/s. Cette colonne nous permet de définir les vents solaires rapides venant des trous coronaux ou les vents solaires lents responsables de l'activité géomagnétique fluctuante.

Nous remarquons que durant l'année 1997, des SSC sont provoqués par des CME avec une vitesse qui varie entre (450-500km/s), c'est le début du cycle N° 23.

Toutes les CME qui viennent deux jours avant les SSC ont une vitesse supérieure à 500 km/s, par exemple pour l'année 2002, cette période correspond aux mois d'octobre et septembre.

De même, on note que pour le mois d'octobre de l'année 2011, la vitesse du vent solaire est aussi de l'ordre de 500 km/s.

L'année 2003 se caractérise par une concentration des dates de très fortes activités géomagnétiques. En effet, aux mois d'octobre et novembre 2003, la vitesse du vent solaire atteint des valeurs particulièrement élevées allant de 900 à 1000 km/s.

Les autres mois perturbés des cycles N°23 et N°24 sont caractérisés par des SSC provoquées par des CMEs ou des SPEs avec de plus faibles valeurs de vitesses. Les vents solaires correspondants aux mois perturbés des cycles N°23 et N°24 se distinguent par des vitesses moyennes supérieures à 600 km/s.

Si nous décrivons ces phénomènes en terme de pourcentage, nous remarquons que 17% des perturbations géomagnétiques correspondent à une activité solaire caractérisée par des vents solaires lents ($V < 500$ km/s). Par contre, 83% des perturbations sont étroitement liées aux vents solaires rapides avec ($V > 500$ km/s).

Années	Jan	fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Déc	Vx(km/s)
1997					03 13					07 10			Mai 500 Oct 450
1998				29	01				02	05 07			Mai 800 Sep 800 Oct 700
1999									21 22	19 21			Sept 600 Oct 600
2000				04 05			14 16	04 06	19 20	09 10			Avr 600 Juil 950 Aout 600 Sept 600 Oct 950
2001			27 29	05 07							04 06	09 10	Mar 700 Avr 600 Nov 600 Déc 900
2002									03 05	05 06			Sept 500 Oct 500
2003										28 30	18 20		Oct 1000 Nov 700
2004							20 22				04 06		Juil 900 Nov 700
2005					11 13			15 16	02 03				Mai 900 Aout 900 Sep 600
2006												13 12	Dec 600
2011										22 24			Oct 500
2012			05 07				14 15			01 03			Mar 800 Juil 600 Oct 600

Tableau III.1. Dates des CME et SSC (jaune), SPE et SSC (bleu) et la vitesse correspondante.

III.2 ANALYSE MORPHOLOGIQUE DE L'ACTIVITE GEOMAGNETIQUE

Nous exploitons les données géomagnétiques de l'observatoire de Tamanrasset des deux derniers cycles solaires N°23 et N° 24. Nous ne considérons dans ce qui suit que les périodes fortement agitées, que nous définissons par un indice géomagnétique $Dst < -150$ nT.

Nos différentes investigations montrent que les années, 1996, 2007, 2008, 2009 et 2010 sont relativement calmes par rapport au Dst choisi dans notre étude.

Nous résumons les événements solaires et leur impact sur l'activité géomagnétique dans le tableau III.1. Les périodes fortement agitées correspondent aux années 1997, 1998, 1999, 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2011 et 2012.

Nous représentons à titre d'exemple, dans la figure III.1 la composante horizontale H du champ magnétique, l'indice de l'activité géomagnétique Dst, la vitesse V_x du vent solaire et la composante du champ magnétique interplanétaire B_z , pour les années 1997, 2000, 2001, 2003, 2011 et 2012.

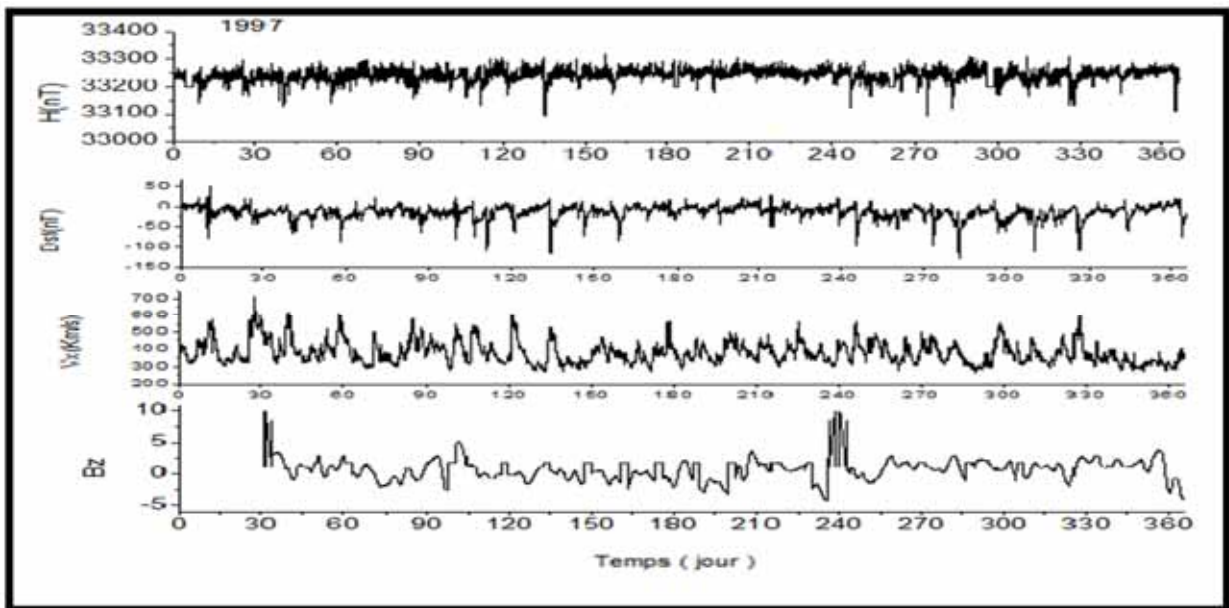


Fig.III.1. De haut en bas : composante horizontale H du champ magnétique, indice de l'activité géomagnétique Dst, la vitesse V_x du vent solaire et la composante du champ magnétique interplanétaire B_z de l'année 1997

L'activité de l'année 1997 est importante avec l'existence de quelques mois perturbés notamment, le mois de mai et le mois d'octobre. L'activité du mois de mai 1997 est très importante révélant l'existence de plusieurs périodes perturbées. Ce mois est le huitième du

cycle N° 23, une quantité considérable d'énergie diffusée d'une manière continue et brusque rend ce mois très actif. La composante horizontale H montre l'existence d'une singularité qui présente le résultat d'une activité solaire à fort contenu énergétique. L'indice géomagnétique Dst met en évidence cette perturbation au milieu du mois de mai et au environ du 15 Octobre 1997.

Pour tous ces évènements, les paramètres du vent solaire V_x et B_z se caractérisent par des valeurs particulières. Pour la vitesse V_x , rappelons que les valeurs moyennes sont de l'ordre 500 km/s. Le champ interplanétaire se distingue par des valeurs de B_z négatives, signifiant une orientation nord sud, c'est-à-dire dans le sens inverse du champ géomagnétique terrestre B_T d'orientation sud- nord (géographique). Cette configuration des lignes des deux champs affaiblit le champ géomagnétique et rend favorable la reconnexion magnétique entre les champs B_T et B_z , permettant une forte pénétration du vent solaire dans la magnétosphère. C'est ce processus physique qui provoque la génération des orages magnétiques à début brusque dont la signature est imprimée dans les fluctuations de la composante horizontale du champ géomagnétique.

Pour l'étude de l'activité du mois de septembre 2002, nous remarquons une très faible valeur du Dst qui arrive jusqu'à -260 nT.

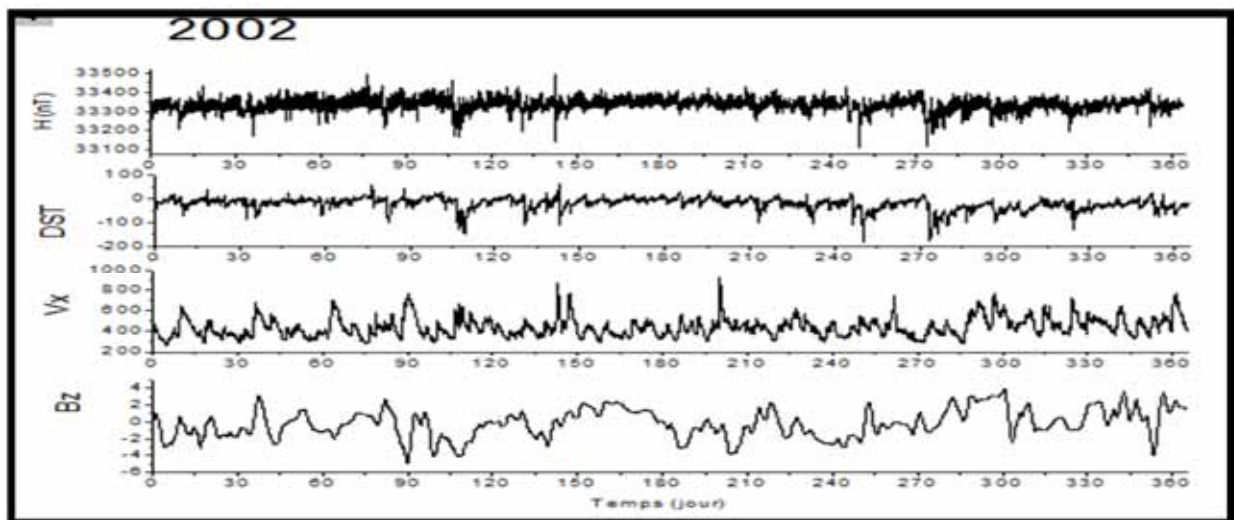


Fig.III.2. De haut en bas : composante horizontale H du champ magnétique, indice de l'activité géomagnétique Dst, la vitesse V_x du vent solaire et la composante du champ magnétique interplanétaire B_z de l'année 2002.

Les singularités repérées au cours de l'année 2004, marquées par les variations des composantes H, Bz et Dst apparaissent au mois de juillet et au mois de novembre. La figure III.3 confirme ces observations par une diminution de la composante horizontale H et de l'indice géomagnétique Dst < -150 nT.

Une activité solaire très importante est visible au mois de décembre de l'année 2006 par l'intensité des fluctuations retracées par la composante horizontale H et l'indice Dst tout au long de l'année. La plus forte perturbation avec un Dst < -150 est affichée durant le mois de décembre 2006, corrélée avec une nette augmentation de la vitesse Vx du vent solaire à la même période. On peut aussi noter une orientation sud du champ magnétique interplanétaire Bz qui augmente ensuite marquant des fluctuations positives pour s'orienter encore vers le sud durant la phase principale de l'orage.

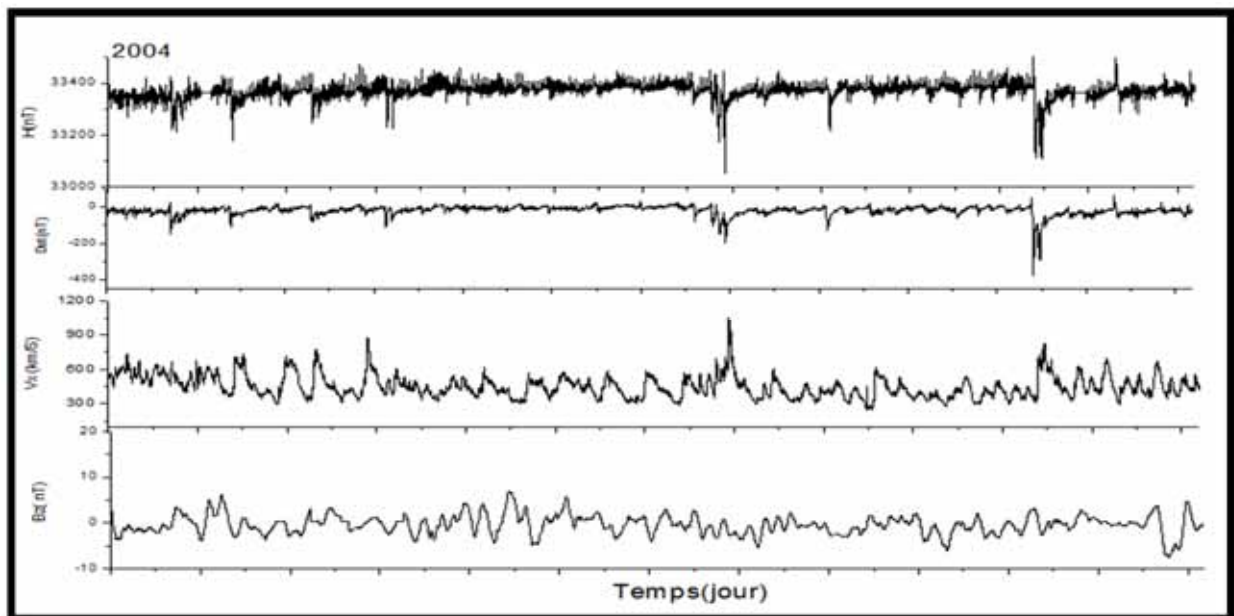


Fig.III.3. De haut en bas : composante horizontale H du champ magnétique, indice de l'activité géomagnétique Dst, la vitesse Vx du vent solaire et la composante du champ magnétique interplanétaire Bz de l'année 2004.

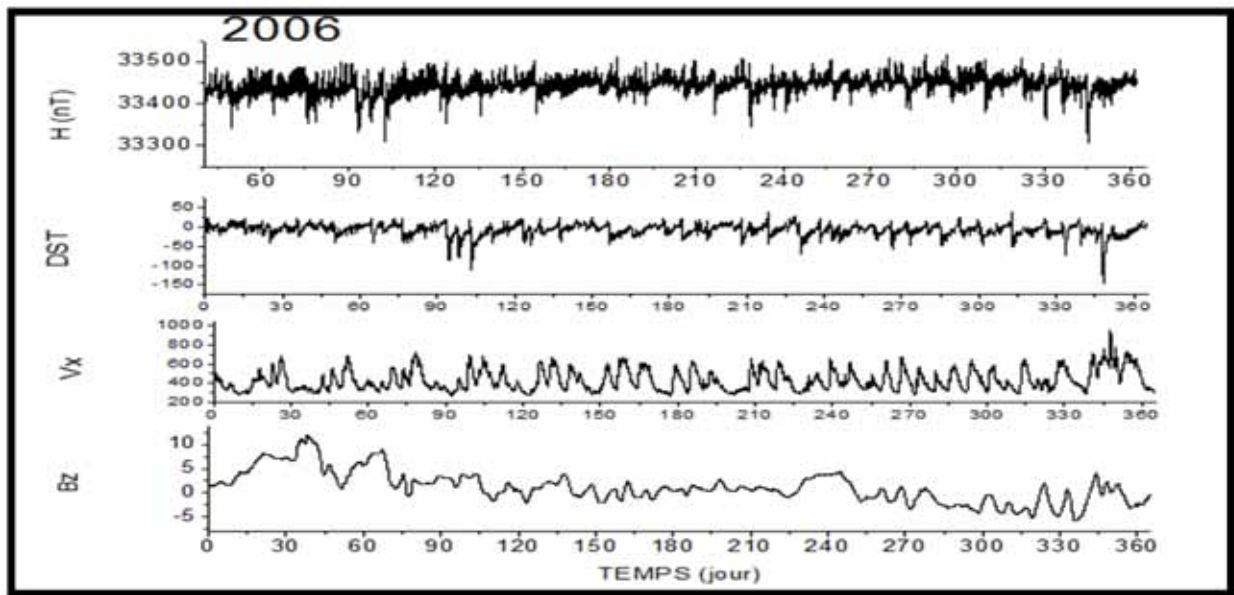


Fig.III.4. De haut en bas : composante horizontale H du champ magnétique, indice de l'activité géomagnétique Dst, la vitesse V_x du vent solaire et la composante du champ magnétique interplanétaire Bz de l'année 2006.

III.3 ANALYSE MULTI ECHELLE DES PERTURBATIONS DU CHAMP MAGNETIQUE

Pour des périodes fortement agitées, que nous définissons par un indice géomagnétique $Dst < -150$ nT, nous effectuons une analyse en ondelettes des fluctuations de la composante horizontale H du champ géomagnétique. En effet, Par leur nature complexe (non-stationnaire, multi-échelles), les fluctuations géomagnétiques sont modélisés comme des processus stochastiques auto-affines.

Les propriétés d'analyse multi-échelles des ondelettes offrent la possibilité de dévoiler toute l'information dans une représentation temps-échelle ou temps-fréquence, appelé scalogramme, permettant de décrire la dynamique complexe et la nature multi- échelles des perturbations géomagnétiques (Zaourar *et al.*, 2013).

III.3.1 Analyse en ondelettes continue

La transformée en Ondelettes Continue (TOC) du signal $s(t)$ à la position b et à l'échelle a est définie par l'équation (Grossmann et Morlet, 1984):

$$C_s(a, b) = s(b) * \frac{1}{\sqrt{a}} \bar{\psi}\left(\frac{b}{a}\right) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \frac{1}{\sqrt{a}} \bar{\psi}\left(\frac{t-b}{a}\right)$$

Avec $\bar{\psi}\left(\frac{t-b}{a}\right)$ la famille d'ondelette, où a est le paramètre d'échelle, b le paramètre de translation le long du signal analysé et $(-)$ signifie le complexe conjugué, l'échelle ' a ' représente l'inverse de la fréquence $a \propto \frac{1}{f}$.

La TOC doit satisfaire la condition d'admissibilité qui se traduit dans le domaine de Fourier par la relation:

$$C_{\psi} = \int_0^{+\infty} \frac{|\psi(f)|^2}{f} df < \infty$$

Nous avons choisi l'ondelette de Morlet complexe en raison de sa bonne localisation à la fois en temps et en fréquence.

$$\int_{-\infty}^{+\infty} t^n \psi(t) dt = 0, \text{ pour } 0 \leq n \leq n_{\psi}$$

Dans l'algorithme spécifique mis en œuvre par (Zaourar al., 2006), on peut définir en tout point du plan temps – fréquence exploré, le scalogramme par le carré des coefficients d'ondelettes :

$$P(f, t) = C(f, t) \cdot \bar{C}(f, t) = C_s |(f, t)|^2$$

Pour les hautes fréquences, cette relation est approximée par une loi de puissance :

$$P(f, t) \approx f^{-\beta(t)}$$

L'exposant spectral local décrit les changements locaux de la loi de puissance ci-dessous.

$$\beta(t) = 2h(t) + 1$$

III.3.2 Analyse des perturbations du champ magnétique du cycle N° 23

III.3.2.1 Etude de l'activité 2000

Le mois de juillet 2000 est le mois le plus perturbé du cycle solaire N° 23 avec un nombre de tâches solaires très élevé. En effet, l'indice de l'activité géomagnétique Dst annonce une perturbation magnétique équatoriale très puissante ($Dst < -200$ nT), qui montre l'intensité de l'effet des particules solaires sur le champ géomagnétique par une forte augmentation du courant annulaire. L'image de la distribution énergétique des coefficients d'ondelettes représentée par le scalogramme en figure III.5B confirme cette observation et montre une très forte perturbation magnétique au milieu du mois entre le 13 et le 17^{ème} jour du mois

correspondant à la période de l'orage magnétique. Le maximum de la perturbation est atteint le 15^{ème} jour du mois caractérisé par une décroissance de l'énergie vers les hautes fréquences. Notons que la représentation sur les différentes figures est journalière, cependant les données utilisées pour nos calculs sont des moyennes horaires.

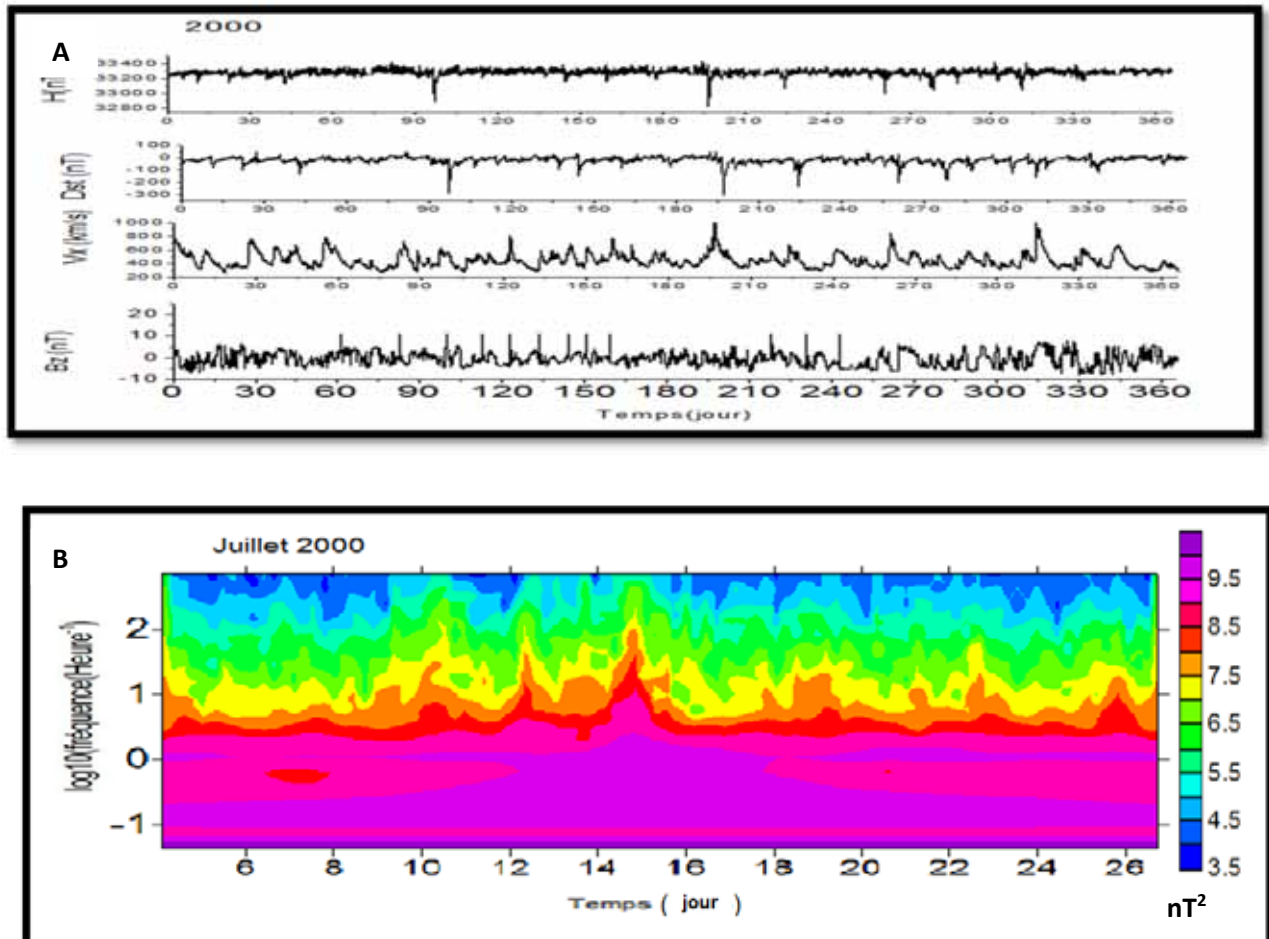


Fig.III.5 A De haut en bas : composante horizontale H du champ magnétique, indice de l'activité géomagnétique Dst, la vitesse V_x du vent solaire et la composante du champ magnétique interplanétaire Bz de l'année 2000. B : scalogramme juillet 2000.

III.3.2.2 Etude de l'activité 2001

Pour l'année 2001, une activité solaire très importante est visible, soulignée par des perturbations géomagnétiques (Fig. III.6 A) qui signalent des pics à plusieurs mois (mars, avril, novembre et décembre). De fortes intensités sont retracées par un indice géomagnétique Dst compris entre -200 et -390 nT et par la distribution énergétique des coefficients

d'ondelettes. On peut faire les mêmes remarques que précédemment sur l'augmentation de la vitesse V_x du vent solaire et l'orientation de B_z du CMI durant les périodes fortement agitées.

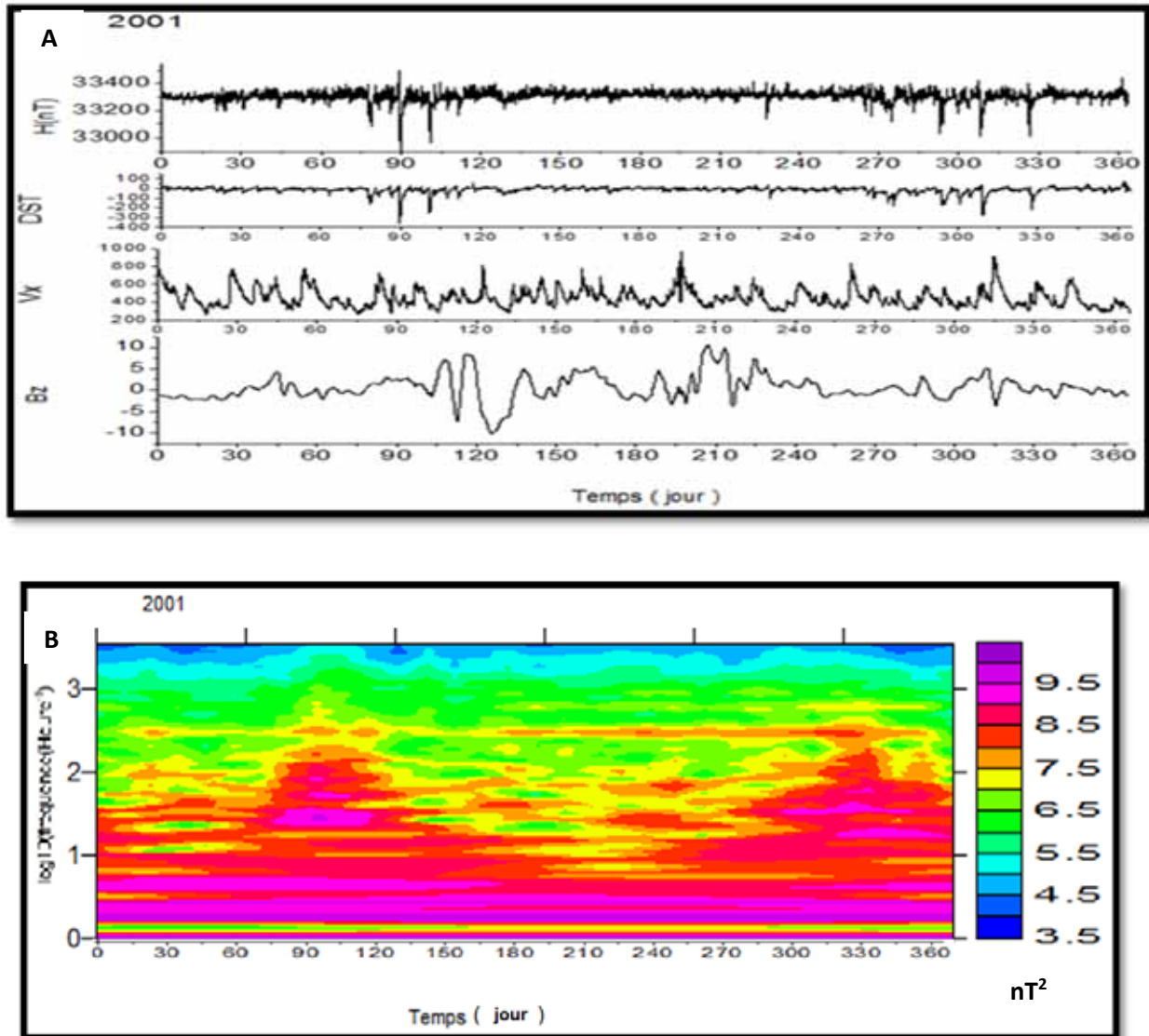


Fig.III.6 A De haut en bas : composante horizontale H du champ magnétique, indice de l'activité géomagnétique Dst, la vitesse V_x du vent solaire et la composante du champ magnétique interplanétaire B_z de l'année 2001. B : scalogramme de l'année 2001.

III.3.2.3 Etude de l'activité 2003

Une éruption solaire importante s'est produite en octobre 2003 provoquant une tempête magnétique qui a touché la terre le 30 octobre alors que les effets de la précédente éruption perturbent encore les télécommunications et provoquent les aurores boréales. La figure.III.7A

montre ce phénomène qui est facilement détectable sur la progression de la composante horizontale H. Cette perturbation est traduite par une augmentation des valeurs enregistrées de H ensuite sa chute pour atteindre les valeurs minimales. La composante horizontale affiche aussi une très forte singularité le 20 novembre 2003, l'indice Dst localise au même moment cette perturbation intense.

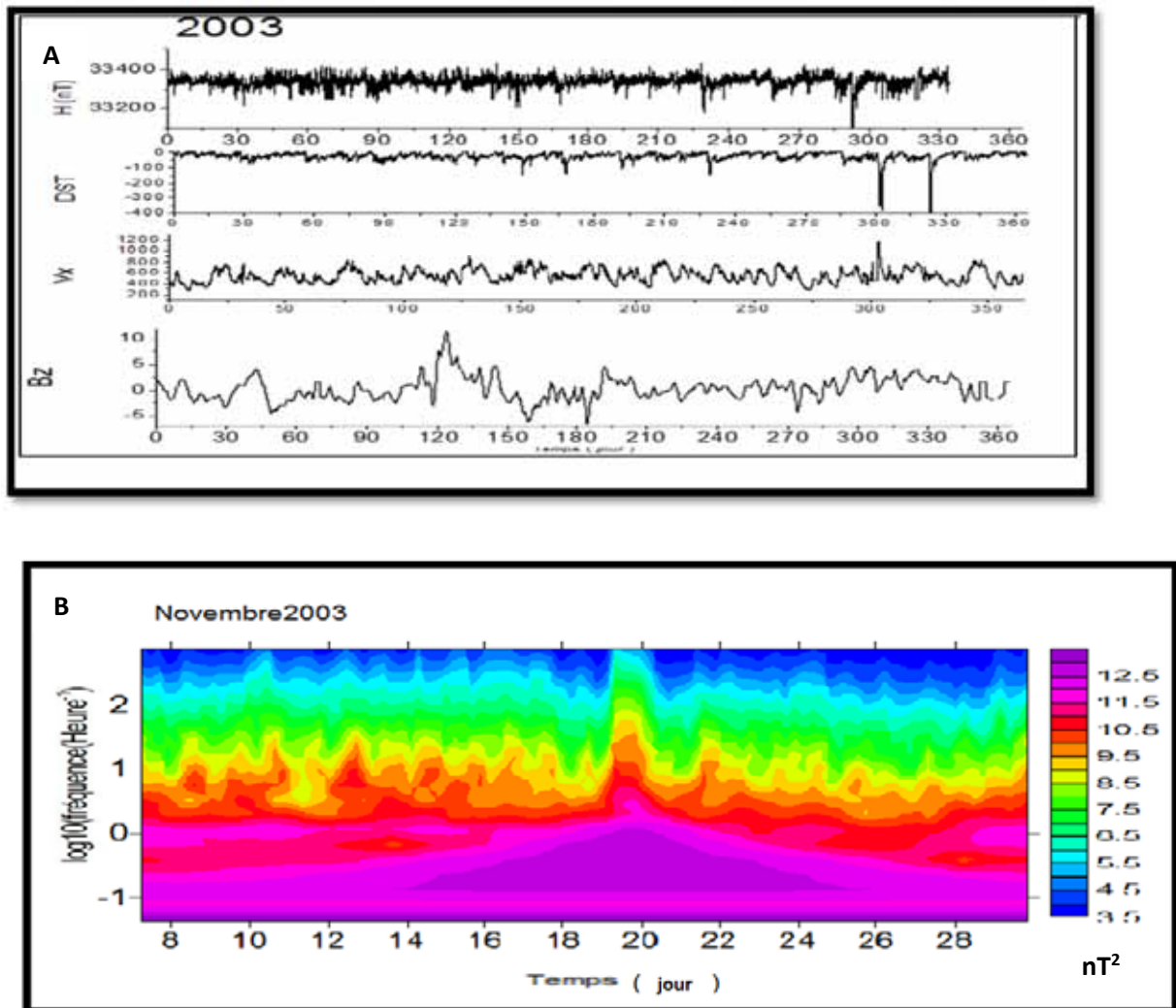


Fig.III.7 A De haut en bas : composante horizontale H du champ magnétique, indice de l'activité géomagnétique Dst, la vitesse Vx du vent solaire et la composante du champ magnétique interplanétaire Bz de l'année 2003. B : scalogramme novembre 2003.

Le scalogramme représenté par la figure III.7 B souligne remarquablement cette très forte perturbation qui s'étale entre le 16 et le 22 novembre 2003. On observe une nette diminution de l'énergie vers les hautes fréquences au moment de la phase principale de l'orage magnétique centrée au 20 novembre.

III.3.3 Analyse des perturbations du champ magnétique du cycle N° 24

Depuis son commencement, le cycle solaire 24 s'est avéré plutôt imprévisible. D'abord, il a pris environ une année de retard, puisque l'activité solaire de 2009 était très faible. De plus, le nombre de taches solaires sont bien en dessous de leurs valeurs de 2011, et de fortes éruptions solaires ont été très rares depuis de nombreux mois.

L'année 2013 censée être l'année du maximum solaire, s'est distingué par une activité solaire relativement faible. La NASA admet que le cycle solaire actuel est le plus faible depuis 200 ans (au moins)

Pour ce cycle, les plus fortes perturbations caractérisées par un $Dst < -150$ nT du champ géomagnétique que nous avons répertoriés, sont observées durant les années 2011 et 2012.

III.3.3.1 Activité de l'année 2011

La composante H de l'année 2011 (Fig. III.8A-B) montre des fluctuations d'amplitudes variables. On peut noter sur la courbe de l'indice Dst correspondant, que le mois d'octobre est marqué par une plus forte diminution de H correspondant à l'orage du 24 octobre 2011.

La courbe de variation du champ interplanétaire Bz montre un chargement de direction du nord vers le sud durant la phase principale de l'orage. La vitesse du vent solaire marque aussi une légère augmentation durant cette phase.

Le scalogramme confirme la loi d'échelle par une diminution de l'énergie vers les hautes fréquences mais ne marque pas une forte énergie au moment de l'orage.

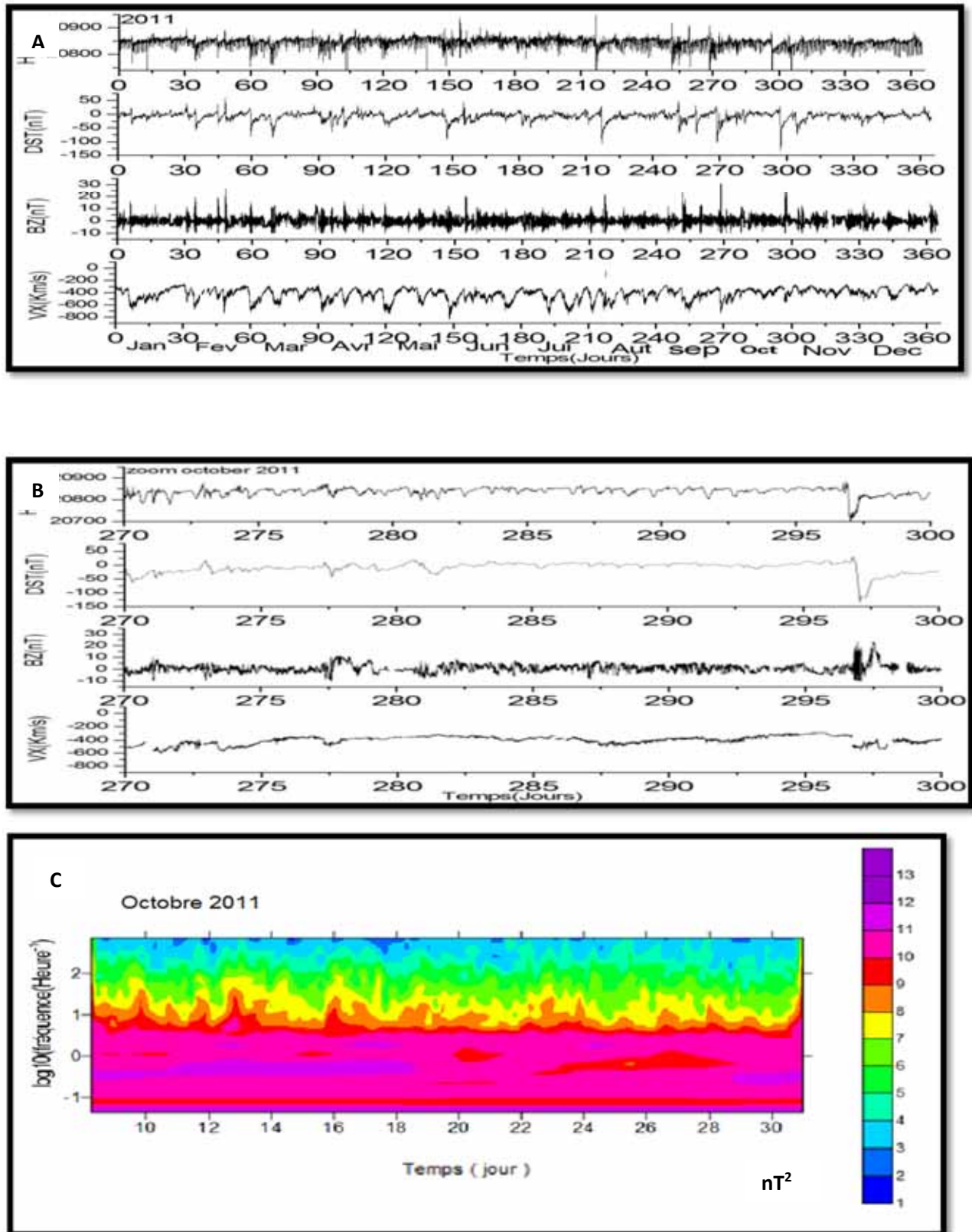


Fig.III.8A : De haut en bas : composante horizontale H du champ magnétique, indice de l'activité géomagnétique Dst, la composante du champ magnétique interplanétaire Bz et la vitesse Vx du vent solaire de l'année 2011, **B** : zoom octobre 2011. **C** : scalogramme octobre 2011.

III.3.3.2 Activité en 2012

Les figures III.9 A-C représentent les paramètres du vent solaire ainsi que les données géomagnétiques, qui retracent fidèlement l'orage magnétique du mois de mars 2012 avec un indice Dst de l'ordre -150 nT. La phase initiale est bien marquée par une augmentation de la composante H du champ géomagnétique ainsi que celle du Dst, suite à l'intensification du courant de Chapman Ferraro. La diminution de H et du Dst reflète l'augmentation du courant annulaire et marque ainsi la phase principale de l'orage. Cette phase est bien retracée par une forte énergie au niveau du scalogramme.

Nous avons vérifié à travers tous ces résultats que les périodes de fortes activités géomagnétiques sont bien corrélées avec les paramètres du vent solaire.

En effet, durant les orages intenses que nous avons analysés pour les deux cycles, la vitesse du vent solaire marque une nette augmentation d'une valeur moyenne de 250 Km/s vers 600 Km/s. Cette vitesse peut atteindre des valeurs de 900 et 1000 km/s pour les orages violents de octobre et novembre 2003.

Les courbes de variation du champ magnétique interplanétaire marquent un changement d'orientation. La phase initiale de la perturbation est soulignée par une orientation sud du champ magnétique interplanétaire, favorisant la reconnexion magnétique avec le champ géomagnétique.

Le traitement par analyse en ondelettes continue nous a permis de vérifier que les perturbations du champ géomagnétiques sont modélisées par une loi d'échelle. En effet, tous les scalogrammes présentés pour les deux cycles montrent bien une décroissance de l'énergie vers les hautes fréquences. Un tel modèle mathématique permet de signifier que les perturbations géomagnétiques du champ externe présentent une corrélation positive entre les données successives caractéristique des signaux à mémoire statistique.

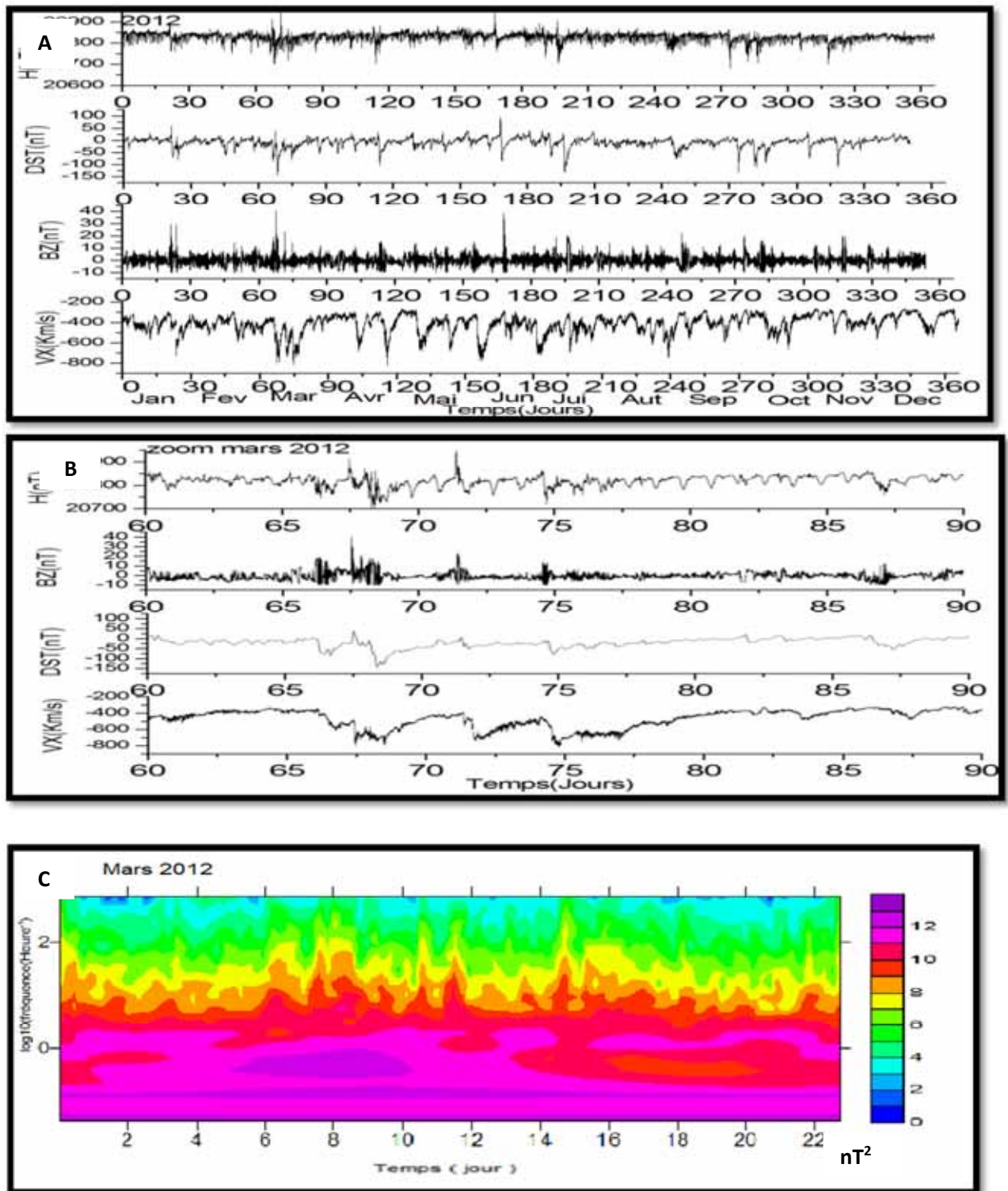


Fig.III. 9 : A De haut en bas : composante horizontale H du champ magnétique, indice de l'activité géomagnétique Dst, la composante du champ magnétique interplanétaire Bz et la vitesse Vx du vent solaire de l'année 2012. **B** zoom Mars 2012 **C** : scalogramme Mars 2012.

Nous montrons aussi, que même si les courbes de variations de H et du champ magnétique interplanétaire présentent des morphologies similaires, la modélisation mathématique est différente. En effet, la figure III.10 représente au niveau du scalogramme un comportement stochastique des fluctuations de Bz, mais pas de décroissance de l'énergie vers les hautes fréquences. Par conséquent, on peut conclure que la composante Bz du champ magnétique interplanétaire n'obéit pas à une loi d'échelle.

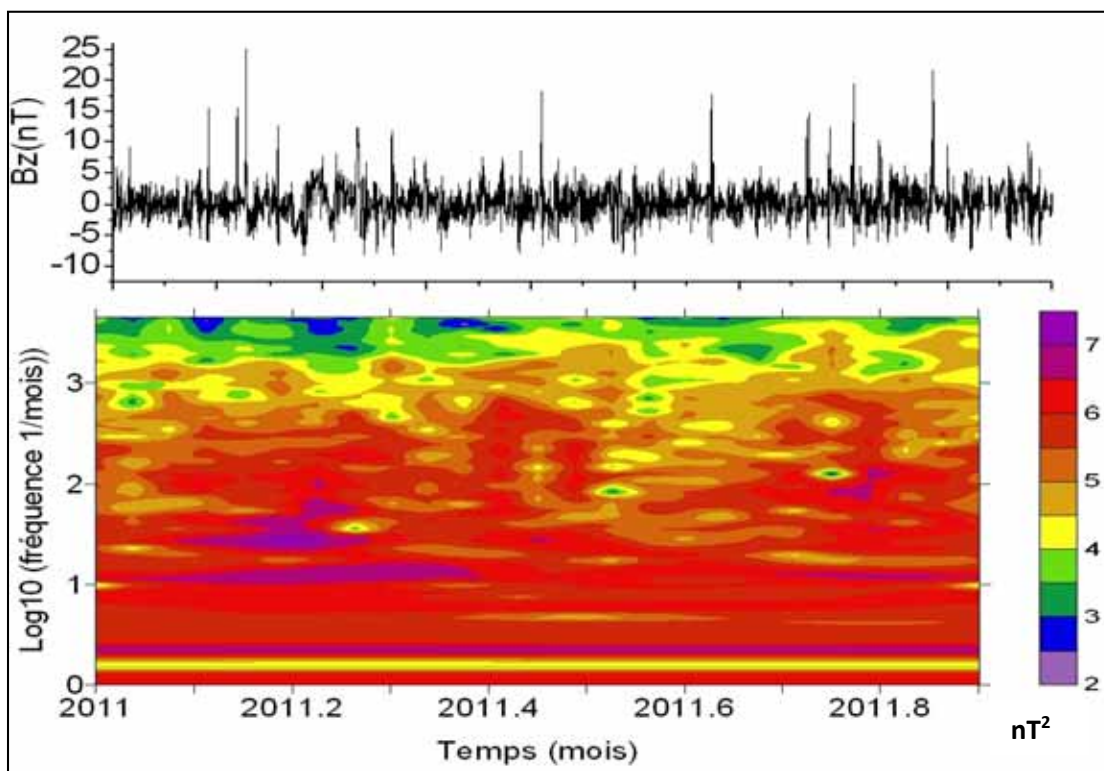


Fig.III. 10 haut : variations de la composante Bz du champ magnétique interplanétaire de l'année 2011. Bas : Scalogramme correspondant, montrant une distribution d'énergie aléatoire qui n'obéit pas à une loi d'échelle.

CONCLUSION GENERALE

L'objectif de notre travail est d'étudier les relations Soleil-Terre, à travers l'impact du vent solaire sur le champ géomagnétique, plus précisément sa composante horizontale H.

Nous avons analysé des données géomagnétiques fournies par l'observatoire de Tamanrasset du réseau mondial InterMagnet portant sur le cycle solaire N° 23 (1996 - 2008) et N° 24 (2009 - 2012). L'interprétation des perturbations de la composante horizontale H du champ magnétique, de l'indice géomagnétique Dst ainsi que ceux des paramètres du vent solaire à savoir la vitesse du vent solaire V_x et la composante B_z du champ interplanétaire a permis de montrer que les orages magnétiques, provoqués par des injections de masses coronales (CME), sont caractérisés par des vitesses de vents solaires rapides.

La corrélation entre la composante horizontale H du champ magnétique et l'indice géomagnétique DST, nous a permis de caractériser les perturbations géomagnétiques intenses induites par une forte activité solaire.

Enfin, nous montrons à travers cette étude une forte corrélation entre l'augmentation de la vitesse du vent solaire et l'intensité des orages magnétiques provoqués aussi bien par les événements à protons (SPE) que par les éjections de masses coronales.

Notons aussi que pour toutes ces périodes agitées, la composante B_z du champ magnétique interplanétaire prend une orientation sud, en accord avec la théorie d'une magnétosphère « ouverte », donnant les conditions favorables à une bonne reconnexion magnétique entre les lignes du magnétique champ interplanétaire et les lignes du champ magnétique terrestre.

Nous avons confirmé ces observations par la réalisation d'un traitement en ondelettes continue qui a permis de visualiser dans le plan temps - fréquence la distribution en énergie des perturbations géomagnétiques.

Cette analyse multiéchelle nous a permis de vérifier que les perturbations du champ géomagnétiques sont modélisées par une loi d'échelle. La distribution des coefficients d'ondelettes au niveau des scalogrammes pour les deux cycles montrent bien une décroissance de l'énergie vers les hautes fréquences. Ces observations confirment la modélisation des perturbations géomagnétiques par des processus en loi d'échelle et la possibilité de faire des prédictions à court terme de l'activité orageuse.

Références Bibliographiques :

Amari T D., Boscher J., L. Bougeret P., Lantos C., Lathuill`re., & Menvielle M.(1999). Modèles, paramètres clés, indices en métrologie de l'espace. Atelier de métrologie de l'espace, Programme National Soleil Terre, Grenoble, Novembre.

Axford W.I., et Hines C.O.(1961). „A unifying theory of high latitudes geophysical phenomena and geomagnetic storm“ , *Can. J. Phys.*

Birkeland, K., 1908. The Norwegian aurora polaris expédition, Vol. 1, 1st sec., 1902-1903, Aschloug, Christiana, Norvège.

Campbell. W. H. (1997). Introduction to geomagnetic fields. Cambridge University Press.

Chapman S., and V. C. A. Ferraro. (1931). A new theory of magnetic storms, Part I. The initial phase, *Terr. Magn. Atmosph. Elec.*, 36.

Grossmann A., Morlet J.,(1984) ,decomposition of Hardy functions into square integrable wavelets of constant shape, *SIAM J. Math. Anal.*,

Lilensten J. & P. L. Blelly.(1999). Du Soleil à la Terre : aéronomie et météorologie de l'espace. Collection Grenoble Sciences. Presses Universitaires de Grenoble, Grenoble.

Le Mouël J. L. (1976). Le champ géomagnétique et L'origine du champ magnétique terrestre dans *Traité de Géophysique Interne*, tome II (Coulomb Jean et Georges Jobert) Masson.

Mazaudier, C., et Y. Cohen. (1990). L'Electrojet Equatorial, Composante d'un Circuit Electrique Global Connectant le Vent Solaire, la Magnétosphère, l'Ionosphère, l'Atmosphère et la Terre, *Comit. Nation. Franç. Geod. Geophys.*, Rapport Quadriennal.

Mayaud, P. N, (1980) Derivation, Meaning and Use of Geomagnetic Indices, geophysical Manograph , Am. Geophys.Union, Washington D.C.

Menvielle, M. et A. Berthelie (1991), The K- derived planetary indices : description and availability, *Rev Geophys.*

Mebarki R., (2007). Analyse e ondelettes et Applications aux signaux géomagnétiques du Réseau InterMagnet », Thèse de Magister, USTHB, Alger (Algérie).

Pham thi thu hong.,(2012).analyse et interprétation de la variation Régulière du champ magnétique terrestre au Vietnam et modélisation de l'ionosphère, thèse doctorat, université pierre Et marie curie.

Zaourar N. (2006). “Analyse non linéaire des signaux géophysiques” Thèse de Doctorat d'Etat, USTHB, Algérie.

Zerbo J.L., (2012), activité solaire, vent solaire, Géomagnétisme et ionosphère équatoriale, Thèse de Doctorat, Université de Ouagadougou.

Les sites internet :

-<http://www.intermagnet.org>

- <http://omniweb.gsfc.nasa.gov/ow.html>

-http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_List/

-<http://www.nasa.gov/centers/goddard/news/topstory/2003/1023esuice.html>.

-<http://isgi.latmos.ipsl.fr>