

N° d'ordre :08/2003-M/S.T

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE HOUARI BOUMEDIENE
(U.S.T.H.B.)

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

Thèse
Présentée pour l'obtention du grade de

Magister en Sciences de la Terre

Spécialité : Géophysique

par :

Mlle BENGHANEM Karima

Sujet

Etude de la variation spatio-temporelle du champ magnétique terrestre. Relation avec l'activité solaire.
--

Soutenue publiquement le :06/07/2003 devant le jury composé de :

M. H. BENHALLOU
M. M. HAMOUDI
M. A. ABTOUT
M. M. DJEDDI
Mme. Y. YAHIAAT

Professeur (U.S.T.H.B.)
Profeseur (USTHB)
Maître de recherche (CRAAG)
Maître de conférence (USTHB)
Chargé de cours (USTHB)

Président
Directeur de Thèse
Examinateur
Examinateur
Examinatrice

REMERCIEMENTS

L'aboutissement de ce travail n'aurait pas eu lieu sans l'aide et la mobilisation des personnes qui m'ont entouré durant des années de travail. Ainsi mes plus vifs remerciements vont à :

Monsieur M. Hamoudi de m'avoir proposé le sujet de thèse, encadré dans mon travail et mis à ma disposition les moyens requis.

Messieurs les membres de jury d'avoir accepté de lire et d'examiner ce mémoire.

Mes enseignants de l'U.S.T.H.B. qui m'ont beaucoup apporté dans ma formation. Je les remercie également du soutien et de l'encouragement témoignés durant la préparation de cette thèse.

Le directeur du C.R.A.A.G. d'avoir mis à ma disposition les stations du centre ainsi que le service bibliothèque durant toute cette période.

M. A. Abtout d'avoir facilité ma présence au C.R.A.A.G. ainsi que pour les discussions constructives échangées.

Messieurs M. Labassi et T. Allili ingénieurs informaticiens au C.R.A.A.G. pour leur aide.

Un grand bravo à Mesdemoiselles N. Brara et F. Mezoued grâce à qui les longues journées au labo sont devenues plus agréables. Merci à Mlle. F.Z. Khaldoui pour son aide et encouragements.

Des remerciements particuliers vont à Mesdames N. Ziat, A. Heddar et N. Labassi pour leur amitié, encouragements et soutien, ainsi que l'aide qu'elles m'ont apporté chaque fois que le besoin s'est fait sentir.

Je ne remercierai jamais assez M. A. Benhalla de m'avoir soutenu, encouragé et d'avoir été présent tout le temps et particulièrement dans les moments les plus durs. Merci aussi pour les discussions fructueuses que tu as bien voulu partager avec moi sans aucune réserve.

Je remercie tout particulièrement M. A. Bouberek pour sa patience durant des années, ses incessants encouragements ainsi que l'aide tant morale que technique qu'il m'a apporté. Merci pour ta compréhension et d'avoir été toujours à mes côtés dans les moments les plus durs.

Toute ma gratitude va à mes parents à qui je dois tout et sans qui ce travail n'aurait jamais vu le jour. Merci à vous d'avoir rendu tout cela possible. Merci pour votre compréhension et soutien durant des années.

Je ne puis citer toutes les personnes que ce soit à l'U.S.T.H.B., au C.R.A.A.G. ou ailleurs qui m'ont aidé et encouragé de près ou de loin. Aussi je leur dis Bravo et Merci à vous tous.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE.....	2
CHAPITRE I. DESCRIPTION DES VARIATIONS TEMPORELLES DU CHAMP MAGNETIQUE TERRESTRE.....	8
I. DESCRIPTION DU CHAMP MAGNETIQUE TERRESTRE	9
I.1. CONTRIBUTIONS INTERNES	9
I. 2. CONTRIBUTIONS EXTERNES	10
II. VARIATIONS TEMPORELLES DU CHAMP GEOMAGNETIQUE D’ORIGINE EXTERNE.	12
II.1. LES VARIATIONS JOURNALIERES	13
II.2. LA VARIATION DE 27 JOURS ET SES HARMONIQUES.....	14
II.3. LES VARIATIONS D'UN AN, SIX MOIS ET LEURS HARMONIQUES	14
II.4. LE CYCLE DE 11 ANS.....	16
III. ACTIVITE GEOMAGNETIQUE ET DESCRIPTION DES ORAGES GEOMAGNETIQUES	16
III.1. ACTIVITE GEOMAGNETIQUE	16
III.2. DESCRIPTION DES ORAGES GEOMAGNETIQUES	18
III.2.1. Définition d'un orage géomagnétique.....	18
III.2.2. Classement des orages par intensité.....	19
III.2.3. Distribution des orages par saison et cycle solaire	20
III.2.4. Les types d'orages géomagnétiques	21
III.2.5. Relation entre orages et sous orages géomagnétiques	23
CHAPITRE II. DESCRIPTION DES DONNEES UTILISEES.....	25
I. NOMBRE DE TACHES SOLAIRES	25
I.1. CARACTERISTIQUES DES TACHES SOLAIRES	25
I.2. CALCUL DU NOMBRE DE TACHES SOLAIRES.....	25
I.3. DESCRIPTION DES CYCLES DE TACHES SOLAIRES	26
II. LES INDICES AA.....	27
III. PROGRAMME INTERMAGNET ET DONNEES DE CHAMP GEOMAGNETIQUE	29
III.1. PROGRAMME INTERMAGNET.....	29
III.2. DETERMINATION DES ELEMENTS GEOMAGNETIQUES	31
III.3. ECHANTILLONNAGE DES DONNEES INTERMAGNET.....	34
CHAPITRE III. THEORIE GENERALE SUR L’ANALYSE EN ONDELETTES CONTINUES.....	36
INTRODUCTION.....	36
I. DEFINITION ET PROPRIETES D'UNE ONDELETTE	37

II. TRANSFORMEE EN ONDELETTES CONTINUES	40
II.1. PROPRIETES DE LA TRANSFORMEE EN ONDELETTES CONTINUES	40
II.2. CARACTERISATION DE LA REGULARITE D'UNE FONCTION.....	41
III. QUELQUES ONDELETTES ET LEURS PRINCIPALES CARACTERISTIQUES. 42	
III.1. LE CHAPEAU MEXICAIN	42
III.2. L'ONDELETTE DE MEXIDER	42
CHAPITRE IV. ETUDE DE LA VARIATION TEMPORELLE DE LA ONTRIBUTION EXTERNE DU CHAMP MAGNETIQUE TERRESTRE.....	45
INTRODUCTION.....	45
I. ANALYSE SPECTRALE DU CHAMP MAGNETIQUE TERRESTRE	46
II. ANALYSE EN ONDELETTES CONTINUES DU CHAMP GEOMAGNETIQUE	48
II.1. ANALYSE EN ONDELETTES CONTINUES DU MODELE SYNTHETIQUE DU CHAMP GEOMAGNETIQUE	48
II.1.1 Calcul du modèle synthétique du champ géomagnétique.....	48
II.1.2 Analyse en ondelettes continues du modèle principal sans bruits.....	50
II.1.3. Analyse en ondelettes continues du modèle principal perturbé par un bruit gaussien	53
II.1.4. Analyse en ondelettes continues de la composante harmonique	54
II.1.5. Analyse en ondelettes continues du modèle synthétique.....	57
II.1.6. Classement des crêtes d'ondelettes.....	59
II.2. ANALYSE EN ONDELETTES CONTINUES DES DONNEES DE CHAMP MAGNETIQUE TERRESTRE	60
II.2.1. Dérivée absolue moyenne.....	61
II.2.2. Description des données filtrées.....	62
II.2.3. Analyse en ondelettes continues de la dérivée absolue moyenne des composante X, Y et Z	63
CHAPITRE V. ANALYSE DE L'ACTIVITE SOLAIRE.....	77
INTRODUCTION.....	77
I. ANALYSE SPECTRALE DES CYCLES DE TACHES SOLAIRES (SSN)	80
I.1. ANALYSE SPECTRALE DES CYCLES DE TACHES SOLAIRES SUR LA PERIODE 1754-1997 ...	80
I.2. ANALYSE SPECTRALE DU CYCLE 22 DU NOMBRE DE TACHES SOLAIRES	80
II. CALCUL DU MODELE DES CYCLES DE L'ACTIVITE SOLAIRE	82
II.1. ETUDE ANALYTIQUE DE R(T).....	82
II.2. MODELE DE DISTRIBUTION DU NOMBRE DE TACHES SOLAIRES SSN	85
III. ANALYSE DU MODELE DES CYCLES DE TACHES SOLAIRES	87
III.1. ANALYSE DU MODELE SYNTHETIQUE DES CYCLES DE TACHES SOLAIRES SUR LA PERIODE 1754-1997	87
III.2. ANALYSE EN ONDELETTES CONTINUES DU MODELE SYNTHETIQUE DU CYCLE 22 DE L'ACTIVITE SOLAIRE	88
III.2.1. Analyse en ondelettes continues du modèle synthétique exact.....	89
III.2.2. Analyse en ondelettes continues du modèle synthétique du cycle 22 avec bruit.....	90
III.2.3. Classement des crêtes d'ondelettes	93
IV. ANALYSE EN ONDELETTES CONTINUES DU CYCLE REEL N°22.....	95
IV.1. ANALYSE EN ONDELETTES CONTINUES DU CYCLE 22.....	95

IV.1.1. Description des crêtes d'ondelettes du cycle réel N°22 de ssn.....	96
IV.2. METHODE DE LA DERIVEE ABSOLUE MOYENNE	97
IV.2.1. L'analyse en ondelettes des dérivées absolues moyennes du cycle réel N°22 de ssn	99
IV.2.2. CLASSEMENT DES CRETES D'ONDELETTES	101
V. ANALYSE SPECTRALE DES INDICES AA	105
V.1. ANALYSE SPECTRALE DE L'ACTIVITE GEOMAGNETIQUE	105
V.1.1. Analyse spectrale des indices aa sur la période 1868-1998.....	105
V.1.2. Analyse spectrale du cycle 22 de l'activité géomagnétique	106
V.2. CALCUL DU MODELE DE L'ACTIVITE GEOMAGNETIQUE DECRIT PAR LES INDICES AA.....	107
V.3. ANALYSE EN ONDELETTES CONTINUES DE L'ACTIVITE GEOMAGNETIQUE.....	109
V.3.1. ANALYSE EN ONDELETTES CONTINUES DES CYCLES DES INDICES AA POUR LA PERIODE 1869 1998.....	109
V.3.2. ANALYSE EN ONDELETTES DU CYCLE 22 DE L'ACTIVITE GEOMAGNETIQUE	110
V.3.2.1. L'analyse en ondelettes du modèle synthétique du cycle 22 de aa	110
V.3.2.2. Analyse en ondelettes du modèle synthétique du cycle 22 avec bruit.....	112
V.3.3. CLASSEMENT DES CRETES D'ONDELETTES DU MODELE SYNTHETIQUE DU CYCLE 22 DE AA AVEC BRUIT.....	114
V.4. ANALYSE EN ONDELETTES DU CYCLE REEL N°22 DE AA	115
V.4.1. CLASSEMENT DES CRETES D'ONDELETTES DU CYCLE REEL 22 DE AA	116
V.5. METHODE DE LA DERIVEE ABSOLUE MOYENNE.....	117
V.5.1. ANALYSE EN ONDELETTES DES DERIVEES ABSOLUES MOYENNES DU CYCLE REEL N°22 DE AA.....	118
V.5.2. CLASSEMENT DES CRETES D'ONDELETTES DU CYCLE 22 DE AA	122
CONCLUSION GENERALE	127
ANNEXES.....	129
ANNEXE A.....	130
ANNEXE B.....	132
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUE	139

Introduction Générale

L'histoire de l'homme avec le magnétisme remonte à l'antiquité. Les Grecs, les Romains et les Chinois avaient remarqué que l'oxyde de fer magnétique, la magnétite, avait la faculté d'attirer les objets contenant du fer. Mais c'est seulement en 1600 qu'une étude scientifique sur le magnétisme fut réalisée par William Gilbert. Dans son ouvrage intitulé « *De magnete* », il montra que la Terre elle-même se comporte comme un aimant géant (Encyclopédie Microsoft Encarta, 2002). Depuis, bien des interrogations concernant l'origine du champ géomagnétique, l'influence de l'espace interplanétaire sur ce dernier et bien entendu ses variations spatio-temporelles, n'ont cessé d'intriguer les chercheurs. Un bon nombre d'interrogations a trouvé des réponses alors que d'autres demeurent en suspend.

En effet, les périodes caractéristiques du champ magnétique terrestre balaient un intervalle de temps allant du jour à des centaines de millions d'années, en marquant, entre autres, des variations de 27 jours, six mois, un an, et le cycle de 11ans (Le Mouél, 1976) (Fig. 1). Le champ magnétique terrestre est la somme de deux contributions ; une contribution interne, d'origine nucléaire qui serait générée par des mouvements de convection dans la partie fluide du noyau (Fig. 2). La deuxième contribution est d'origine externe et trouve sa source dans les couches ionosphérique et magnétosphérique de l'atmosphère terrestre (Fig. 3).

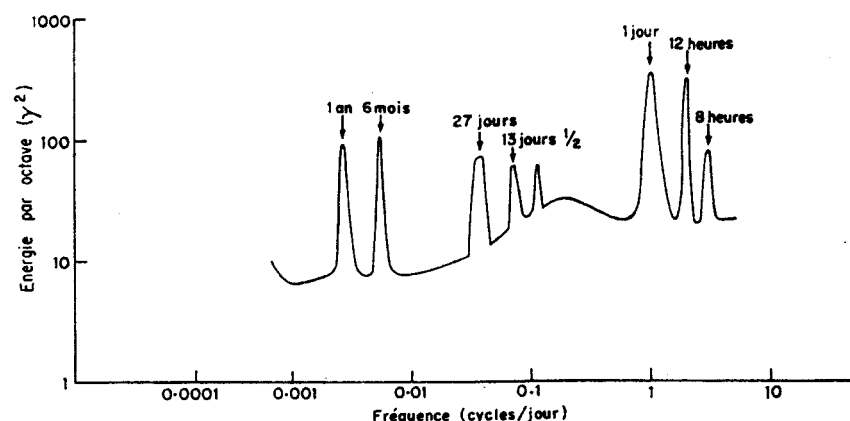


Fig.1 : Spectre d'énergie schématisé de la composante horizontale H à Greenwich (Le Mouél, 1976).

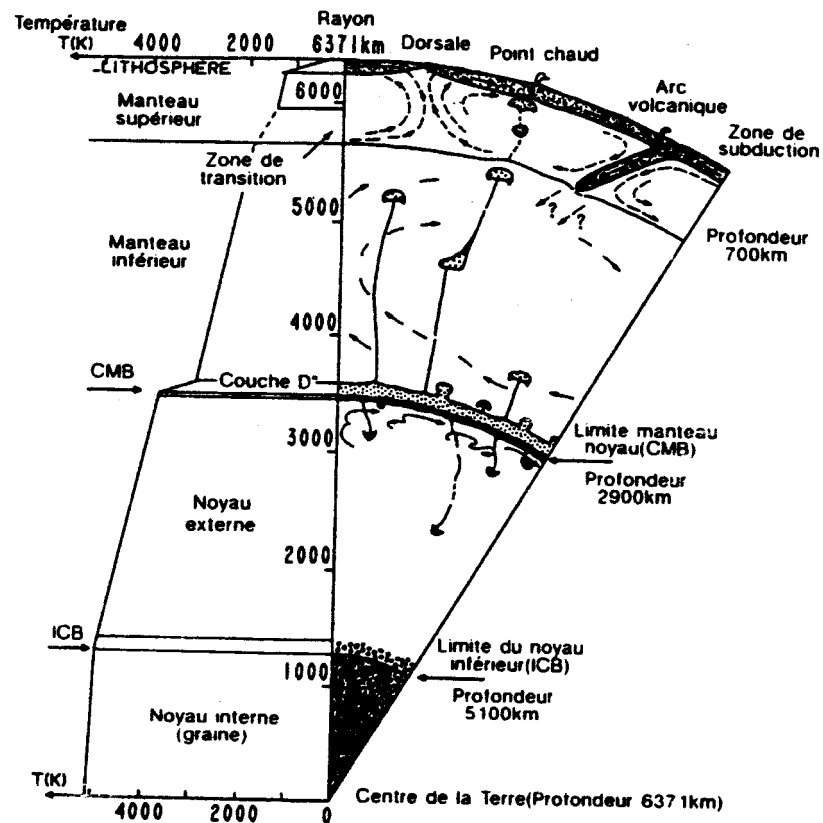


Fig. 2 : Structure interne de la Terre (Alexandrescu, 1996)

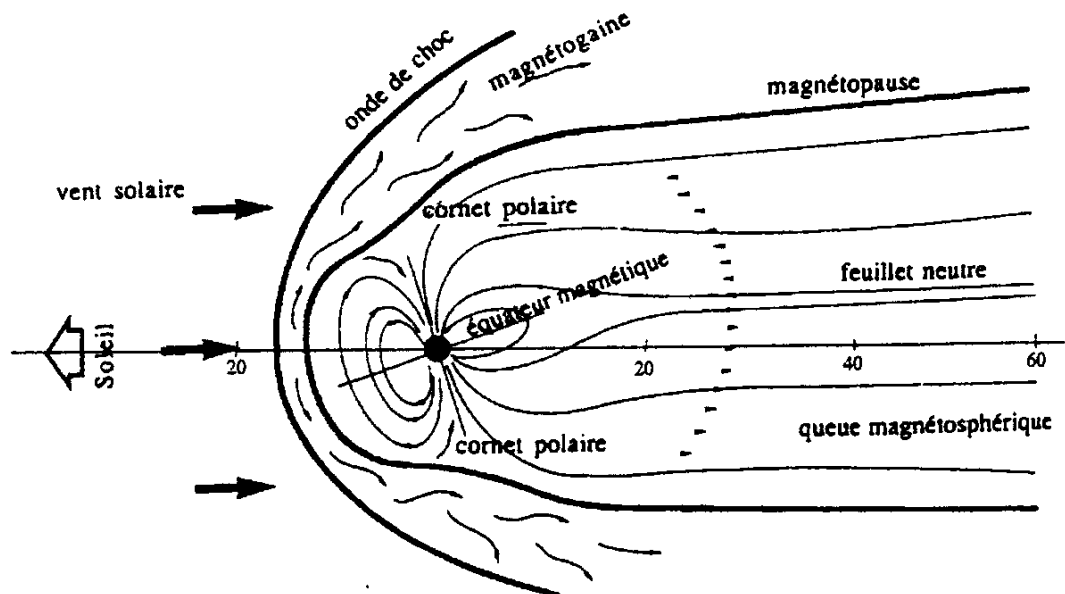


Fig. 3: La magnétosphère terrestre (Ultré-Guérard, 1996).

Nous nous intéressons, dans ce travail, aux variations transitoires du champ géomagnétique. Nous tenterons ainsi d'étudier ses caractéristiques et d'établir d'éventuelles relations entre les singularités du champ et l'activité solaire. Des corrélations ont depuis longtemps été observées entre l'état du Soleil et l'environnement électromagnétique de la Terre. L'activité solaire se manifeste, entre autres, par les orages géomagnétiques. Le vent solaire lié à cette activité peut quant à lui, à certaines périodes, causer des dommages matériels considérables.

Parmi les phénomènes astronomiques observés on trouve les taches solaires. Leur évolution spatiale et temporelle constitue un moyen d'accéder à la physique du Soleil, notamment la dynamo solaire ainsi qu'aux divers processus siégeant dans les différentes zones de convection (Usokin et al., 2001).

A l'instar de la prévision météorologique, la prédiction de l'activité solaire, notamment le nombre de taches solaires **ssn** et l'indice de l'activité géomagnétique **aa**, et de leur intensité est d'autant plus importante que l'homme utilise de plus en plus des engins spatiaux et des appareils de haute technologie sensibles aux humeurs du Soleil.

Dans ce cadre, notre travail consiste à étudier, à partir de l'analyse spectrale, les variations spatio-temporelles du champ géomagnétique, l'activité géomagnétique ainsi que l'activité solaire. Il s'agit de mettre en évidence les phénomènes non stationnaires du signal et ainsi détecter ses possibles singularités.

Différents ensembles et jeux de données sont utilisés. Les mesures collectées par les observatoires du réseau mondial InterMagNet-OMP permettent une surveillance du champ magnétique en quasi-temps réel (Alexandrescu, 1996). De même la disponibilité de séries chronologiques relativement longues des indices de l'activité géomagnétique tels que l'indice **aa** et le nombre de taches solaires **ssn** permettront de modéliser les phénomènes étudiés. Les données analysées sont les valeurs moyennes horaires des composantes géographiques X, Y et Z du champ géomagnétique de l'observatoire français de Chambon La Forêt (CLF). La période couverte par les mesures s'étale de 1993 à 1999. Rappelons que le réseau InterMagNet, dont l'observatoire de Tamanrasset est membre, relie actuellement une centaine d'observatoires (Fig. 4) à la surface de la Terre. Il fournit les mesures du champ magnétique terrestre en temps quasi-réel via les centres de transmission (GIN) (Fig. 5). Les données de champ géomagnétique sont disponibles avec différents échantillonnages, soient des valeurs moyennes minutes, soient des moyennes horaires ou des moyennes journalières (INTERMAGNET Technical Reference Manual, 1999). D'autres jeux de données utilisées dans notre travail sont représentées par Les

moyennes mensuelles du nombre de taches solaires **ssn** qui décrivent les différents cycles solaires depuis 1754 ainsi que les moyennes mensuelles des indices **aa** de l'activité géomagnétique depuis 1868.

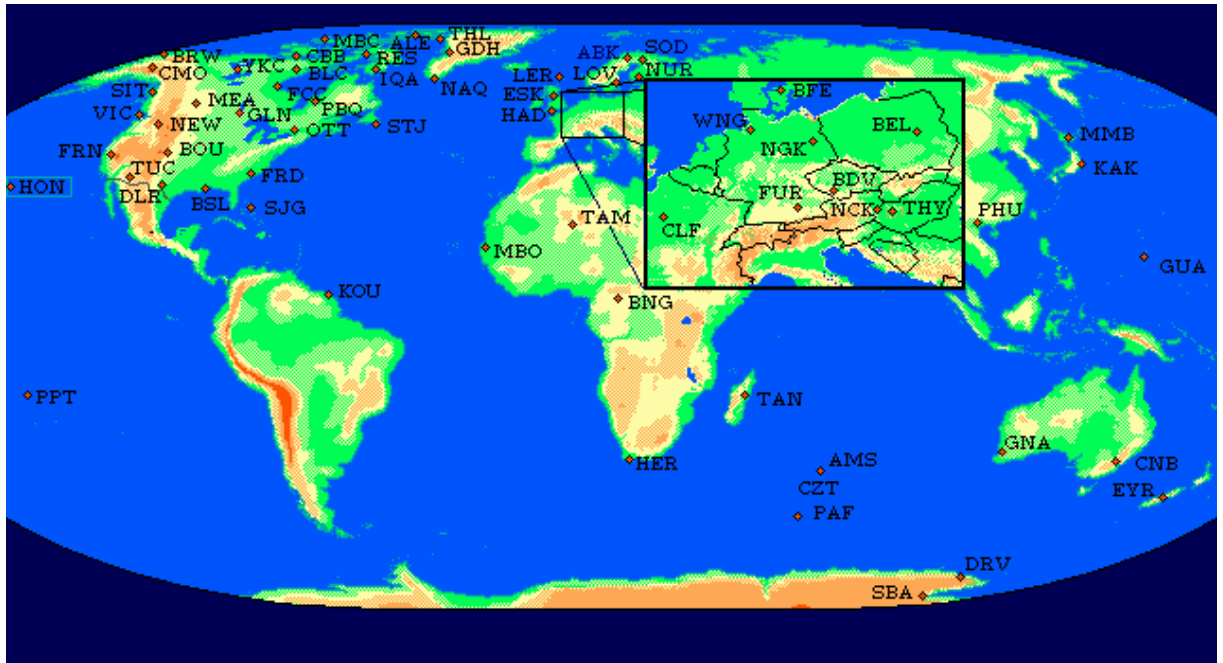


Fig. 4 : Distribution des observatoires InterMagNet (D'après CDROM Intermagnet, 1999).

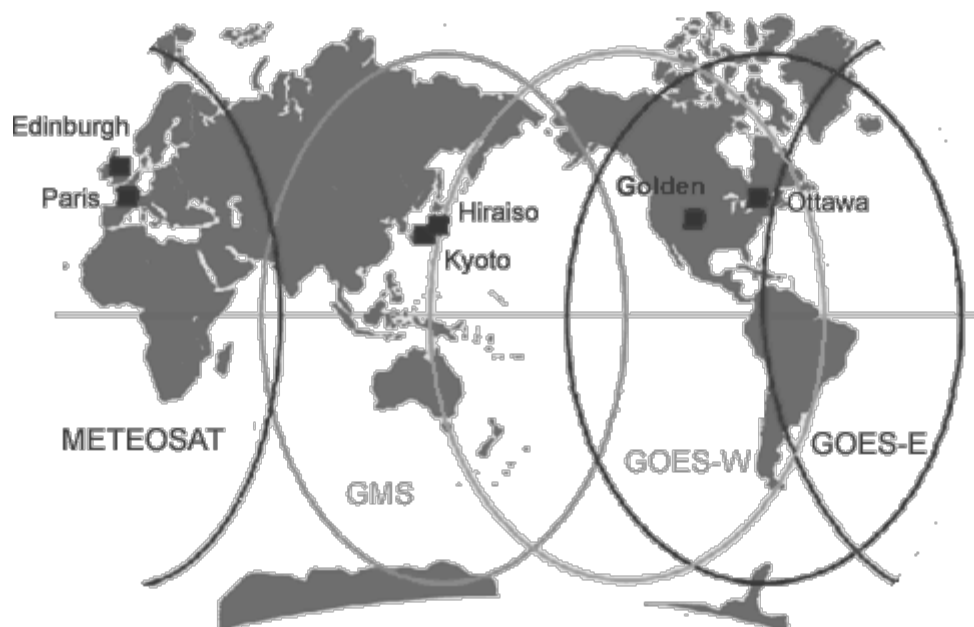


Fig. 5 : GINs et zones de couverture des satellites assurant la transmission des données (d'après INTERMAGNET Technical Reference Manual, 1999).

L'analyse de Fourier et la Transformée en Ondelettes Continues sont proposées et utilisées dans cette étude. L'analyse spectrale fournie par la TF révèle de manière précise les différentes périodes des composantes harmoniques contenues dans les différents signaux étudiés. Compte tenu des limites de cette méthode pour l'étude de phénomènes non stationnaires, nous utiliserons donc, la Transformée en Ondelettes Continues (TOC) qui fournit simultanément une résolution en temps et en fréquence.

Les séries chronologiques sont traitées dans le but de déterminer les singularités et d'éventuelles périodes caractéristiques des phénomènes solaires et/ou magnétiques, durant le cycle 22. Ce genre d'étude est d'autant plus important qu'il est clairement établi que les orages géomagnétiques peuvent provoquer des dommages économiques importants. En effet, les équipements électroniques des satellites peuvent être détruits, notamment l'électronique de commande. Le même danger pèse sur les fusées au moment du décollage. A titre d'exemple, rappelons que deux satellites de télécommunications canadiens ont cessé de fonctionner lors de l'orage de 1994. Les réseaux de communication, les stations de transformations électriques sont très sensibles à ce phénomène. Ainsi, suite à l'orage de mars 1989, la province du Québec est restée dans le noir pendant neuf heures ; privant ainsi six millions d'abonnés d'électricité. Une telle panne peut occasionner six milliards de dollars de perte. De même la corrosion des pipelines peut être accrue à cause des courants électriques induits par les orages géomagnétiques (Lilensten et al., 1999 et Allen et al., 1989).

Une description du champ géomagnétique terrestre, de ses variations et de l'activité solaire seront données dans le premier chapitre. Le second chapitre portera sur la description des données utilisées. Des généralités sur la Transformée en Ondelettes Continues (TOC) ainsi qu'un bref rappel sur la transformée de Fourier (TF) sont donnés dans le chapitre III. Le chapitre IV traitera de l'étude de la TF et la TOC du champ géomagnétique, notamment d'un modèle synthétique qui génère les variations du champ magnétique terrestre auquel sera appliqué la TOC dont les résultats seront interprétés. L'étude de l'influence du bruit contenu dans le signal sera réalisée. Les activités solaire et géomagnétique seront traitées dans le chapitre V. Des modèles synthétiques des différents cycles d'activité sont proposés et traités par la TOC. Quant aux données réelles, nous leur avons appliqué, dans un premier temps la TF pour mettre en évidence les phénomènes harmoniques. Il est clairement établi que l'activité solaire est un phénomène chaotique déterministe, de faible dimension (Usokin et al., 2001). L'analyse en ondelettes paraît ainsi être l'outil adapté à l'étude des singularités de l'activité solaire. Dans cette étude l'influence du bruit contenu dans le signal est

également étudiée. Une conclusion générale, dans laquelle nous donnerons des perspectives et des recommandations concernant la suite de ce travail, viendra achever ce mémoire.

Description des variations temporelles du champ magnétique terrestre

I. Description du champ magnétique terrestre

Le champ magnétique terrestre ($\vec{B}_t$), tel qu'il est mesuré à la surface de la Terre, résulte de la superposition de trois champs d'origines différentes (Le Mouél, 1976) ;

$$\vec{B}_t = \vec{B}_p + \vec{B}_c + \vec{B}_e$$

I.1. Contributions internes

$\vec{B}_p$ est le champ principal qui est d'origine interne. Il est généré par les mouvements de convections, à des profondeurs supérieures à 3000km, dans les couches externes fluides conductrices du noyau terrestre (Fig. 2). Le champ principal représente en moyenne 99% du champ total et caractérisé, tel qu'il est observé à la surface, par des longueurs d'ondes de l'ordre de plusieurs milliers de kilomètres (Le Mouél, 1976). Son intensité varie de 60000nT aux pôles à 30000nT à l'équateur. Sa variation temporelle se caractérise par des constantes de temps allant du siècle à la centaine de millions d'années. L'une représente la variation séculaire, elle même caractérisée par des variations rapides, de l'ordre d'une année, appelées sauts de variations séculaires (Alexandrescu, 1996) et l'autre concerne les inversions du champ (Courillot et al., 1988) et (Ultré-Guéard, 1996).

A cette composante principale s'ajoute le champ crustal $\vec{B}_c$ engendré par les roches aimantées de la croûte terrestre épaisse de 30 km, dont les composants magnétiques principaux sont l'hématite et la magnétite. L'intensité de ce champ varie de quelques dizaines à quelques centaines de nT et dépend fortement de la structure géologique locale (Hamoudi, 1996).

I. 2. Contributions externes

Le champ magnétique terrestre d'origine externe $\vec{B}_e$ résulte des courants circulants dans l'ionosphère et la magnétosphère. Il est caractérisé par de faibles amplitudes. Par temps magnétique calme, cette amplitude est de l'ordre de 10nT, et peut atteindre 1000nT par temps d'orages géomagnétiques. Les échelles de temps de ces variations s'étalent de la milliseconde au cycle undecennal (Courillot et al., 1988) ; (Ultré-Guérard, 1996) et (Mazaudier et al., 1990). A cette composante externe s'ajoute un champ magnétique secondaire induit $\vec{B}_i$ engendré, dans le manteau légèrement conducteur, par les courants électriques (Courillot et al., 1988) et (Ultré-Guérard, 1996).

Les courants ionosphériques sont engendrés par la circulation de particules ionisées dans la couche E de l'ionosphère à une altitude comprise entre 100 et 150km. Ces particules sont entraînées par un phénomène de marées thermiques et se concentrent du côté éclairé de la Terre. Leur activité s'intensifie à l'équateur formant un courant circulant d'Est en Ouest appelé "électrojet équatorial" (Gire, 1985) et (Ultré-Guérard, 1996).

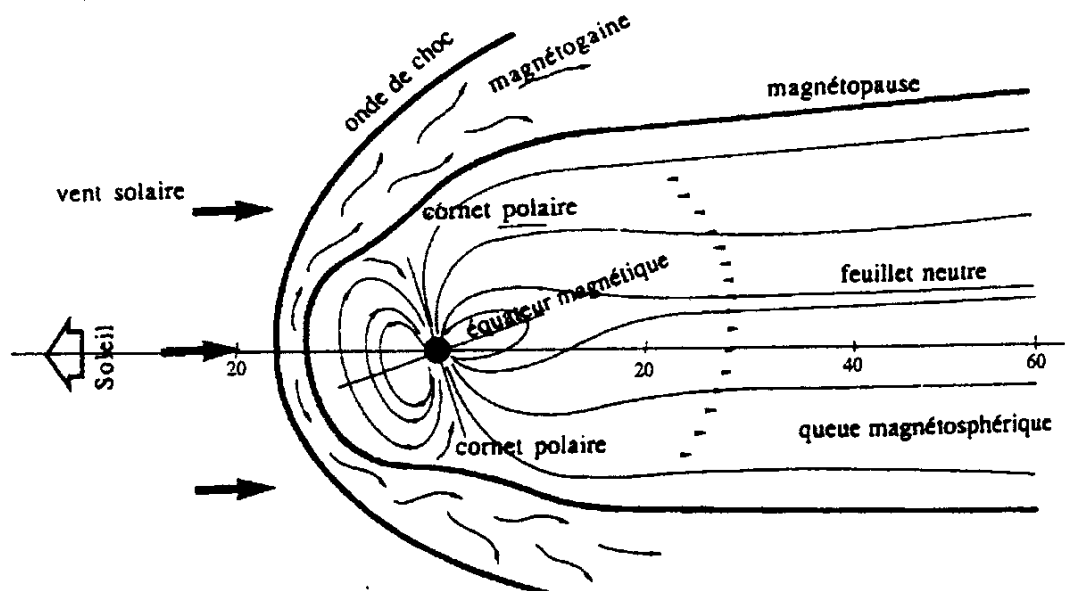


Fig. 3: La magnétosphère terrestre (Ultré-Guérard, 1996).

De plus, lors de l'éjection de la masse coronale^{*}, celle-ci se propage à grande vitesse dans tout l'espace interplanétaire formant ainsi le vent solaire. Ce dernier est de faible densité variant de 2 à 50 particules/cm³ sa vitesse varie de 300 à 1000 Km/s (Hamoudi, 1984) et composé, essentiellement, de protons, d'électrons et de noyaux d'Hélium avec des traces infimes d'ions d'éléments plus lourds, tels que l'Oxygène ou le Carbone. Lorsque ce flux de matières arrive, au bout de quelques heures (de l'ordre de 36 heures), au voisinage de la Terre (Lilenstein et al., 1999), il balaye les lignes de champ terrestre pour créer une cavité "la magnétosphère". Celle-ci est aplatie du côté jour et prend une forme très allongée sur plusieurs millions de kilomètres dans la direction opposée au Soleil, formant ainsi la "queue géomagnétique" (Fig. 3). La magnétosphère terrestre, protégeant notre planète des émanations solaires, est délimitée par la magnétopause, à l'intérieur de laquelle le champ magnétique terrestre est confiné (Ultré-Guérard, 1996). Malgré cette protection une infime partie des particules véhiculées par le vent solaire arrive à pénétrer dans l'atmosphère terrestre par la queue géomagnétique, et provoque ainsi des perturbations dans le champ magnétique terrestre qui se manifestent à la surface du globe par des orages géomagnétiques, des sous orages, des baies géomagnétiques ainsi que d'autres phénomènes (telle que la variation diurne).

Dans la variation temporelle de la composante externe du champ géomagnétique, nous distinguons des variations dont certaines sont régulières et d'autres irrégulières. Parmi les variations transitoires régulières, nous distinguons les variations journalières solaires et lunaires. On admet que ces variations sont dues à la présence permanente des sources. Ce qui signifie qu'il existe un phénomène dont l'intensité ne s'annule jamais, mais fluctue lentement autour d'une valeur moyenne (Mayaud, 1978). Quant aux variations irrégulières, elles sont dues à des sources de champ qui n'existent pas en permanence. L'intensité d'une telle source commence par une valeur nulle, atteint un maximum et finit par s'annuler (Mayaud, 1978).

Chaque composante du champ géomagnétique total, décrite ci-dessus, contient des informations très variées et constitue un domaine de recherche et d'études. L'étude du champ magnétique d'origine externe conduit notamment à une meilleure connaissance des mécanismes de circulation des courants électriques dans l'ionosphère et la magnétosphère (Cohen, 1989) et (Ultré Guérard, 1996).

^{*} Masse coronale : Matière éjectée (plasma) à partir de la couronne solaire.

II. Variations temporelles du champ géomagnétique d'origine externe.

Les variations temporelles des contributions externes au champ magnétique terrestre ont une large gamme de variations, celles-ci vont de 24h et 24h 50mn, dans le cas de variations journalières solaire et lunaire, respectivement (Courtillot et al., 1988) et (Bilge et al., 1997), pour atteindre une périodicité de 22 ans qui est le double du cycle de l'activité solaire (Courtillot et al., 1988) et (Nevanlinna et al., 1994), en balayant des périodes de 27 jours, 1 an, 6 mois et 11 ans ainsi que leurs harmoniques (Fig. 7a, 6b). Différents auteurs (Nevanlinna et al., 1994) soupçonnent l'existence d'une périodicité du champ magnétique d'origine externe de l'ordre du siècle liée au cycle de l'activité solaire de 90 ans.

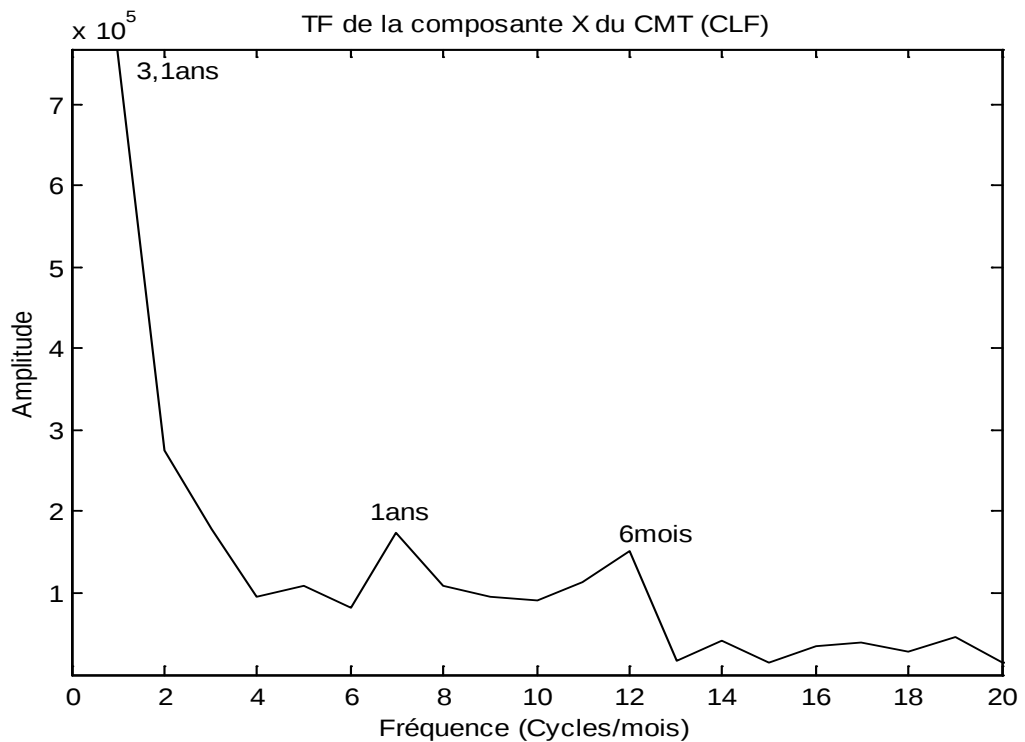


Fig. 7a : Périodicités comportées dans le champ magnétique terrestre. Obtenues à partir de la TF des valeurs moyennes horaires de X pour la période 1993-1999 (observatoire de Chambon la Forêt (CLF)).

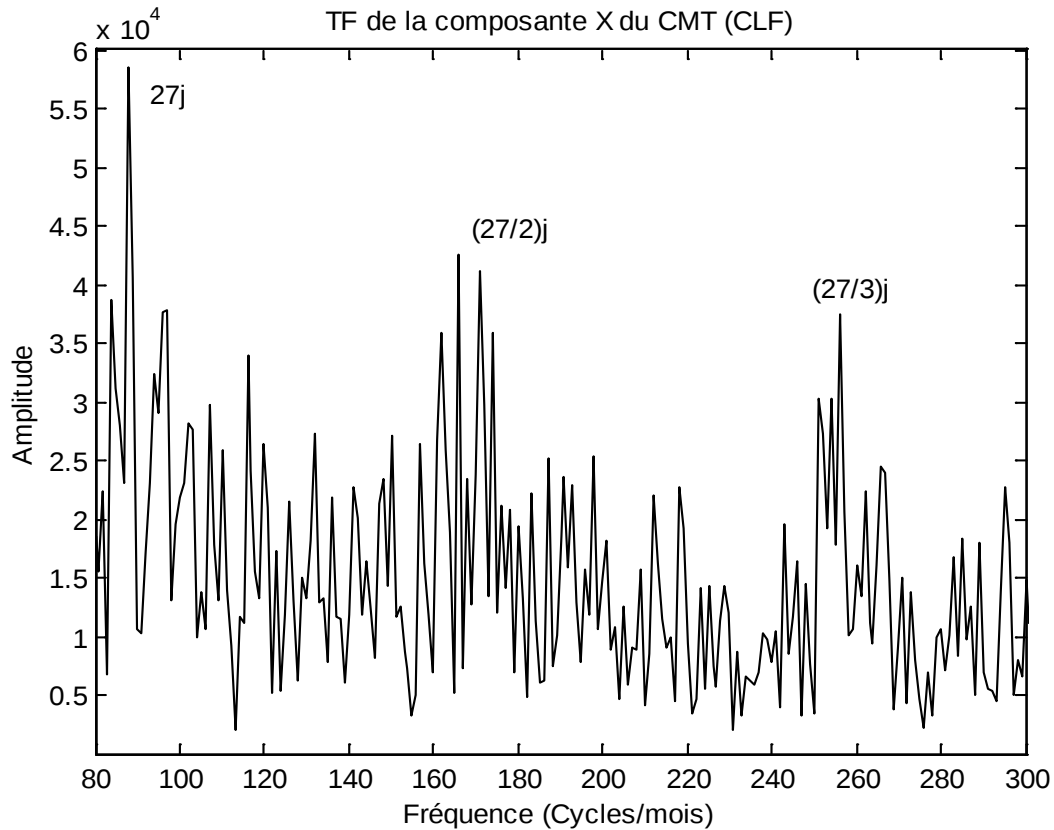


Fig. 7b : Périodicités comportées dans le champ magnétique terrestre. Obtenues à partir de la TF des valeurs moyennes horaires de X pour la période 1993-1999 (observatoire de Chambon la Forêt (CLF)).

II.1. Les variations journalières

Les variations journalières solaires et lunaires sont des variations régulières de la composante transitoire du champ magnétique terrestre (Mayaud, 1978) et (Courillot et al., 1988). La variation journalière solaire S_R dont l'amplitude est de quelques dizaines de nanoteslas, est variable avec la saison, l'activité solaire et est également fonction du lieu, du temps sur une période de 24 heures (Le Mouél, 1976) ; (Courillot et al., 1988) et (Bilge et al., 1997). A cette variation s'ajoute la variation journalière lunaire, qui se produit régulièrement avec une période de 24h 50mn et dont l'amplitude est de l'ordre du 1/10 de celle de la variation journalière solaire (S_R), elle est souvent masquée par cette dernière (Bilge et al., 1997).

II.2. La variation de 27 jours et ses harmoniques

La variation de 27 jours est la signature de la période de rotation du Soleil (SR). Etant donné qu'elle est différentielle, les spectres de raies qui lui sont associés sont groupés dans une gamme temporelle de 22 à 30 jours (Nevanlinna et al., 1994). On peut aussi distinguer dans le spectre de raies des sous harmoniques de cette période de l'ordre de $27/2$ (~14 j) jours et $27/3$ (9 j) jours (Fig. 7b) (Courtilot et al., 1988) et (Nevanlinna et al., 1994).

II.3. Les variations d'un an, six mois et leurs harmoniques

La variation semi annuelle de l'activité géomagnétique, due au mécanisme de couplage puissant du vent solaire avec la magnétosphère au printemps et à l'automne, montre des pics d'activité autour des mois d'équinoxe (mars et septembre) et une faible activité pendant les mois de solstice (juin et décembre). On relève une tendance saisonnière similaire en considérant le taux d'occurrence des grands orages magnétiques (Fig. 8) (Nevanlinna et al., 1993a). Dans ce processus les facteurs clefs sont la composante sud du champ magnétique interplanétaire qui contrôle le processus de couplage, et la distribution de la vitesse du vent solaire dans le plan de l'écliptique (Nevanlinna et al., 1993a) et (Cliver et al., 2002).

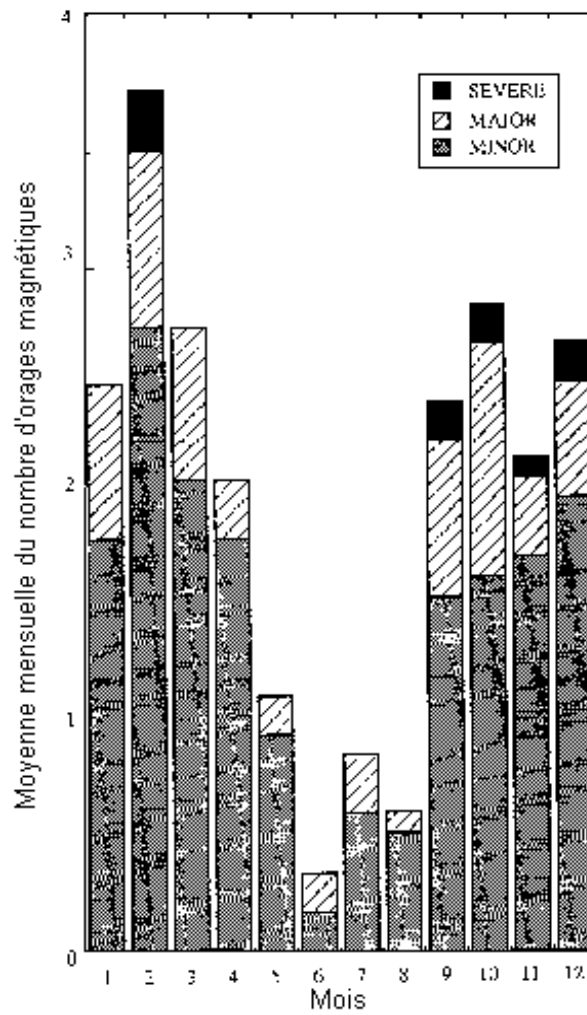


Fig. 8 : Distribution moyenne mensuelle des orages géomagnétiques. Observatoire d'Helsinki Finlande (Nevanlinna et al., 1993a).

L'examen du spectre de fréquence que nous avons calculé, à partir de mesure de X à l'observatoire du champ géomagnétique à Chambon la Forêt révèle l'existence d'une variation annuelle (Fig. 7a). Celle-ci résulte de la variation annuelle de la latitude de l'anneau de courant (Malin et al., 1976). Quant à celle de six mois, elle correspond à l'activité géomagnétique durant les mois d'équinoxe (mars et septembre) et de solstice (juin et décembre).

II.4. Le cycle de 11 ans

La périodicité du cycle à 11 ans est liée à l'activité solaire et géomagnétique. Le cycle undecennal est déterminé par le nombre de taches solaires qui présente elle-même une variation cyclique. La variation de 22 ans est le double du cycle de l'activité solaire, son origine est liée à l'inversion des pôles du champ magnétique du Soleil.

III. Activité géomagnétique et description des orages géomagnétiques

III.1. Activité géomagnétique

Les variations transitoires irrégulières des contributions externes au champ magnétique terrestre constituent l'activité géomagnétique (Mayaud, 1978). En effet, d'extraordinaires variations dans le champ magnétique terrestre ont été notées depuis le milieu du XIX siècle. Ces variations brusques sont appelées "orages géomagnétiques". Aux observatoires de basses latitudes, il fut observé que la composante horizontale H du champ magnétique terrestre décroît de façon spectaculaire en intensité et recouvre son état initial par la suite (Campbell, 1996). Cette diminution en intensité de la composante H est due à l'augmentation de particules piégées dans la magnétosphère. Ces particules donnent naissance à un anneau de courant, par le déplacement des ions de minuit vers le crépuscule, et des électrons de minuit vers l'aube (Fig. 9) (Gonzalez et al., 1994).

L'activité géomagnétique est, par ailleurs, directement liée au nombre de taches solaires **ssn** (sunspot number) cette activité est quantifiée par l'indice de l'activité géomagnétique **aa**. En effet, l'apparition d'un niveau élevé de l'activité géomagnétique ainsi que des orages, peut être détectée à partir des phases de hausse et de baisse du nombre de taches solaires, des dates d'occurrence des maxima et minima de taches solaires et leur nombre maximal (Nevanlinna et al., 1993b).

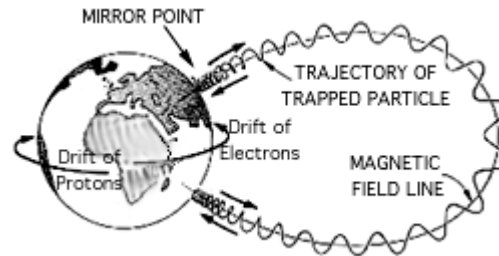


Fig. 9 : Courant annulaire.

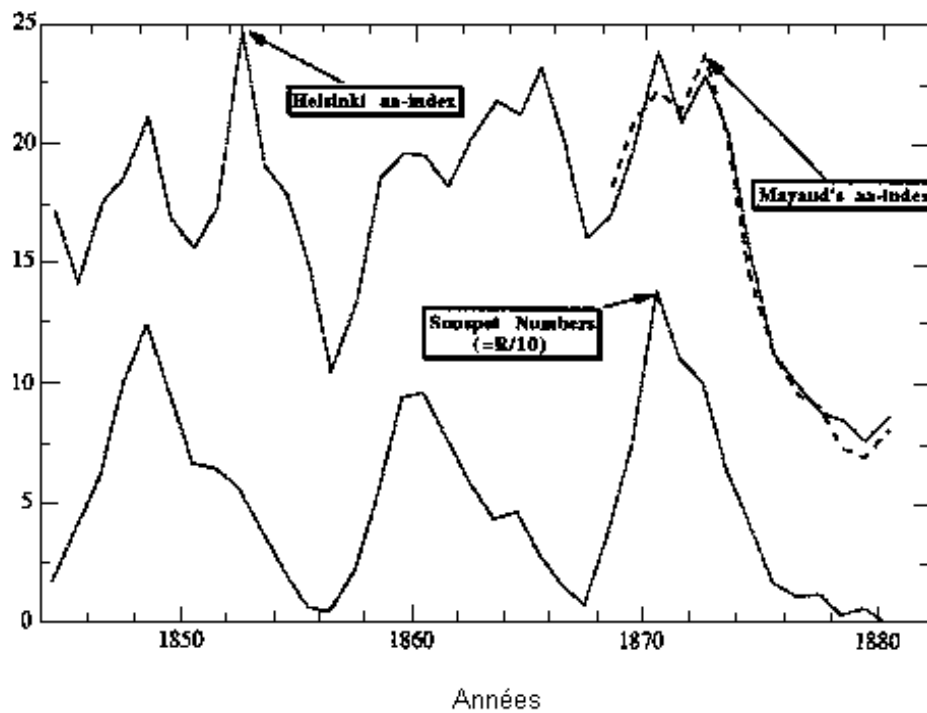


Fig. 10: Corrélation entre le niveau de l'activité à un minimum de l'activité magnétique et le prochain maximum du nombre de taches solaires (Nevanlinna et al., 1993b).

Il en résulte des mesures du champ magnétique terrestre et de l'observation du nombre de taches solaires que la variabilité à long terme de **ssn** et de l'indice **aa** est comparable ainsi qu'on peut le constater par l'examen de la figure 10. La distribution des indices **aa** présente toutefois un double pic: une activité magnétique maximale se manifeste près du maximum de taches solaires (Nevanlinna et al., 1993a) ; (Nevanlinna et al., 1993b) et (Vennerstroem, 2000), un second maximum apparaît plusieurs années plus tard pendant la phase de baisse du nombre de taches solaires et les époques de minimum d'activité (Nevanlinna et al., 1993a) et (Nevanlinna et al., 1993b). Les deux pics observés dans la variation des indices **aa** sont dus à deux phénomènes: le premier maximum apparaît quand les orages magnétiques associés aux ondes de choc du vent solaire dominant le comportement de l'activité. Les sources de ce type de perturbations magnétiques sont des régions actives près des taches solaires en association avec les changements rapides du champ magnétique multipolaire du Soleil (Nevanlinna et al., 1993b). Quant au deuxième pic, il est principalement dû aux orages récurrents générés par des courants très rapides du vent solaire émis par les protubérances équatoriales des trous coronaux polaires (Vennerstroem, 2000) et (Nevanlinna et al., 1993b).

Il serait tentant de conclure que, la hausse observée dans l'activité géomagnétique est due à une augmentation de la vitesse moyenne du vent solaire, près de la Terre. L'augmentation de l'activité géomagnétique à long terme peut aussi bien être dû à une augmentation générale de la composante verticale du champ magnétique interplanétaire (Vennerstroem, 2000).

III.2. Description des orages géomagnétiques

III.2.1. Définition d'un orage géomagnétique

Rappelons qu'un orage géomagnétique est la réponse de la magnétosphère à l'impact d'un flux intense du vent solaire dans laquelle l'intensité et la direction du champ magnétique varient de manière complexe (Perreault et al., 1978). La décroissance, de la composante horizontale du champ géomagnétique à moyenne et basse latitudes ($\delta H \leq -50\text{nT}$) est principalement due au développement de l'anneau de courant équatorial (Iyemori et al., 1996) et (Gonzalez et al., 1994).

· Protubérances: Flammes qui s'élèvent de la surface du Soleil.

On sait que l'activité géomagnétique, donc les orages géomagnétiques sont dus à différents mécanismes pendant les deux phases des cycles de taches solaires; la fréquence d'occurrence des orages possède deux périodes où les orages sont très forts, l'une dans la phase ascendante du cycle et l'autre lors de sa phase descendante (Fig. 11) (Nevanlinna et al., 1993a) et (Gonzalez et al., 1994). Les orages géomagnétiques associés à la première phase sont souvent de courte durée (1 à 2 jours) et d'intensité élevée (Nevanlinna et al., 1993a). Typiquement, pendant la phase descendante, les orages magnétiques durent plusieurs jours mais atteignent rarement des intensités élevées (Nevanlinna et al., 1993a) et (Vennerstroem, 2000).

Le nombre d'orages pendant une période donnée est souvent calculé (Vennerstroem, 2000) comme étant le nombre de fois où des indices géomagnétiques tels **aa** ou **Dst** (disturbed storm) dépassent un seuil déterminé. Le nombre d'orages ainsi défini est très bien corrélé avec le niveau moyen de l'activité géomagnétique.

On serait ainsi tenté de conclure que le nombre d'orages par an détermine le niveau annuel de l'activité, or le nombre d'orages, défini par un seuil absolu, est déterminé par le niveau général de l'activité (Vennerstroem, 2000).

III.2.2. Classement des orages par intensité

Pour distinguer les perturbations dites "orages" de celles qui ne le sont pas, des indices à long terme de l'activité magnétique tel que l'indice **Dst** sont calculés afin de déterminer l'intensité des orages (Iyemori et al., 1996) ; (Campbell, 1996) et (Gonzalez et al., 1994). Pour des orages intenses, l'indice **Dst** peut être égal ou inférieur à -100nT, les orages modérés ont un indice qui varie entre -50nT et -100nT, quant aux orages faibles un Dst allant de -30nT à -50nT leur est attribué (Gonzalez et al., 1994).

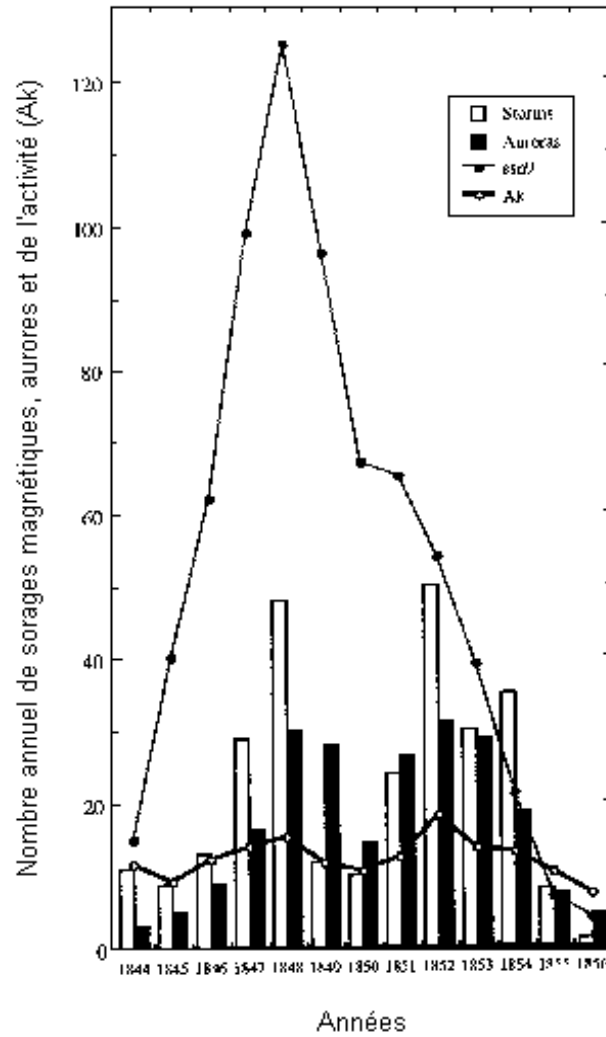


Fig. 11: Distribution annuelle d'orages magnétiques à Helsinki, du nombre de taches solaires, des aurores en Suède, et les amplitudes locales Ak (Nevanlinna et al., 1993a).

III.2.3. Distribution des orages par saison et cycle solaire

Comme l'activité géomagnétique possède une variabilité saisonnière avec des maximas aux équinoxes (Nevanlinna et al., 1993a) les orages intenses ont eux aussi une distribution saisonnière (Fig. 12) mais dont l'origine n'est pas encore connue. Comparés à l'activité géomagnétique qui tend à croître pendant la phase descendante du cycle solaire ou près d'un minimum solaire, les orages intenses montrent deux pics durant un cycle solaire. Certains sont en avance ou coïncident avec le maximum

solaire et d'autres surviennent 2 ou 3 ans plus tard (Nevanlinna et al., 1993b) et (Gonzalez et al., 1994).

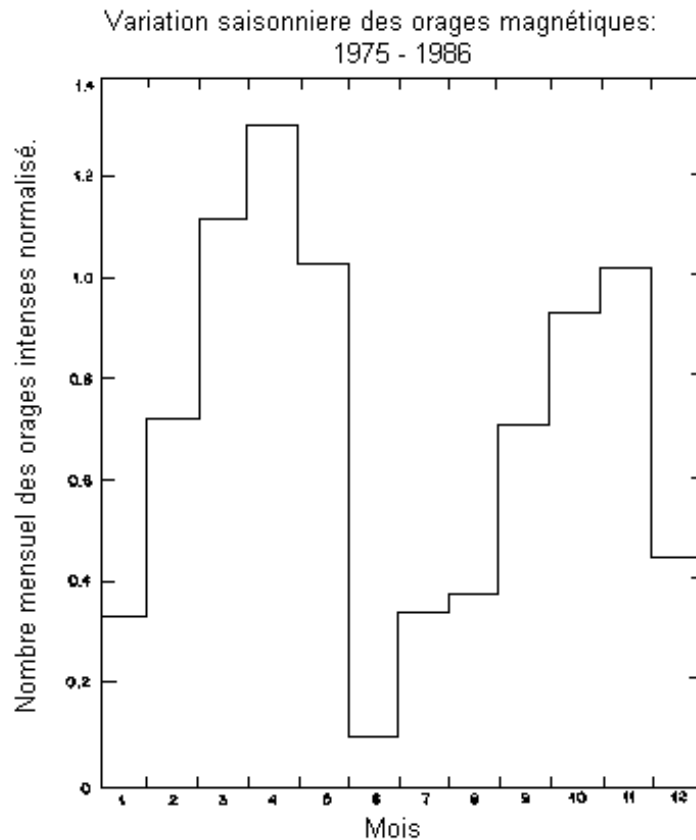


Fig. 12: Distribution saisonnière des orages intenses ($Dst < -100nT$) sur la période 1975 - 1986 (Gonzalez et al., 1994).

III.2.4. Les types d'orages géomagnétiques

Les orages géomagnétiques sont classés en deux catégories :

- le type "standard"
- le type à "début progressif"

Chaque type est caractérisé par trois phases: la "phase initiale", la "phase principale" et la "phase de recouvrement" (Perreault et al., 1978) et (Campbell, 1996).

Les orages de type standard se caractérisent par une croissance de la composante horizontale H du champ magnétique terrestre à basse latitude de manière discontinue comme une fonction escalier après un orage à début brusque (**ssc**) pour demeurer pendant quelques heures sur le niveau initial stable. Cette phase positive est appelée phase initiale, elle est suivie de la phase principale caractérisée par une décroissance spectaculaire en magnitude de la composante H (Fig. 13). La différence

de magnitude avec le niveau stable est plus grande dans ce cas que dans la phase initiale. Une fois que la valeur minimale est atteinte, la composante horizontale revient graduellement à son état initial stable. Cette phase est appelée phase de recouvrement (Perreault et al., 1978) et (Mayaud, 1978).

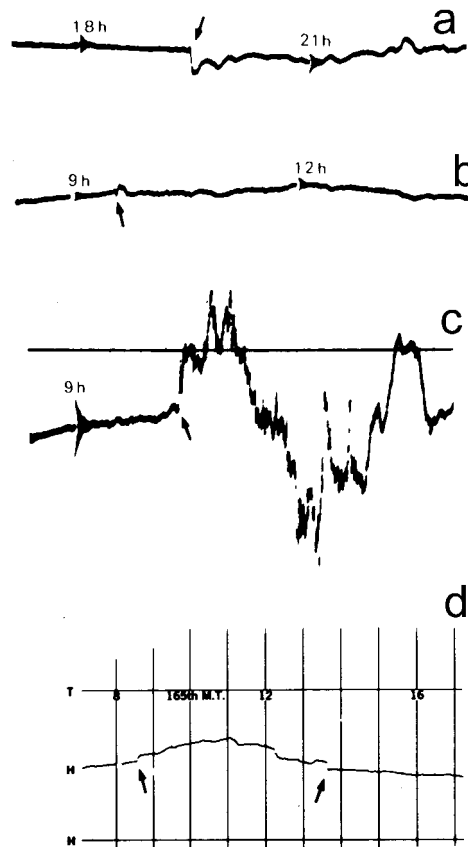


Fig. 13: Exemple de ssc's et si's observés dans l'enregistrement de la composante H à la station subaurorale Val Joyeux (a, b et c). On observe la décroissance de la composante H dans les trois cas de figures. Les intensités respectives des ssc's sont respectivement : +19, +13 et +59 nT. (d) correspond à deux si's à Honolulu, une station de basse latitude. On remarque la croissance de la composante H (Mayaud, 1978).

Les orages géomagnétiques de la seconde catégorie (encore à début progressif) ne semblent pas commencer brusquement, mais pendant la phase principale, leurs caractéristiques sont essentiellement les mêmes que celles du type standard (Perreault et al., 1978).

Le développement des orages géomagnétiques varie d'un orage à un autre. Certains d'entre eux présentent un début brusque (**ssc**) intense et une longue phase

· Observatoire de Chambon la Forêt actuellement.

initiale (~10 heures) avec une phase principale insignifiante. D'autres, par contre, ont une phase initiale courte avec une très longue phase principale (Perreault et al., 1978).

Pendant et après la période maximale du développement de la phase principale, les sous orages, définis comme étant des processus transitoires initialisés dans la partie non éclairée de la Terre dans laquelle une quantité significative d'énergie dérivée de l'interaction vent solaire–magnétosphère est déposée dans l'ionosphère aurorale et la magnétosphère (Iyemori et al., 1996), tendent à provoquer une plus grande asymétrie du champ à basse latitude que pendant la phase de développement rapide. En particulier un grand changement positif dans la composante H apparaît très tôt dans le secteur du matin (Perreault et al., 1978).

III.2.5. Relation entre orages et sous orages géomagnétiques

On a toujours supposé que d'intenses sous orages se manifestent pendant la phase principale des orages magnétiques. Or les sous orages peuvent apparaître indépendamment d'un orage magnétique (Gonzalez et al., 1994).

Cependant, les orages et les sous orages sont étroitement liés, en ce sens que les deux se développent quand la composante sud du champ magnétique interplanétaire est intense. Bien que le phénomène soit très complexe, il existe toutefois deux hypothèses^{*}, quant à la relation champ magnétique interplanétaire, orage géomagnétique et sous orage.

Dans la première, on suppose que la composante sud du champ magnétique interplanétaire génère des sous orages et les particules injectées à l'intérieur de la magnétosphère dans le processus sous orage forme l'anneau de courant; ainsi, la fréquente occurrence des sous orages est la cause d'un orage géomagnétique défini par le développement de l'anneau de courant (Iyemori et al., 1996).

Dans le cas de la deuxième hypothèse, on suppose que les deux phénomènes sont dus à une convection magnétosphérique rehaussée sous les conditions de la composante sud du champ magnétique interplanétaire. Ainsi, l'injection de particules associées à une convection rehaussée du champ électrique, de l'aube vers le crépuscule, provoque la formation de l'anneau de courant en période d'orages, et les sous orages sont des processus indépendants ayant la même origine, ceci explique que l'afflux de l'énergie du vent solaire est contrôlé par la composante verticale du champ magnétique interplanétaire (Iyemori et al., 1996) et (Gonzalez et al., 1994).

^{*} Les deux hypothèses sont valables compte tenu des explications données par (Iyemori et al., 1996).

Description des données

I. Nombre de taches solaires

Les taches solaires (**ssn**) sont un indicateur de la variabilité de l'activité solaire au cours du temps. Il y a 3000ans de cela, les chinois furent les premiers à les observer, à l'œil nu, et constater leur variabilité. L'invention du télescope, au XVII siècle, en a permis l'étude systématique.

I.1. Caractéristiques des taches solaires

Les taches solaires sont des zones d'ombres à la surface du Soleil qui ont, en général, des dimensions caractéristiques variant entre 1800 et 2500Km. Elles produisent des champs magnétiques intenses, de l'ordre de 0,3T, au centre, et décroît à 0,1T à l'extérieur. Ces taches apparaissent entre 30° et 35° de latitude autour de l'équateur (Fig. 14) (Vigouroux, 1996).

I.2. Calcul du nombre de taches solaires

Heinrick Schwabe (1789-1875) fût le premier, en 1848, à annoncer que le nombre de taches solaires variait avec une périodicité probable de 10ans. Ce qui fût confirmé par Rudolph Wolf (1816-1893) en étudiant toutes les données disponibles sur les taches. Wolf affina la période moyenne du cycle de 11ans. Il introduisit le nombre relatif de taches solaires, connu sous le nom de "nombre de Wolf" ou de "Zürich", **Rz**, qu'il définit ainsi (Vigouroux, 1996):

$Rz=K(10g+f)$; où:

g est le nombre de régions perturbées (soit par des groupes, soit par des taches individuelles);

f est le nombre de taches individuelles;

k est un coefficient de pondération. Ce coefficient dépend de la méthode utilisée par l'observateur pour le comptage des taches et leur subdivision en groupes. Il dépend de la taille du télescope, du grossissement employé, et des conditions d'observatoires. Ce coefficient est inférieur à 1.

Les données du nombre de taches solaires sont actuellement disponibles en moyennes journalières, mensuelles et annuelles, et distribuées systématiquement sur les sites web tel que (www.ngdc.noaa.gov).

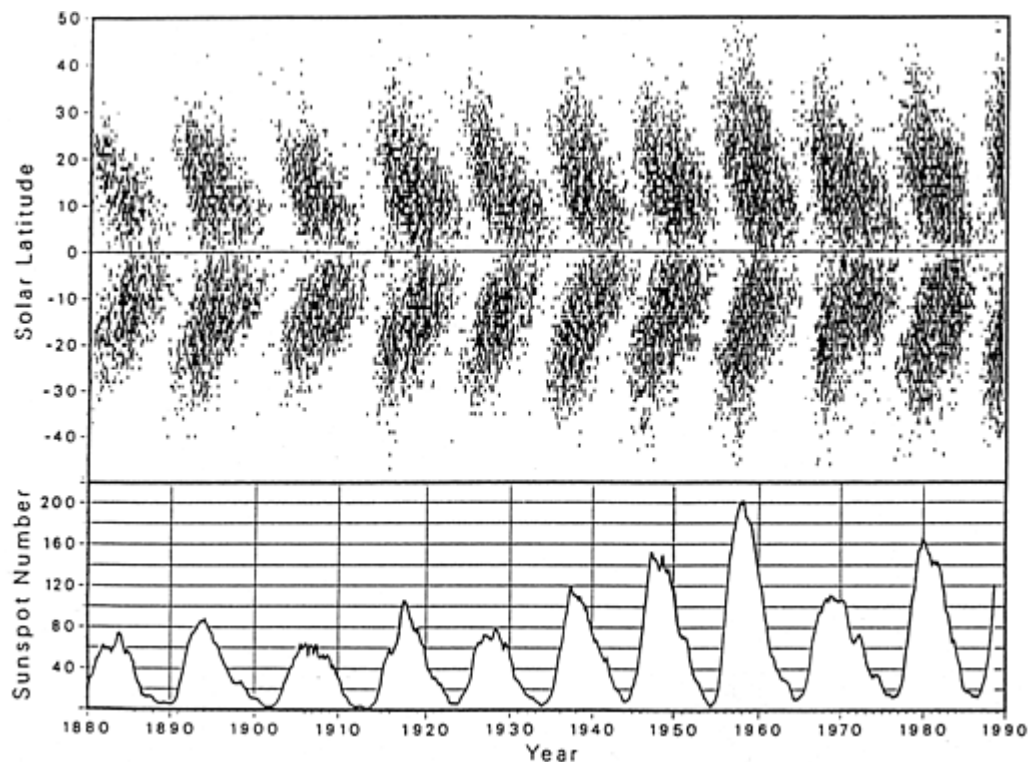


Fig. 14 : Variation temporelle de l'activité solaire (Vigouroux, 1996).

1.3. Description des cycles de taches solaires

Chaque cycle de taches solaires est différent des autres. La figure 15 montre la distribution temporelle de la moyenne mensuelle du nombre de taches solaires sur la période 1754-1997. On constate que la longueur des différents cycles varie de 9 et 13,6ans. En moyenne, la durée de la phase ascendante est de 4,4ans, celle de la phase descendante est de 6,5ans. De plus, une activité importante implique en

moyenne un cycle court alors que les cycles longs sont représentatifs d'une faible activité (Vigouroux, 1996).

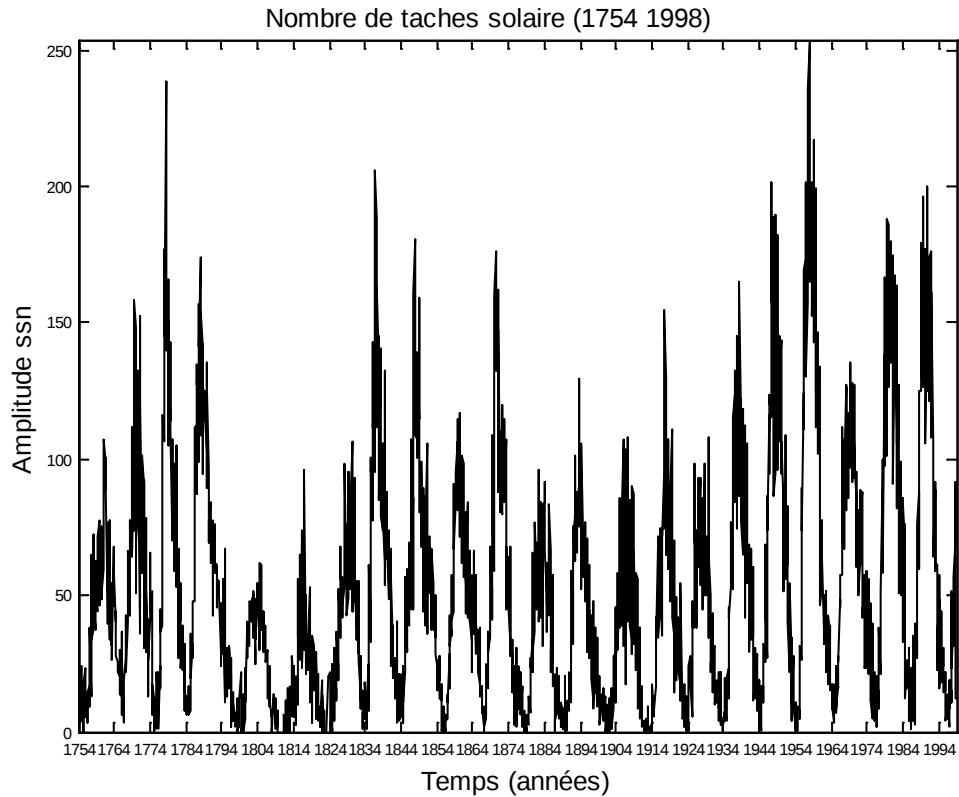


Fig. 15: Distribution temporelle de la moyenne mensuelle du nombre de taches solaires (*ssn*) 1754-1997.

II. Les indices aa

Les indices d'activité magnétique **aa** sont déterminés à partir de données de deux observatoires géomagnétiques antipodaux. L'un situé dans l'hémisphère Nord et le deuxième dans l'hémisphère Sud. Les premières données datent de 1868.

Pour chaque intervalle tri horaire, les indices K sont calculés en deux observatoires et transformés en amplitude, une valeur de l'indice **aa** est obtenue par la moyenne des valeurs obtenues à partir de deux stations. Les observatoires qui fournissent les indices aa sont donnés dans le tableau 1 ci-dessous avec, entre parenthèses, leur coefficient de confiance (Table 1).

Hémisphère Nord			Hémisphère Sud		
Période de transmission	Observatoire	Latitude	Période de transmission	Observatoire	Latitude
1868-1925	Greenwich (1,007)		1868-1919	Melbourne (0,967	
1926-1956	Abinger (0,934)		1920-1979	Toolangui	
1957-...	Hartland (1,059)	50,0°	1980-...	Canberra (1,084)	45,2°

Table 1 : Observatoires et périodes de détermination des indices **aa**. Les valeurs entre parenthèses représentent le coefficient de confiance des données.

Les indices **aa** données en nanoTesla (nT), représentent le niveau d'activité géomagnétique sur le globe (Fig. 16).

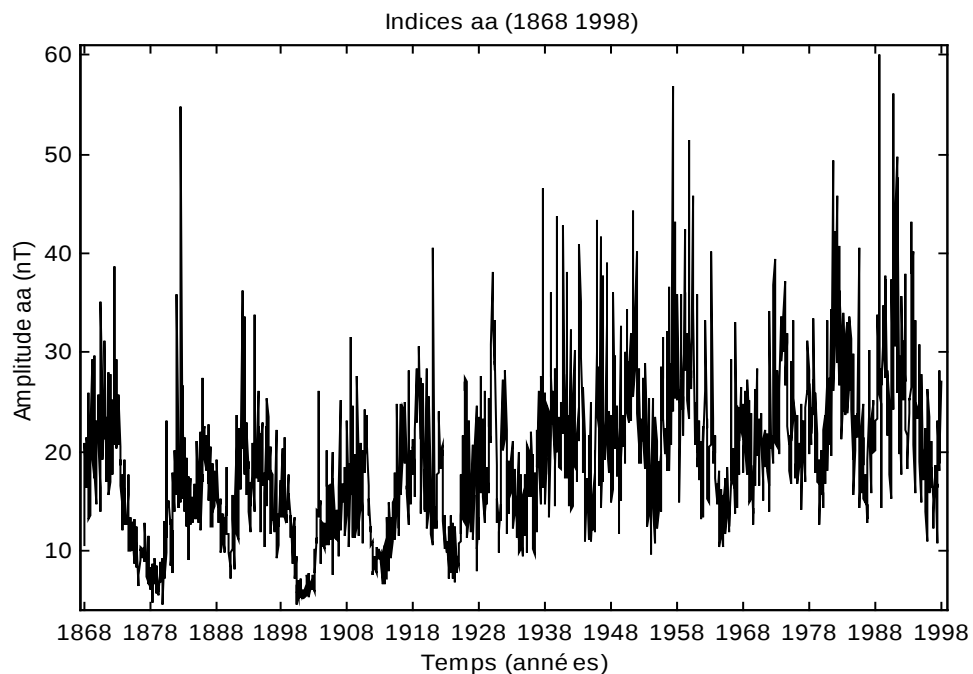


Fig. 16: Distribution temporelle des moyennes mensuelles des indices de l'activité géomagnétique (**aa**) exprimées en nT pour les périodes 1868-1998.

III. Programme InterMagNet et données de champ géomagnétique

La distribution des observatoires magnétiques sur le globe est très irrégulière. Un grand nombre d'observatoires est disposé en Europe et dans l'hémisphère nord, alors que le reste du monde comme l'Afrique, l'Asie, l'Amérique du sud, le Groenland ainsi que les océans sont marqués par une très faible distribution des observatoires (Fig. 17). Les changements d'instrumentation, de sites, de méthodologies et d'opérateurs ne permettent pas de disposer de jeux de données homogènes et de même qualité pouvant être utilisés pour le calcul de modèles planétaires précis. Cette situation a rendu plus que nécessaire l'établissement d'un réseau mondial d'observatoires magnétiques obéissant à des normes scientifiques et permettant d'acquérir des données de champ magnétique en temps quasi réel et continue (Alexandrescu, 1996).

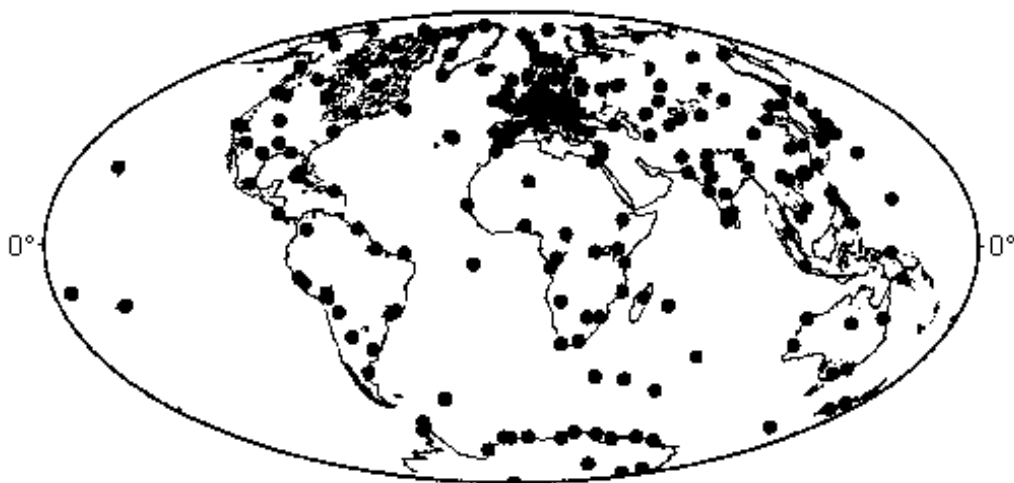


Fig. 17: Distribution des observatoires ayant procuré au moins une valeur annuelle entre 1970-1995 (Alexandrescu, 1996).

III.1. Programme InterMagNet

Le programme InterMagNet (International real-time Magnetic observatory Network) fût le premier réseau à être mis en service dès le début de la décennie 90 (Alexandrescu, 1996). Ces observatoires dont le nombre est en constante augmentation d'année en année, étaient de 41 observatoires en 1991 atteint une

centaine d'observatoires en 2003. La distribution reste cependant plus concentrée dans l'hémisphère nord que dans l'hémisphère sud et les océans (Fig. 4).

Parmi les objectifs d'InterMagNet qui est un programme mondial non exclusif d'échange entre les observatoires magnétiques, citons:

- rendre disponible, via les centres d'information géomagnétiques régionaux GINs^{*} (Geomagnetic Information Nodes) (Fig. 5), les données de champ des observatoires membres 72 heures après leur acquisition.
- L'établissement et le maintien des observatoires dans des régions lointaines où manque un soutien local.
- Participation à l'établissement et la maintenance des observatoires numériques dans les pays en voie de développement, et à l'amélioration de la science locale et de la technologie.
- Transmission des données, à partir d'observatoires ou instituts opérants, en temps quasi réel, au GINs régionaux via les satellites ou réseaux informatiques.
- Les données collectées et mises à la disposition de la communauté scientifique devront répondre au format exigé par le programme InterMagNet. L'usage commercial de ces données est strictement interdit.
- Collaboration entre les institutions participantes pour produire des modèles ou indices globaux.

Une nouvelle catégorie d'observatoires est donc apparue: "les observatoires géomagnétiques InterMagNet" (IMOs) dont l'observatoire de Tamanrasset (Algérie) en fait partie. Ces observatoires doivent être en mesure de fournir les valeurs du champ magnétique toutes les minutes. Le format de données est défini par le programme InterMagNet (Appendice A). Les enregistrements doivent être accompagnés par des mesures absolues. Les caractéristiques des instruments doivent répondre aux normes suivantes qui sont exigées par ce programme (Table 2) (Alexandrescu, 1996 et INTERMAGNET, Technical Reference Manual, 1999).

^{*} Les GINs fonctionnent à Edimbourg (UK), Golden (USA), Ottawa (Ca), Kyoto (Ja) et Paris (Fr).

	Variomètres	magnétomètres scalaires (à protons)	Instrument de mesure absolue
Résolution	0,1nT	0,1nT	0,1nT
Précision	± 10 nT 95% données préliminaires ± 5 nT données définitives	1nT	5 secondes d'arc
Dynamique	6000nT régions aurorales et équatoriales 2000nT régions de latitudes moyennes		
Stabilité	5nT/an		
Echantillonnage	5 secondes	30 secondes	

Table 2: Tableau décrivant les caractéristiques des instruments de mesures utilisés par le programme InterMagNet.

Les données InterMagNet sont disponibles tant sous forme numérique que graphique. A titre d'exemple on peut retrouver une présentation sur le serveur <http://ub.nmh.ac.uk/forminfo.html>.

III.2. Détermination des éléments géomagnétiques

Les variations temporelles des composantes géographiques X, Y et Z du champ géomagnétique sont obtenues à partir de magnétomètre vertical fluxgate. L'intensité du champ est par contre obtenue en utilisant un magnétomètre scalaire. Pour des raisons de commodités expérimentales, le magnétomètre vectoriel n'est utilisé que comme variomètre. Deux étapes sont alors nécessaires pour déterminer les mesures absolues des composantes du champ. Dans un premier temps des mesures absolues sont réalisées à un instant donné. Et en second lieu, un niveau arbitraire appelé "ligne de base" est choisi, par rapport auquel un enregistrement continu des variations des éléments en fonction du temps est établi (Fig. 18) (Alexandrescu, 1996).

· combinaisons d'un magnétomètre scalaire et un DI-FLUX.

Les valeurs E_0 de la ligne de base des magnétogrammes sont déterminées à partir des mesures absolues. Ce qui permet de déterminer les valeurs des éléments du champ géomagnétique à tout instant.

La détermination de la valeur de la ligne de base (réduction d'une observation à la ligne de base) est donnée par l'expression suivante: $E_0 = E_{abs} - \Delta E$

Où,

E_0 est la valeur de base attachée au niveau arbitraire;

E_{abs} est la valeur absolue mesurée;

ΔE est l'écart entre la valeur mesurée et la valeur attachée à la ligne de base.

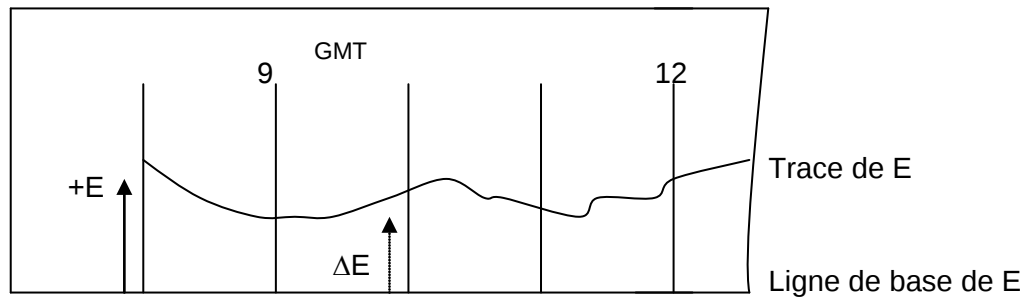


Fig. 18: Détermination d'un élément géomagnétique E, à partir des enregistrements continus et sa ligne de base (Alexandrescu, 1996).

La détermination de la ligne de base $E_0(t)$ va permettre le calcul de la valeur absolue à tout instant de l'élément $E_{abs}(t)$:

$$E_{abs}(t) = E_0(t) + \Delta E(t)$$

La valeur E_0 varie dans le cas où le variomètre dérive au cours du temps. Une nouvelle ligne de base est alors déterminée en traçant une courbe passant au mieux par les valeurs E_0 (Fig. 19) (Alexandrescu, 1996).

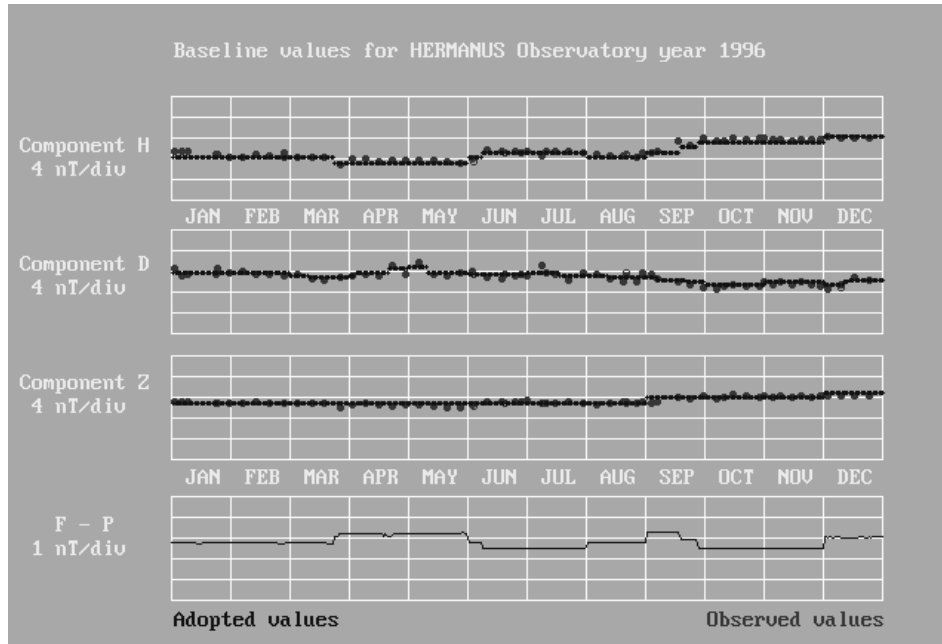


Fig. 19: Lignes de base des composantes H, D, Z obtenues à l'observatoire d'Hermanus (HER) en Afrique du Sud (d'après CDROM InterMagNet 1996).

Les lignes de base relatives à chaque composante nous renseignent sur la qualité des observations et des observatoires. Dans cette étude nous utilisons les données de champ géomagnétique de l'observatoire français de Chambon la Forêt (CLF France) reconnu pour la très bonne qualité de ces mesures, telles que le met en évidence la distribution des lignes de base (Fig. 20). Une précision de 0,5nT est garantie par les instruments modernes et par un nombre de mesures absolues suffisamment important pour bien caler les variomètres (Alexandrescu, 1996).

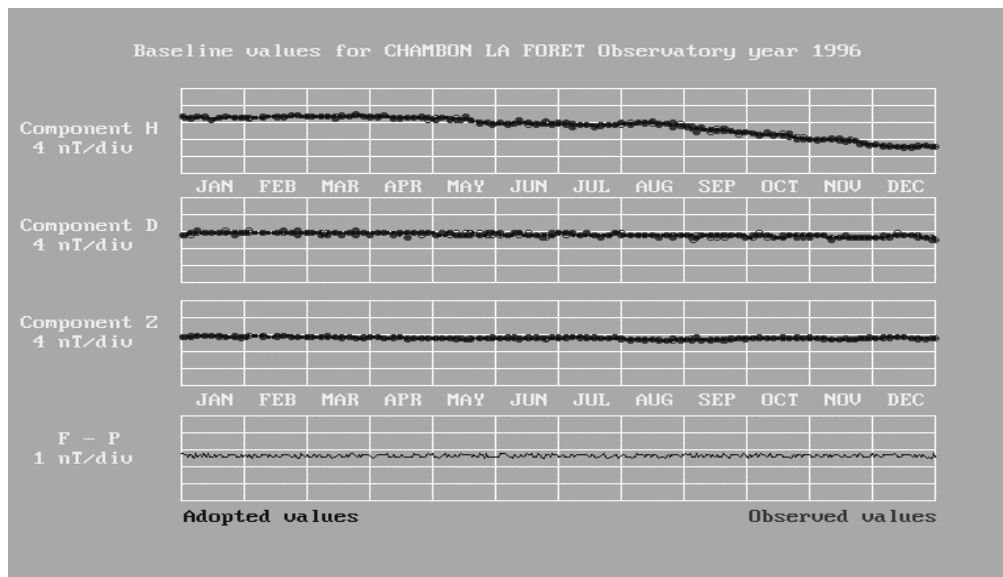


Fig. 20: Lignes de base des composantes H, D et Z obtenues à l'observatoire Chambon la Forêt (CLF) en France (d'après CDROM InterMagNet 1996).

III.3. Echantillonnage des données InterMagNet

Les données InterMagNet sont échantillonnées toutes les 5 secondes. Ce qui permet le calcul de valeurs moyennes minute. Afin de minimiser "l'aliasing" dû aux plus hautes fréquences dans la série finale des données; un filtre gaussien est appliqué sur des séries de 19 valeurs séparées par un intervalle de temps régulier de l'ordre de 5 secondes. Le 1^{ier} et le dernier coefficients de ce filtre sont, respectivement, appliqués 45 secondes avant et après la minute ronde. Ce filtre est inclus dans la partie analogique du magnétomètre et agit ainsi avant la conversion du signal analogique en signal numérique (INTERMAGNET, Technical Reference Manual, 1999).

Théorie générale sur l'analyse en ondelettes continues

Introduction

Bien que la Transformée de Fourier (TF) soit un outil d'analyse spectrale très efficace, et possède une résolution fréquentielle parfaite (Gregoris et al., 1994) dans l'analyse de signaux. Cette transformation est cependant limitée, car elle propose une approche globale du signal (Truchetet, 1998). Le problème ne se pose pas pour des signaux stationnaires car les caractéristiques globales des fréquences sont les mêmes en tout point du signal temporel (Gregoris et al., 1994) mais ce n'est pas le cas quand il s'agit des signaux non stationnaires (Vigouroux, 1996) et (Gregoris et al., 1994). En effet, la plupart des signaux réels ne sont pas stationnaires et une large partie de l'information qu'ils contiennent réside justement dans cette non stationnarité (Gibert, 1996) ; (Truchetet, 1998) et (Mallat et al., 1992). Cette limite consiste, donc, dans l'incapacité de la TF à localiser, dans le temps, les singularités contenues dans un signal (Vigouroux, 1996) et (Truchetet, 1998), d'où la nécessité de développer une méthode qui permettrait une analyse temps-fréquence ou temps-échelle (Gregoris et al., 1994). Cette méthode renseignerait sur le contenu fréquentiel tout en préservant la localisation temporelle ou spatiale (Truchetet, 1998) et (Vigouroux, 1996).

Haar, en 1910, a été le premier à publier les premières ondelettes (Gibert, 1996), cependant, le nom d'ondelettes n'était pas encore utilisé, on parle alors de "paléo-ondelettes" (Truchetet, 1998). Ce fut le tour de plusieurs mathématiciens, physiciens, et surtout ingénieurs de développer des approches de l'analyse en ondelettes dans leur domaines respectifs. On parle dans leur cas de "pré-ondelettes" (Truchetet, 1998). Enfin, le point de départ de l'analyse en ondelettes telle qu'elle est connue actuellement, fut donné par Jean Morlet en 1983 dans ses travaux d'analyse des signaux sismiques (Daubechies, 1992) ; (Gibert, 1996) et (Truchetet, 1998), et il fût le premier à proposer le nom d'ondelettes (Truchetet, 1998). Peu de temps après, une synthèse de toutes ces différentes approches est faite et fût très fertile pour tous les domaines concernés (Daubechies, 1992).

Le terme "ondelettes" vient du fait que les fonctions utilisées doivent être localisées et oscillantes. Elles ressemblent donc à une onde, mais étant localisées, elles sont alors de petites ondes d'où "ondelettes" (Vigouroux, 1996).

La transformée en ondelettes est un outil qui permet de décomposer des signaux (données, fonctions ou opérateurs) en différentes composantes fréquentielles, et étudie alors chaque composante avec une résolution adaptée à son échelle (Daubechies, 1992) et (Truchetet, 1998).

La transformée en ondelettes est très adaptée à la détection de singularités. En effet, tout changement brutal dans un signal sera précisément localisé pour des dilatations suffisamment petites (Fig. 21). Cette capacité d'adaptation aux plus fins détails l'a faite surnommer 'le microscope mathématique' (Gibert, 1996).

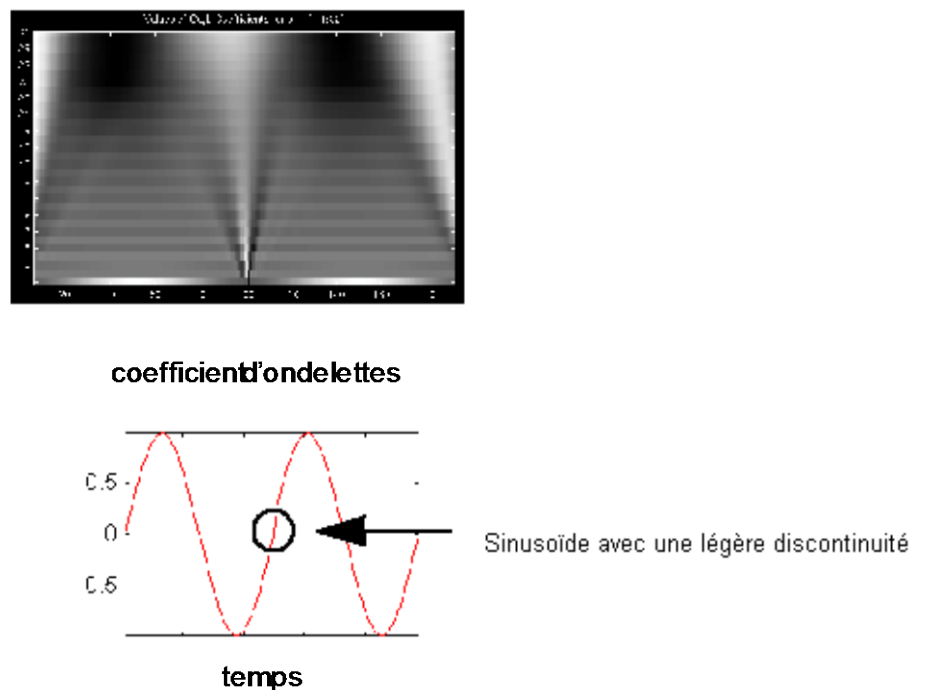


Fig. 21: Puissance de localisation de très fines discontinuités par l'analyse en ondelettes (d'après CDROM Matlab).

I. Définition et propriétés d'une ondelette

Soit $\psi(t)$ une fonction non nulle définie dans $L^1(\mathbb{R})$, et $\tilde{\psi}(\omega)$ sa transformée de Fourier. Pour que $\psi(t)$ soit une ondelette, il faut qu'elle vérifie, dans le domaine fréquentiel, la condition d'admissibilité suivante (Mallat, 2000) et (Daubechies, 1992):

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\tilde{\psi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty \quad \text{avec} \quad \tilde{\psi}(\omega) \text{ la transformée de Fourier de } \psi(t) \text{ et } \omega$$

représente la fréquence, et

$$\tilde{\psi}(0) = \int \psi(t) dt = 0 \quad (1)$$

Ceci signifie que ψ , l'ondelette analysante appelée aussi ondelette mère, est de moyenne nulle (Gibert, 1996 et Truchetet, 1998) et qu'elle doit être localisée aussi bien en temps qu'en fréquence (Bouchereau, 1997), autrement dit, nulle ou presque hors d'un intervalle de temps borné (Moreau, 1995). Un grand nombre de fonctions satisfont cette condition pour sa souplesse. Pour cela des conditions supplémentaires, de régularité, de décroissance rapide ou de compacité, sont souvent imposées (Bouchereau, 1997) et (Moreau, 1995).

A partir de l'ondelette analysante on définit, par opérations de translation et de dilatation (ou contraction), selon que le facteur échelle a est supérieur (ou inférieur) à 1, une famille d'ondelettes $\psi_{a,b}$ normalisée en L^2 (Bouchereau, 1997) dite aussi famille de fonctions analysantes (Truchetet, 1998).

Toute fonction de carré intégrable peut être représentée en fonction d'une famille d'ondelettes.

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad a \in \mathbb{R}^{*+}, b \in \mathbb{R} \quad (2)$$

La normalisation L^1 permet d'obtenir un rehaussement des hautes fréquences du signal et en particulier les singularités qui apparaissent aux échelles très fines ($a \ll 1$). La définition la plus utilisée (Bouchereau, 1997) est donnée par:

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{2} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad a \in \mathbb{R}^{*+}, b \in \mathbb{R} \quad (3)$$

On peut lier le facteur d'échelle a à la fréquence. En le faisant varier, l'ondelette couvre des gammes de fréquences différentes (Daubechies, 1992): si $a > 1$ l'ondelette sera plus étalée et correspondra donc à une fréquence plus faible, si $a < 1$ l'ondelette sera plus étroite et correspondra à une fréquence plus élevée que celle de l'ondelette

mère (Fig. 22). b est le paramètre de translation (Bouchereau, 1997) ; (Daubechies, 1992) et (Gregoris et al., 1994), le faire varier permet une meilleure localisation temporelle (Daubechies, 1992). Il est à noter qu'une meilleure localisation fréquentielle pour l'ondelette entraîne une moins bonne localisation spatiale ou temporelle (Fig. 22) et (Fig. 23) et inversement.

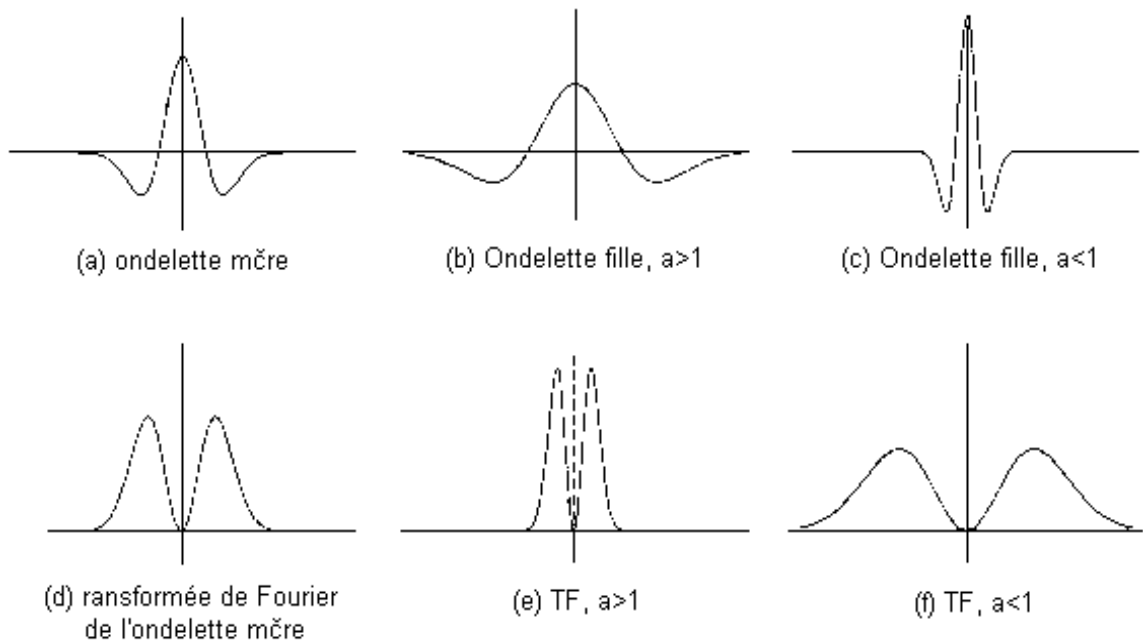


Fig. 22: Exemples d'ondelettes pour plusieurs facteurs d'échelle et leur transformée de Fourier (Bouchereau, 1997)

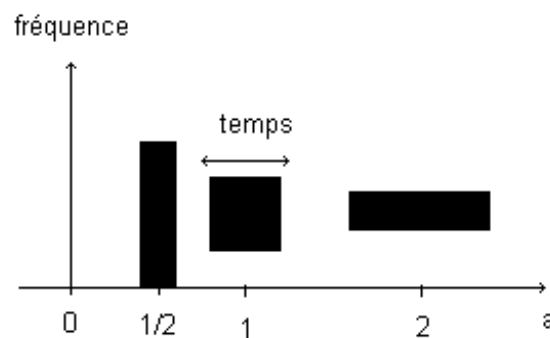


Fig. 23: Représentation de la localisation temporelle et fréquentielle d'une ondelette en fonction de a (Bouchereau, 1997).

Le choix de l'ondelette analysante n'est pas facile. Il convient donc de bien cerner le problème à étudier.

II. Transformée en ondelettes continues

La transformée en ondelette décompose, par translation et dilatation, les signaux en composantes à différentes fréquences et permet d'étudier alors chaque composante avec une résolution qui correspond à son échelle (Daubechies, 1992) ; (Truchetet, 1998) et (Mallat et al., 1992).

La localisation et la caractérisation des singularités sont meilleures avec la transformée en ondelettes continue dont la translation est invariante et permet une convergence optimale sur les variations rapides présentes dans le signal (Moreau, 1995) ; (Mallat et al., 1992) et (Alexandrescu, 1996). Ce qui nous a conduit à choisir l'analyse en ondelettes continues dans la détection de singularités du champ magnétique terrestre ainsi que dans l'activité solaire et l'activité géomagnétique.

La transformée en ondelettes est comparable à un microscope mathématique polarisé positionné en b , d'agrandissement (a^{-1}). On a déjà vu que plus le facteur d'échelle a est important, plus l'ondelette est étalée (Fig. 24). Pour un facteur d'échelle assez grand, la représentation des coefficients d'ondelettes en fonction de b (la position) donne une représentation de "la forme générale de la fonction" (comme si on regardait la fonction de loin). Et pour mettre l'accent sur les singularités on choisit un facteur d'échelle faible (Fig. 24) (Bouchereau, 1997) et (Gregoris et al., 1994).

II.1. Propriétés de la transformée en ondelettes continues

Pour qu'une fonction soit une ondelette, elle doit satisfaire quelques propriétés (Daubechies, 1992) et (Mallat, 2000):

- La conservation de l'énergie empêche toute perte d'informations entre la fonction et sa transformée ce qui permet la reconstruction du signal initial à partir de l'inversion.

$$\int |f(t)|^2 dx = \iint |Wf(a,b)|^2 \frac{1}{a^2} da db \quad (4)$$

- La transformée en ondelettes est linéaire, invariante en translation et dilatation. Elles sont données par, respectivement :

$$W(\alpha f_1 + \beta f_2) = \alpha Wf_1 + \beta Wf_2, \quad (\alpha, \beta) \in \mathbb{C}^2, (f_1, f_2) \in L^2(\mathbb{R})^2 \quad (5)$$

$$W(\tau_{b'} f)(a, b) = Wf(a, b - b') \quad (6)$$

$$W(\delta_k f)(a, b) = Wf(ka, kb) \quad (7)$$

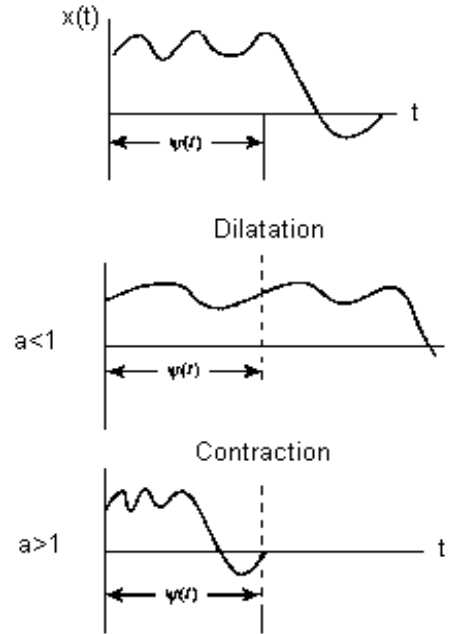


Fig. 24: Illustration du facteur d'échelle, (Gregoris et al., 1994).

II.2. Caractérisation de la régularité d'une fonction

La régularité d'une fonction aide à caractériser le phénomène physique étudié. Or la transformée en ondelettes continue permet de mesurer cette régularité (Mallat, 2000).

Soit f une fonction bornée sur $\mathbb{R}$ telle que

$$\exists C > 0, \quad |f(x) - f(y)| \leq C|x - y|^\alpha, \alpha \in]0, 1]$$

Si la fonction f est de régularité $\alpha \in]0, 1]$ alors la transformée en ondelettes continues aux petites échelles permet de mesurer cette régularité. La régularité α permet de caractériser le phénomène physique étudié.

III. Quelques ondelettes et leurs principales caractéristiques

III.1. Le chapeau mexicain

Le "Chapeau mexicain" est une ondelette réelle construite à partir de la dérivée seconde d'une gaussienne (Fig. 25) (Truchetet, 1998), elle est donc issue d'une ondelette ce qui la rend très souple à la détections des discontinuités (Bouchereau,

$$1997): \psi(x) = \frac{2}{\sqrt{3}} \pi^{-1/4} (1 - x^2) \exp(-x^2/2) \quad (8)$$

III.2. L'ondelette de Mexider

L'ondelette de Mexider est une ondelette réelle dont l'expression algébrique est simple. Elle est construite à partir de la dérivée troisième de la gaussienne, ce qui la rend, également souple à la détection des discontinuités (Fig. 26) (Alexandrescu, 1996).

$$\psi(x) = \frac{d^3}{dx^3} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) \quad (9)$$

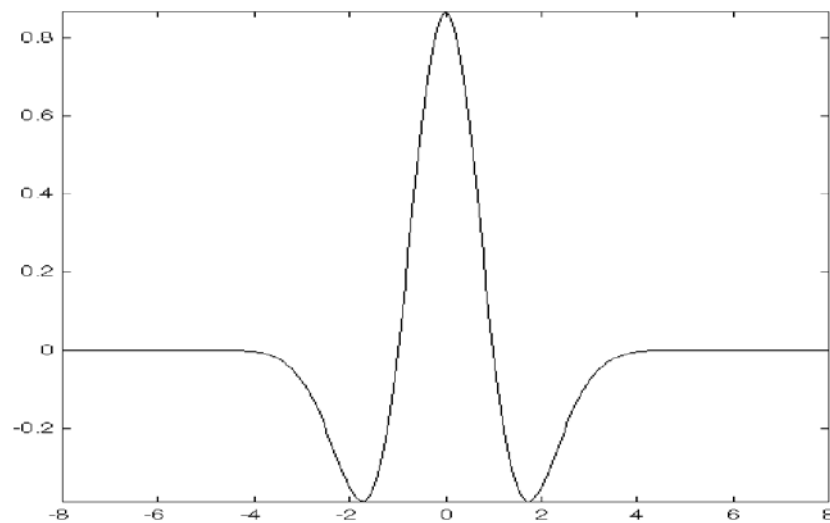


Fig. 25: Ondelette "Chapeau mexicain"

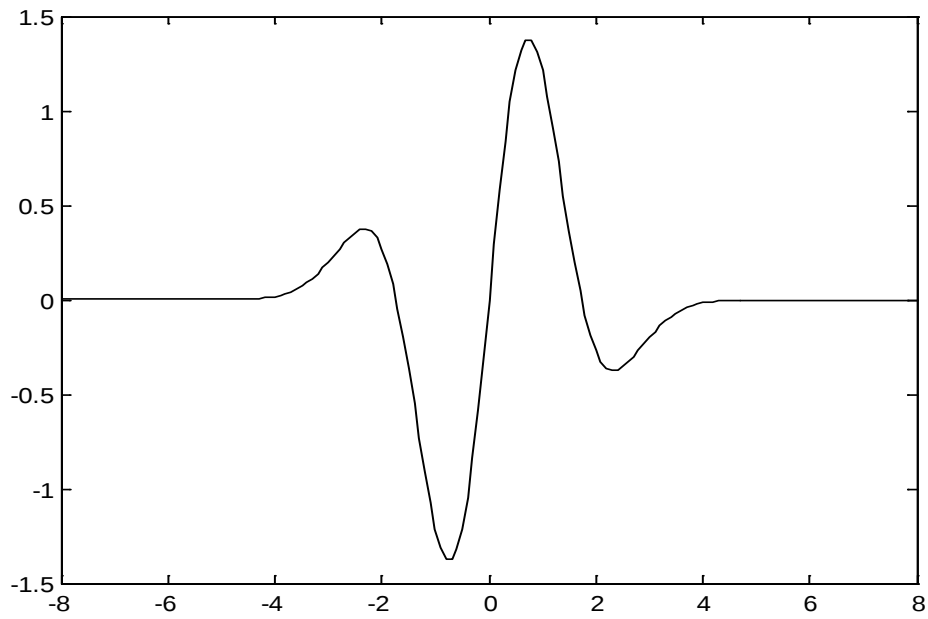


Fig. 26: Ondelette de Mexider.

Ces deux ondelettes sont utilisées dans notre étude. La première est utilisée dans la détection des singularités comportées dans les signaux de taches solaires (**ssn**) et des indices de l'activité géomagnétique (**aa**). Quant à la seconde, elle est utilisée dans la détection des discontinuités existantes dans le champ magnétique terrestre. Ce choix s'est basé, d'une part sur la simplicité de leur expression algébrique et leur efficacité dans la détection de discontinuités. Et d'autre part sur le nombre de moments nuls qu'elles comportent.

Etude de la variation temporelle de la contribution externe du champ magnétique terrestre

Introduction

Dans cette étude nous utilisons deux méthodes d'analyses : l'analyse spectrale par la Transformée de Fourier (TF) et l'analyse par Transformée en Ondelettes Continues (TOC).

L'analyse spectrale sera appliquée, dans un premier temps, au champ géomagnétique, afin d'obtenir une étude détaillée des ses variations externes.

En second, nous utilisons l'analyse en ondelettes continues afin de situer dans le temps et d'étudier les caractéristiques des phénomènes physiques associés aux contributions externes du champ géomagnétique.

Les données de champ analysées sont les moyennes horaires de l'observatoire « Chambon La Forêt » (CLF- France). Cet observatoire se situe dans l'hémisphère nord ; à 145m d'altitude, $\varphi=2.26^\circ$ de longitude. Et $\delta=48.02^\circ$ de latitude Nord (Fig. 4). La série de données analysée porte sur la période allant de 1993 à 1999. Elle contient une partie du cycle 22 de l'activité solaire. Ce recouvrement nous permettra de comparer l'analyse du champ magnétique terrestre avec celle du cycle 22 qu'elle soit décrite par le nombre de taches solaires **ssn** ou par l'indice de l'activité géomagnétique **aa**.

Avant d'appliquer la TOC aux composantes X, Y et Z du champ magnétiques enregistrées à Chambon la forêt, nous commencerons comme de coutume dans ce genre d'étude par son application aux données d'un modèle synthétique. Ce modèle, basé sur l'étude d'Alexandrescu en 1995, décrit les variations rapides et transitoires du champ magnétique enregistré à la surface de la Terre. Il nous permettra, de plus valider notre méthode de traitement de données.

I. Analyse spectrale du champ magnétique terrestre

La TF des données de composantes du champ géomagnétique enregistrées à l'Observatoire (CLF) nous révèle des périodicités relatives à la variation externe du champ géomagnétique (Fig. 27a, b et c). Comme prévue, dans ce type d'analyse, le spectre nous permet de mettre en évidence les pics d'énergie à 1an, 6mois et 27jours et leurs harmoniques. Nous ne montrons, ici, que le spectre de fréquence de la composante X du champ géomagnétique (Fig. 27a, b et c). Le spectre utilisant les deux autres composantes, Y et Z, ne montrent pas de comportement particulier.

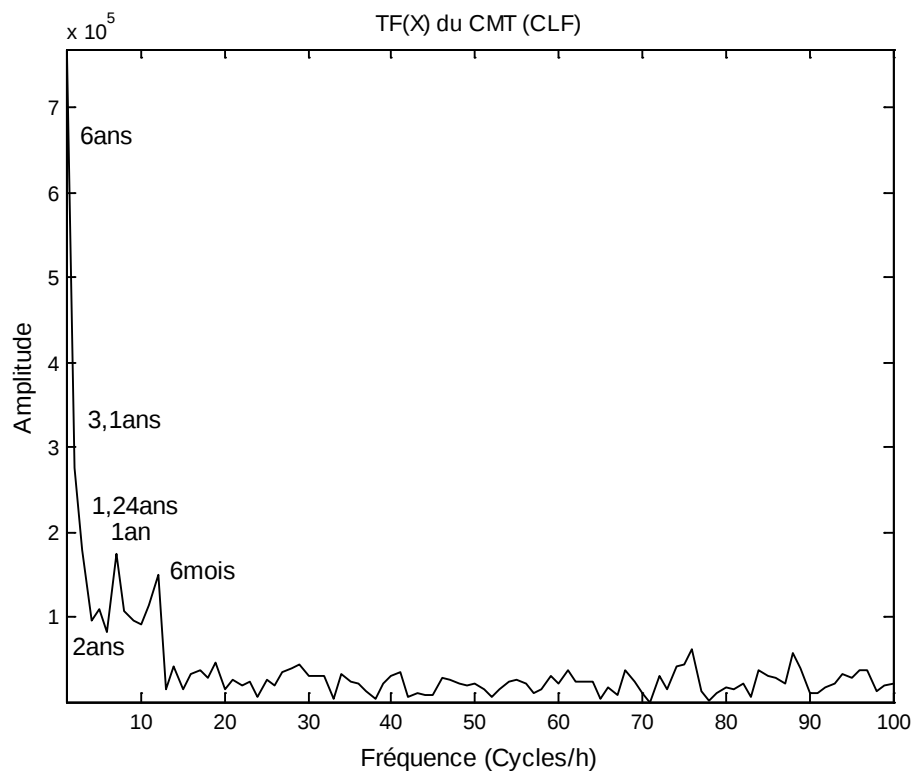


Fig. 27a : Analyse spectrale de la composante X du champ géomagnétique à Chambon la forêt. Notons l'apparition de périodes variant entre 6ans et 6mois.

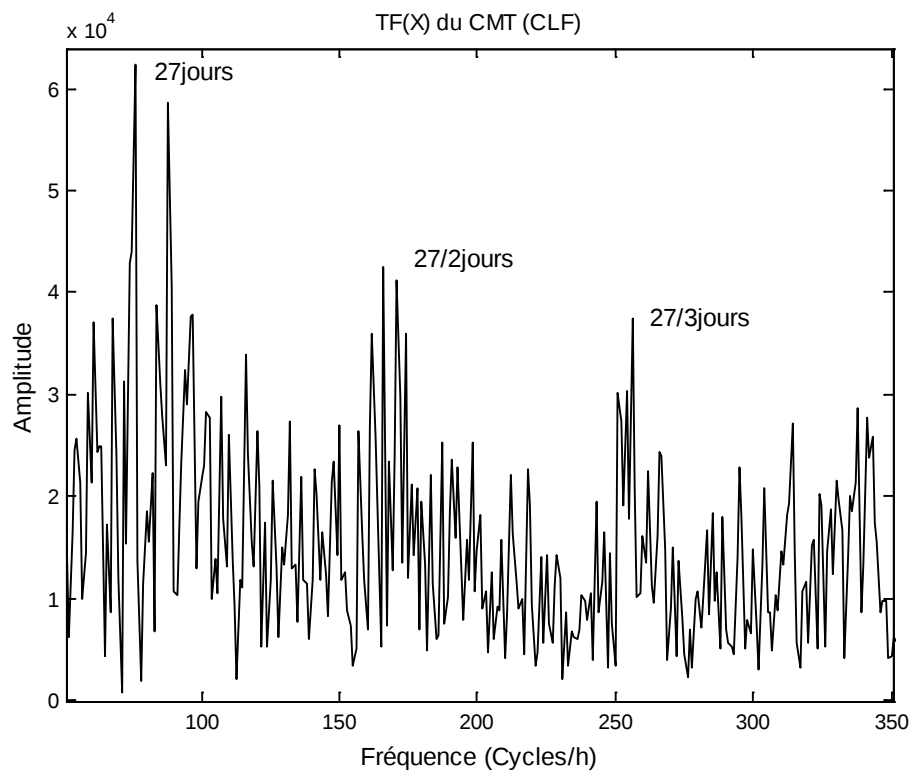


Fig. 27b : Analyse spectrale de la composante X du champ géomagnétique à Chambon la forêt. Apparition de la période 27jours et ses harmoniques.

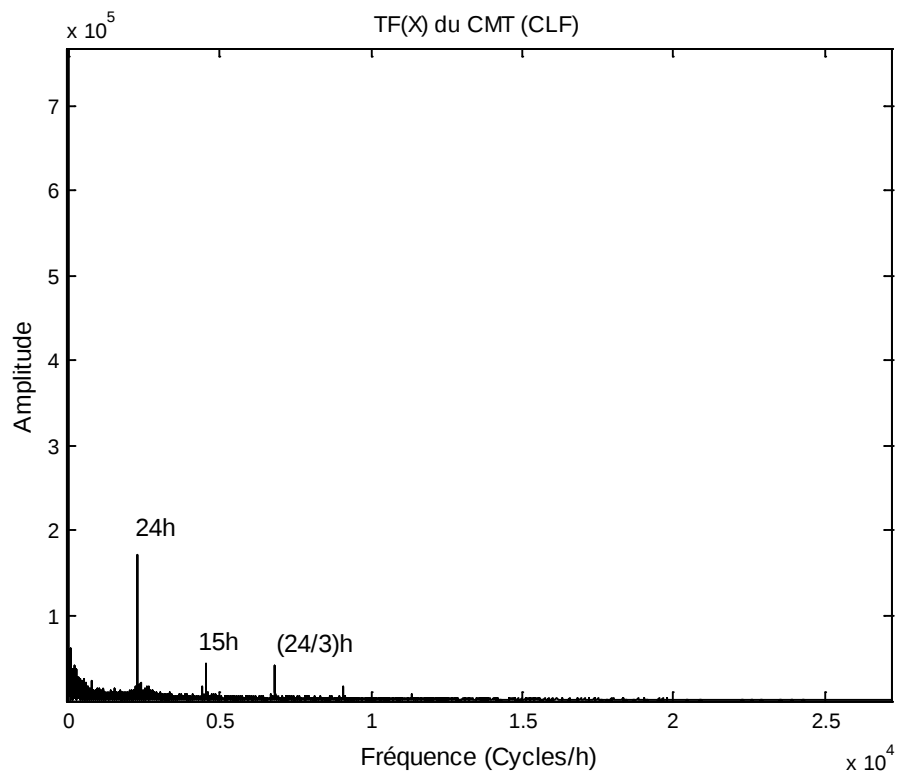


Fig. 27c : Analyse spectrale de la composante X du champ géomagnétique à Chambon la forêt. Apparition des périodes de 3jours, 24heures et ses harmoniques.

La gamme de périodicités contenues dans le champ géomagnétique est large. Nous distinguons d'après la figure 27(a, b et c) des périodes allant de 6ans à 24heures. Chacune d'entre elles correspond à un phénomène physique déterminé. Nous citons à titre d'exemple, la période de 6ans correspond à la moitié d'un cycle de l'activité solaire qui est de 12ans, celle de 24heures à la variation journalière du champ magnétique terrestre, quant à la période de 27jours, elle est liée à la rotation du Soleil sur lui-même.

II. Analyse en Ondelettes continues du champ géomagnétique

Dans l'analyse en ondelettes du champ magnétique terrestre nous nous intéressons à la détection et à l'étude des singularités résultantes des discontinuités de la dérivée $\alpha^{\text{ième}}$ du signal (α non entier). Or les données réelles sont toujours accompagnées de bruits, générant à leur tour des singularités, ce qui rend l'analyse du signal réel très délicate. Cette difficulté apparaît dans la dissociation des singularités dues au signal utile de celles associées au bruit.

Pour exploiter de manière optimale les résultats obtenus à partir de la TOC du champ magnétique terrestre, nous avons commencé par l'étude d'un modèle synthétique basé sur les travaux d'Alexandrescu et al. (1995).

II.1. Analyse en ondelettes continues du modèle synthétique du champ géomagnétique

II.1.1 Calcul du modèle synthétique du champ géomagnétique

Ce modèle est composé d'un signal principal comportant des singularités dont les régularités sont d'ordre α , d'une composante harmonique et d'un bruit, soit:

$$f(t) = \beta(t - t_0)_+^\alpha + c(t) + b(t) \quad (1)$$

où $\mathbf{c}(t)$ est la composante harmonique, $\mathbf{b}(t)$ est un processus stochastique représentant le bruit dans le signal, et la distribution $(t - t_0)_+^\alpha = \begin{cases} 0 & t \leq t_0 \\ (t - t_0)^\alpha & t > t_0 \end{cases}$, représente une variation brusque de régularité α , localisée au temps t_0 .

La transformée en ondelettes, définie par le produit de convolution (2), possède l'avantage de détecter à la fois les singularités et d'analyser la régularité locale d'un signal (Alexandrescu et al., 1995).

$$Wf(t, a) \equiv \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau) \psi_a(t - \tau) d\tau \quad (2)$$

Où $\psi_a(t) = a^{-1} \psi(t/a)$, et $a > 0$ est le paramètre de dilatation.

La linéarité de la transformée en ondelettes donne:

$$Wf(t, a) = \beta W[(t - t_0)_+^\alpha](t, a) + Wc(t, a) + Wb(t, a)$$

Afin de caractériser chaque contribution et voire de quelle manière est influencé le signal $\mathbf{g}(t)$ (Fig. 28a) par la composante harmonique et le bruit. Nous allons analyser et étudier la distribution $(t - t_0)_+^\alpha$ indépendamment du deuxième terme de l'équation (1). Nous ajoutons ensuite le bruit à $\mathbf{g}(t)$ et essayerons de dissocier les singularités de ce dernier de celles associées au bruit. Avant d'analyser le signal tel qu'il est exprimé en (1), nous étudierons l'analyse en ondelettes de la composante harmonique indépendamment des autres composantes..

Soit la distribution $(t - t_0)_+^\alpha$ simulant les variations brusques du champ géomagnétique donnée par $\mathbf{g}(t)$ telle que:

$$g(t) = 0.2\delta(t - t_1) + 0.1H(t - t_2) + 0.01r(t - t_3) - 0.001(t - t_4)_+^{3/2} + 0.0001j(t - t_5) \quad (3)$$

où l'on trouve des fonctions représentants des variations brusques à l'instant t_i , comme la distribution Dirac $\delta(t) = \frac{d}{dt}H(t)$; la fonction de Heaviside

$$H(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ 1 & t \geq 0 \end{cases}; \text{ la fonction rampe } r(t) = \int H(t)dt, \text{ la distribution } (t - t_4)_+^{3/2} \text{ et } \mathbf{j}(t)$$

qui décrit le jerk géomagnétique tel que $j(t) = \int r(t)dt$. Notons que les singularités associées à ces fonctions possèdent, respectivement, des régularités d'ordre $\alpha = \{-1, 0, 1, 3/2, 2\}$ localisées au temps $\{t_1, t_2, t_3, t_4, t_5\} = \{255, 511, 767, 1023, 1279\}$ (Alexandrescu et al., 1995). Le temps est exprimé en mois qui est l'unité adoptée.

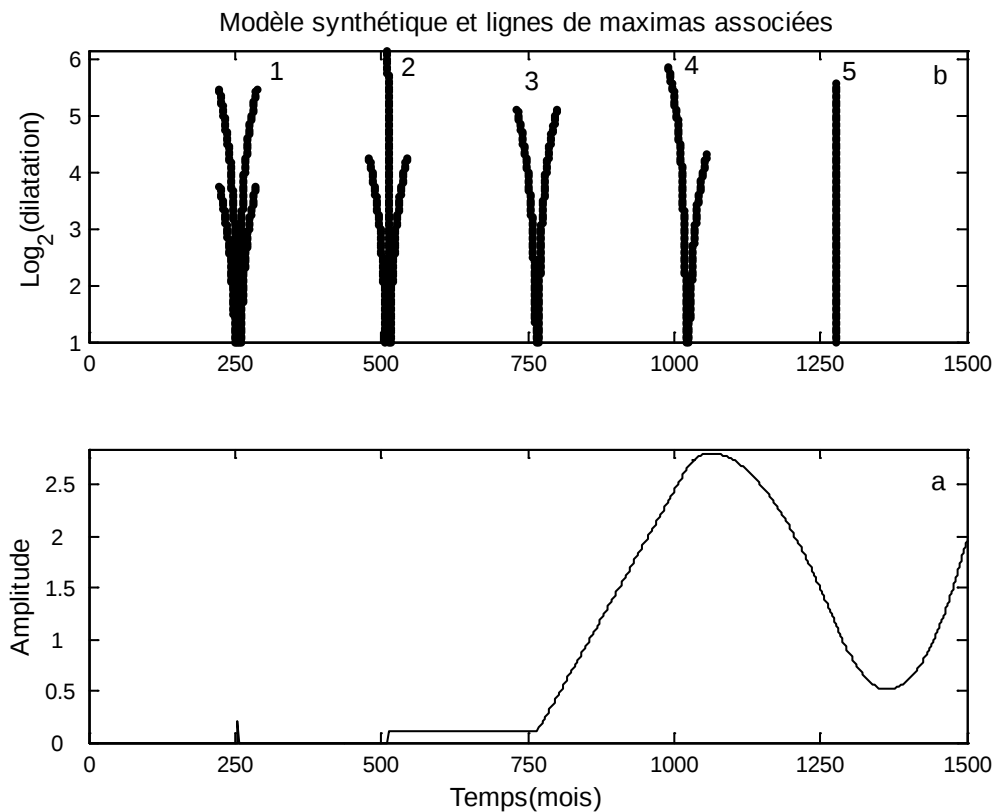


Fig. 28 (a) Modèle synthétique du champ magnétique terrestre. (b) Lignes de maxima associées.

II.1.2 Analyse en ondelettes continues du modèle principal sans bruits

Les différentes singularités du signal sont caractérisées en étudiant les variations du module de la transformée en ondelettes le long des lignes de maxima (Mallat et al., 1992).

Nous allons donc commencer par l'étude de l'analyse en ondelettes du premier terme de l'équation (1) soit $g(t)$.

Soit $\phi(t)$ une ondelette analysante, n fois dérivable.

On suppose que $|\phi^{(n-\alpha-1)}(t)|$ ($n \geq \alpha+1$) possède N maxima, $\{\phi_{max,j}; j=1, \dots, N\}$ localisées aux temps $\{t_{max,j}; j=1, \dots, N\}$. Le module de la transformée en ondelettes, $|W[(t-t_0)_+^\alpha](t,a)|$, possède également N maxima localisées aux temps $\{at_{max,j}+t_0; j=1, \dots, N\}$ qui convergent vers t_0 quand a tend vers zéro. Les maxima des modules de la transformée en ondelettes sont disposés en N lignes, $\{t=at_{max,j}+t_0; j=1, \dots, N\}$, qui convergent vers t_0 l'instant où la singularité apparaît. La "crête d'ondelette" est définie comme la valeur absolue de la transformée en ondelettes le long d'une ligne de maxima (Alexandrescu et al., 1995).

La régularité α sera la pente de la crête d'ondelettes représentée sur une échelle logarithmique. Pour estimer des régularités supérieures à une valeur maximale m , nous avons besoin d'une ondelette avec au moins $(m+1)$ moments nuls. Une ondelette avec m moments nuls possède au moins $(m+1)$ extrema (Mallat et al., 1992) et (Alexandrescu et al., 1995). Or dans le signal considéré $g(t)$ la régularité α est inférieure ou égale à 2. Ce qui conduit à utiliser, comme ondelette analysante, la troisième dérivée de la gaussienne (4) qui possède 2 moments nuls (Alexandrescu et al., 1995).

$$\psi(t) = \frac{d^3}{dt^3} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) \quad (4)$$

Comme mentionné plus haut, nous avons commencé par l'étude de l'analyse en ondelettes de $g(t)$ (Fig. 28a). La (Fig. 28b) représente les lignes de maxima associées à $g(t)$ données par la variation du Logarithme à base de 2 de la dilatation en fonction du temps. On voit clairement que les différentes lignes de maxima associées convergent vers l'instant où apparaît chaque singularité à savoir $\{t_1, t_2, t_3, t_4, t_5\} = \{255, 511, 767, 1023, 1279\}$. Nous obtenons donc 4 lignes associées à la fonction de Dirac, 3 lignes à la fonction Heaviside, 2 lignes à la fonction rampe $r(t)$ ainsi qu'à la distribution $(t-t_4)_+^{3/2}$ et une ligne associée à $j(t)$.

Pour caractériser les différentes singularités nous étudions la régularité de chacune d'entre elles. Les crêtes d'ondelettes définies par la variation de $\text{Log}_2|Wg(t,a)|$ en fonction de $\text{Log}_2 a$ le long d'une ligne de maxima (Fig. 29), permet de calculer ces régularités. D'après la figure 29 on remarque que les crêtes d'ondelettes

varient différemment les unes des autres. Par exemple pour les cas (3; 4 et 5) nous avons des courbes linéaires à tendance croissante qui correspondent, respectivement, aux singularités créées par $r(t)$, $(t - t_4)_+^{3/2}$ et $j(t)$; pour le cas (1) relatif à la Dirac nous avons une droite décroissante et enfin le cas (5) de la crête associée à $H(t)$ croît pour s'annuler à partir de $a \geq 2^2$. La régularité α est calculée dans la partie linéaire de la crête d'ondelettes. On obtient, pour les singularités associées à $\delta(t)$, $H(t)$, $r(t)$, la distribution $(t - t_4)_+^{3/2}$ et $j(t)$, des régularités de l'ordre $\alpha = -0.995$; 0.0015 ; 0.994 ; 1.50 et 1.993 , respectivement. En considérant les différentes valeurs de la régularité α on remarque que le nombre de lignes de maxima est inversement proportionnel à la valeur de cette dernière. On trouve, par exemple, 4 lignes de maxima associées à la Dirac $\delta(t)$ dont la régularité $\alpha \approx -1$ et 1 ligne de maxima est associée au jerk $j(t)$ qui est de régularité $\alpha \approx 2$.

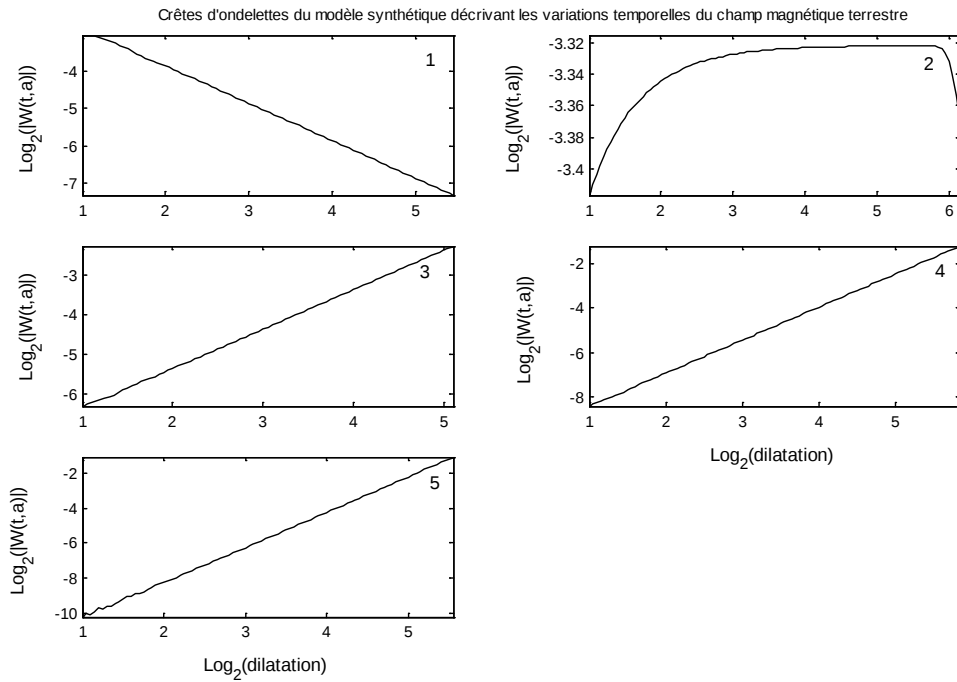


Fig. 29 : Crêtes d'ondelettes du modèle synthétique décrivant les singularités du champ magnétique terrestre.

II.1.3. Analyse en ondelettes continues du modèle principal perturbé par un bruit gaussien

Analysons maintenant le signal $g(t)$ auquel on a ajouté un bruit gaussien. Les (Fig. 30a et b) illustrent, respectivement, le signal obtenu et les lignes de maxima qui lui sont associées. On remarque, à première vue, que plusieurs lignes de maxima sont générées par le bruit (Fig. 30b). Ces lignes sont plus ou moins importantes en amplitude par rapport à celles associées à $g(t)$ (Fig. 28b). En comparant les figures 28b et 30b, on trouve que les lignes de maxima en $t_1=255$ mois associées à la distribution de Dirac ne sont plus que deux (Fig. 30b) au lieu de quatre, et une ligne de maxima engendrée par la distribution $(t - t_4)_+^{3/2}$ en $t_4=1023$ mois au lieu de 2.

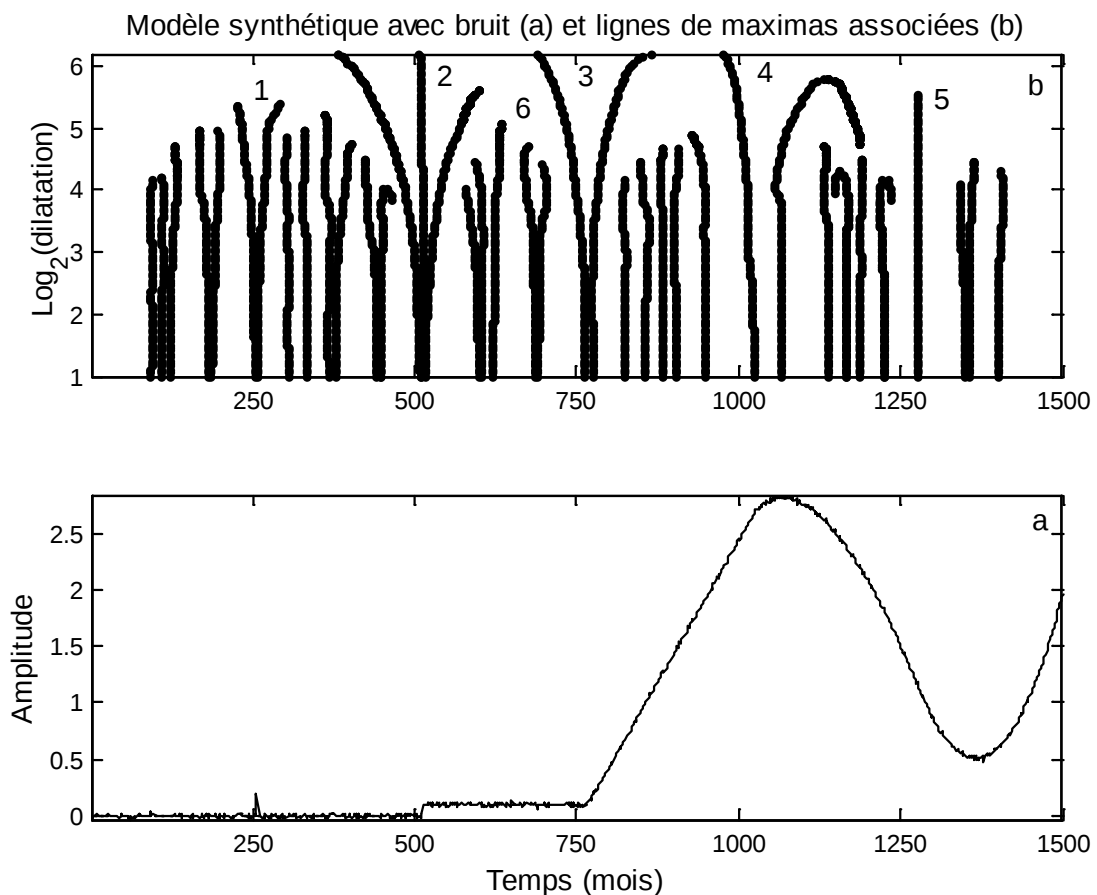


Fig. 30 (a) Modèle synthétique bruité simulant les variations temporelles du champ magnétique terrestre. (b) Lignes de maxima associées au modèle.

En exploitant les crêtes d'ondelettes (Fig. 31) relatives aux singularités de $g(t)$ bruité, nous pourrions mieux assimiler comment le bruit influence le signal analysé. En comparaison avec la figure 29, on trouve que les crêtes présentent une sinuosité avant de prendre une variation à tendance linéaire pour $a \geq 2^3$ cas (1; 3; 4 et 5) qui correspondent respectivement à $(\delta(t); r(t); (t - t_4)_+^{3/2} \text{ et } j(t))$. La crête associée à $H(t)$ est de pente nulle (cas 2) quant à la crête 6, elle correspond au bruit.

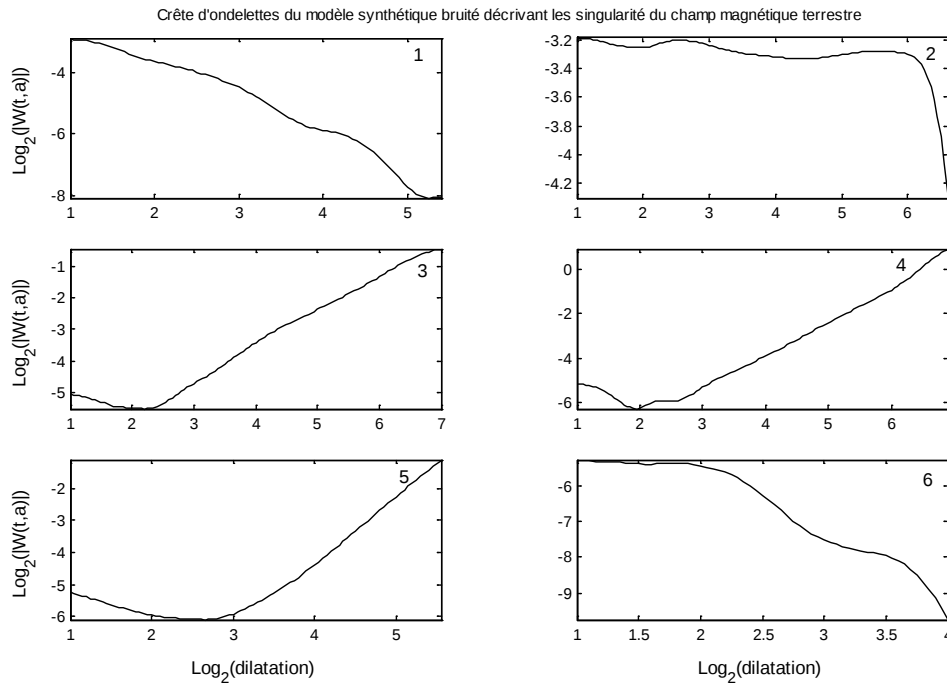


Fig. 31 :Crêtes d'ondelettes du modèle synthétique, avec bruit, du champ magnétique terrestre.

II.1.4. Analyse en ondelettes continues de la composante harmonique

La composante harmonique $c(t)$ (Fig. 32a) est donnée par la somme de quatre sinusoïdes modulées par les coefficients $A_i = \{0.01, 0.005, 0.005, 0.005\}$. Les sinusoïdes sont de différentes périodes et correspondent à celles observées dans le champ magnétique terrestre. Elles sont exprimées en années $\{T_1, T_2, T_3, T_4\} = \{11, 5.5, 3.7, 1\}$.

$$c(t) = \sum_{i=1}^4 A_i \sin\left(\frac{2\pi t}{T_i}\right) \quad (5)$$

D'après la figure 32a on trouve que $c(t)$ varie en dents de scie de manière régulière entre -0.02 et 0.02 en s'annulant en $t=0$. Les lignes de maxima associées aux singularités de la composante harmonique sont représentées dans la figure 32b. Elles sont au nombre de deux et apparaissent à intervalle régulier (lignes 1 et 2). Les crêtes d'ondelettes, représentées sur une échelle logarithmique (Fig. 33), des lignes de maxima de la composante harmonique ont une forme particulière. Elles varient en sinusoïdes et sont décroissantes à partir de $a>2^5$.

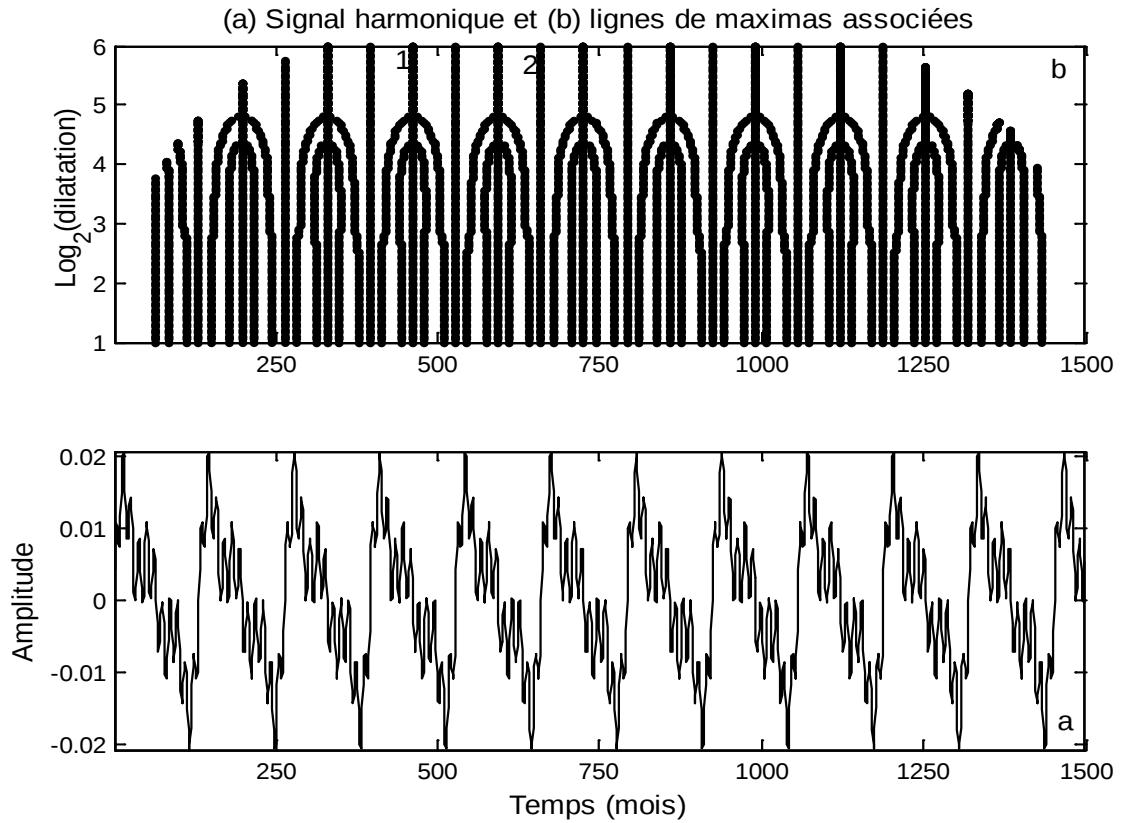


Fig. 32 :(a) Composante harmonique. (b) Lignes de maxima associées.

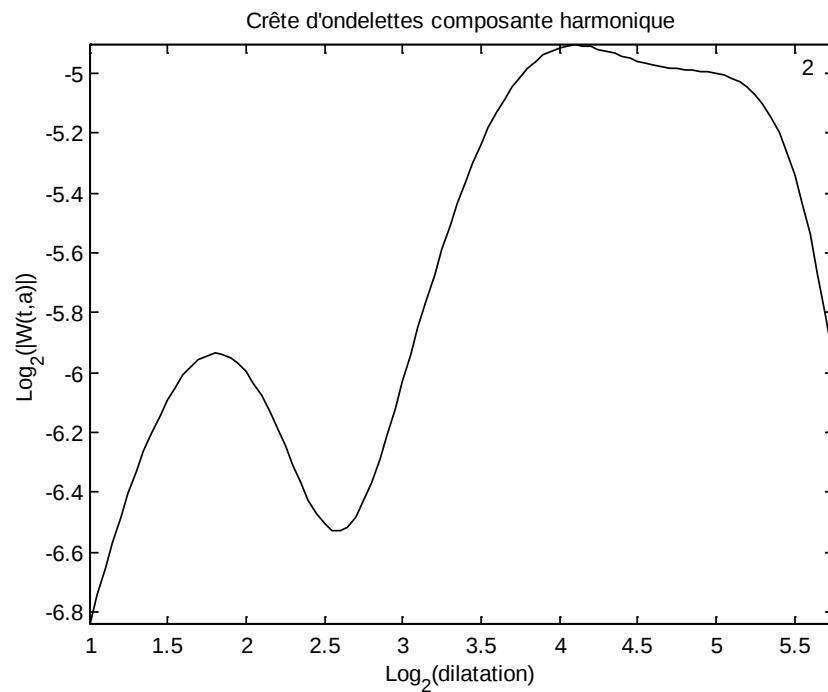
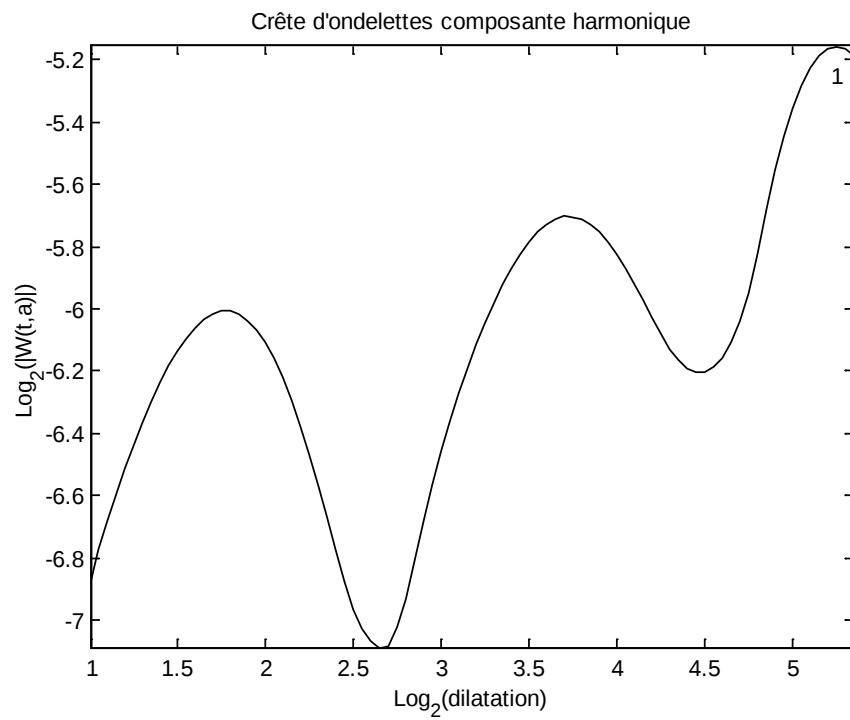


Fig. 33 :Crêtes d'ondelettes du signal harmonique.

II.1.5. Analyse en ondelettes continues du modèle synthétique

Nous appliquons la TOC au modèle synthétique tel qu'il a été défini par l'expression $f(t)$ (Fig. 34a). La (Fig. 34b) représente les lignes de maxima associées aux singularités de $f(t)$, on remarque qu'elles sont toutes d'amplitude importante. Nous allons étudier leur régularité et déterminer les contributions auxquelles elles appartiennent. En comparant les figures 28b et 34b on trouve qu'il n'y a qu'une ligne de maxima due à la Dirac apparaissant à $t_1=255$ mois, nous retrouvons les trois lignes associées à $H(t)$ qui convergent vers $t_2=511$ mois ainsi que les deux lignes relatives à $r(t)$ en $t_3=767$ mois et celle due au jerk en $t_5=1023$ mois, quant à la distribution $(t - t_4)_+^{3/2}$ on ne retrouve qu'une ligne qui lui est associée en $t_4=1279$ mois. Notons que ces lignes sont légèrement déformées. Quant aux lignes de maxima restantes, elles sont dues au bruit et à la composante harmonique. Afin d'étudier leur régularité nous allons analyser les crêtes d'ondelettes de $f(t)$ (Fig. 35).

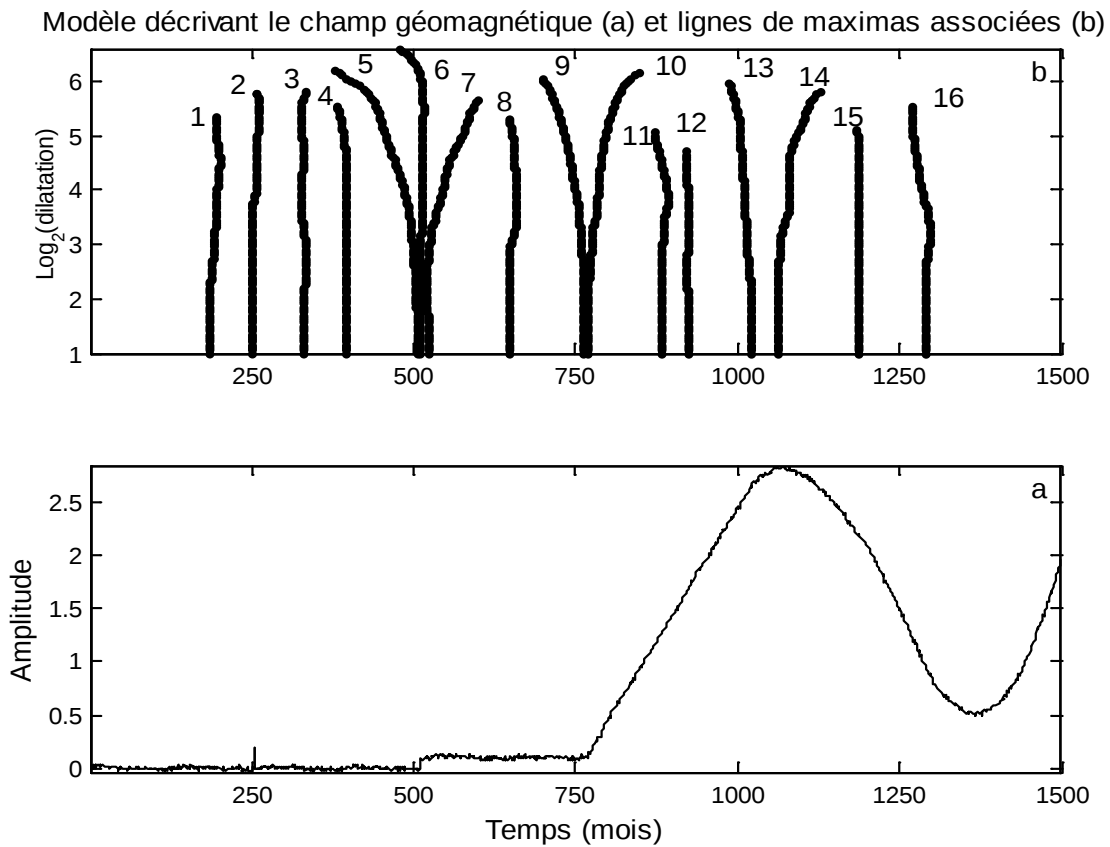


Fig. 35 (a) Modèle synthétique décrivant le champ géomagnétique avec bruit. (b) Lignes de maxima associées.

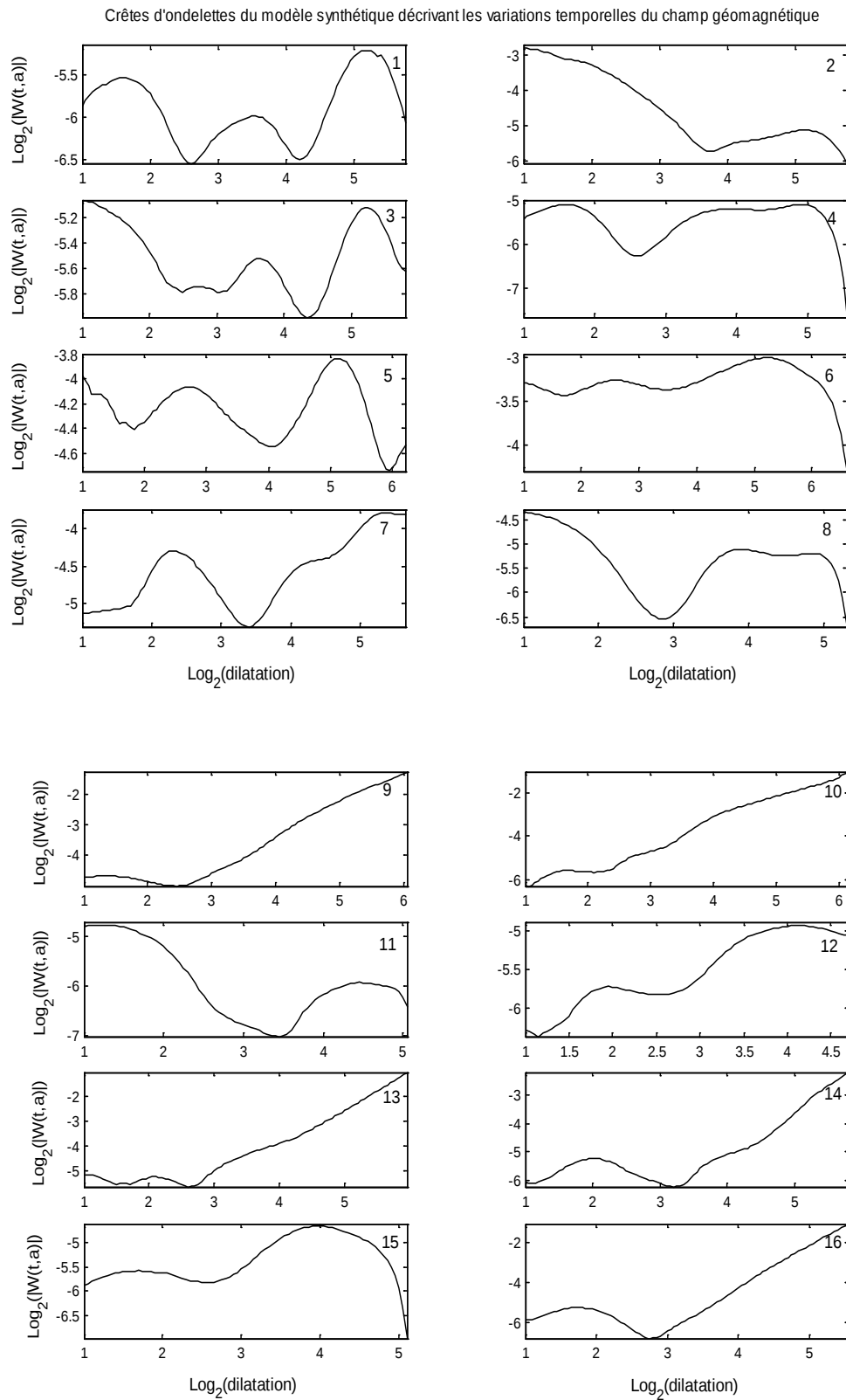


Fig. 36 :Crêtes d'ondelettes du modèle synthétique décrivant les variations du champ magnétique terrestre.

II.1.6. Classement des crêtes d'ondelettes

En observant les crêtes d'ondelettes (Fig. 36), on peut les classer en trois types:

Type 1

C'est le cas où les crêtes d'ondelettes ont une tendance linéaire positive ($\alpha > 0$) à partir de $a > 2^{2.5}$ dans la plupart des cas. On voit une légère influence de la composante harmonique dans la partie bombée des crêtes (Fig. 36) (cas 9, 10, 13, 14 et 16) en absence de bruit et (cas 3, 4 et 5 (Fig. 31)) dans le cas contraire. On peut conclure que les crêtes d'ondelettes de type 1 sont principalement dues aux singularités du signal $g(t)$.

Type 2

Correspond aux crêtes d'ondelettes ayant une forme ondulée (cas 1, 4, 8, 11 et 15 (Fig. 36)) et peuvent décroître à partir de $a > 2^{5.2}$ (cas 4, 8 et 11 (Fig. 36)). L'influence du bruit est limitée à de petites dilatations et ne détruisent pas le modèle global des crêtes d'ondelettes. Ce type de crêtes est principalement dû à la composante harmonique.

Type 3

C'est le cas où les crêtes d'ondelettes sont dues à des singularités avec $\alpha = 0$ (cas 5 et 6 (Fig. 36)) ou par les composantes harmoniques (cas 3 (Fig. 36)). Les crêtes d'ondelettes principalement dues au signal harmonique sont décroissantes à partir de $a > 2^{5.2}$ à cause de l'influence des singularités proches sont aussi rencontrées (cas 7 et 12 (Fig. 36)). Les crêtes montrant une tendance linéaire avec une pente négative ($\alpha < 0$, cas 2 (Fig. 36) et cas 6 (Fig. 31)) sont aussi classées dans le troisième type étant donné qu'elles ne sont attribuées ni à une singularité bruité ni au bruit lui même (cas 1 et 6 (Fig. 31)).

D'un point de vue pratique, nous nous intéressons aux crêtes d'ondelettes de type 1 où nous étudierons la partie linéaire uniquement et pour des singularités ayant une régularité $\alpha > 0$.

II.2. Analyse en ondelettes continues des données de champ magnétique terrestre

Comme nous l'avons indiqué au début de ce chapitre, les données du champ géomagnétique analysées sont celles de l'observatoire français Chambon La Forêt (CLF). Nous disposons d'une série continue de moyennes horaires des composantes horizontales X Nord, Y Est et verticale Z pour la période allant de 1993 à 1999.

Le champ géomagnétique est caractérisé par des variations transitoires allant de la milliseconde au cycle undecennal. Parmi ces variations certaines sont régulières et stationnaire et peuvent être simplement mises en évidence par une TF classique. L'intérêt de la TOC est de nous permettre de mieux caractériser les variations non stationnaires du champ.

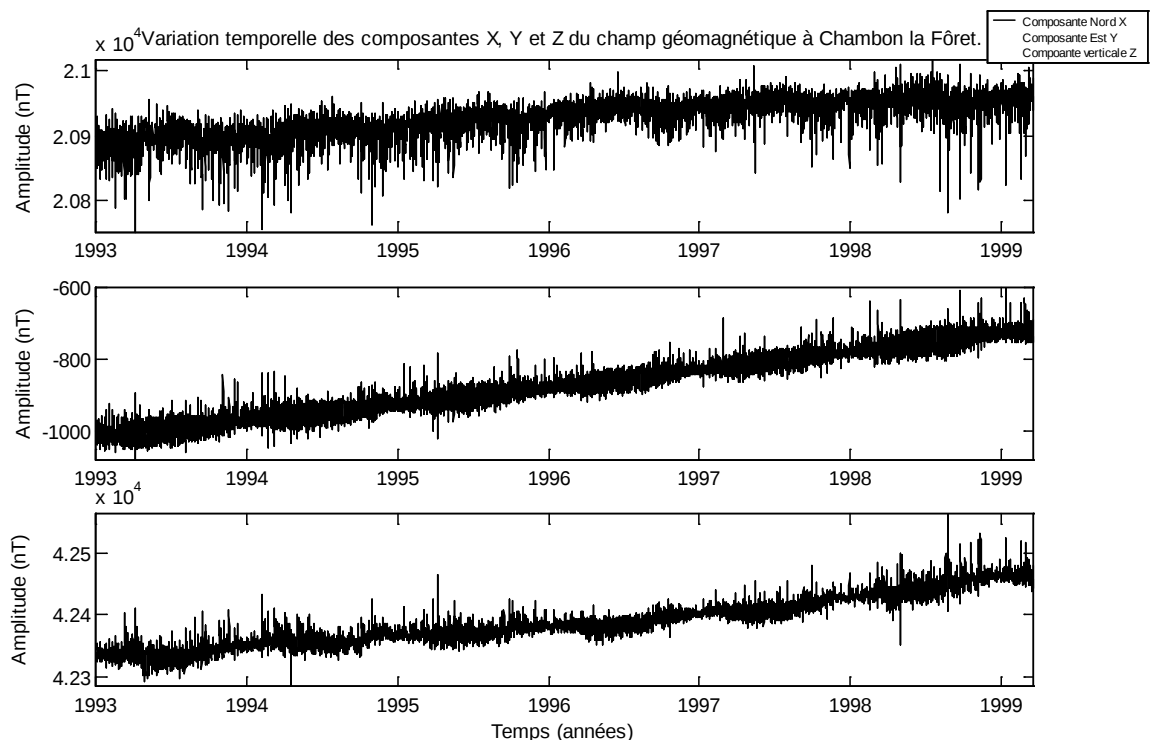


Fig. 37 : Variation temporelle des composantes horizontales Nord X, Est Y et Verticale Z du champ géomagnétique -CLF (France), l'échantillonnage est de 1valeur/h.

On peut aisément remarquer à partir de la figure 37 que les données réelles sont très bruitées. Les variations temporelles, de l'ordre d'une valeur par heure, des composantes géographiques du champ ne sont pas comparables et décrivent des variations rapides. Il apparaît ainsi qu'un filtrage préliminaire des données est

indispensable. Ce filtrage sera simplement réalisé par l'emploi de moyennes mobiles sur une période T donnée. De plus, pour éliminer les variations "lentes" et les variations périodiques, nous appliquons aux données une nouvelle méthode de traitement appelée "dérivée absolue moyenne" proposée par Blanter et al. (2001). Cette technique est basée sur une approche non linéaire du traitement de données (Blanter et al., 2001).

II.2.1. Dérivée absolue moyenne

On appelle fonction **$f(t)$** les composantes du champ géomagnétique à Chambon la forêt, définies en N points au temps t. La dérivée première $f'(t)$ et la dérivée absolue définies $|f'(t)|$ en N-1 points.

Le formalisme de la méthode est tel que:

$$f'(t) = f(t+1) - f(t)$$

$$|f'(t)| = |f(t+1) - f(t)|$$

Une fonction moyenne sur T est définie alors comme:

$$|f(t)|_T = \frac{1}{T} \sum_{\tau=0}^{T-1} \left| \frac{df(t+\tau)}{dt} \right|$$

où;

T est la "largeur de la fenêtre glissante". Le choix de cette largeur dépend des caractéristiques de la série temporelle à analyser.

N est la longueur du signal étudié, τ est le pas d'échantillonnage (de l'ordre du mois).

Cette méthode a été appliquée aux données des composantes X, Y et Z du champ géomagnétique pour trois périodes différentes. Ces périodes T ; également appelées « fenêtres de filtrage », sont T=3mois; 6mois et 12 mois. Le pas d'échantillonnage τ utilisé est de l'ordre du mois. Les figures obtenues pour chaque composante sont illustrées, respectivement, dans (Fig. 38a, b et c). La superposition des dérivées absolues moyennes de chaque composante calculées pour différentes valeurs de T nous donne un aperçu sur l'influence de ce filtre par rapport aux données du champ.

II.2.2. Description des données filtrées

La figure 38 montre les dérivées absolues moyennes des composantes X, Y et Z filtrées, pour $T=\{3, 6, 12\}$ mois. Nous remarquons que les variations rapides du champ magnétique terrestre illustrées plus haut dans la figure 37 sont complètement atténuées. Nous observons une variation cyclique des dérivées absolues moyennes de X, Y et Z, un comportement qui n'est pas décrit par les données originelles. Nous remarquons également que plus T augmente plus le signal devient lisse. Les variations cycliques de l'ordre de 6 et 12 mois, observées, respectivement, dans les données filtrées avec $T=3$ mois et $T=6$ mois disparaissent en prenant $T=12$ mois. Ce qui est naturel, car les composantes périodiques sont filtrées au fur et à mesure qu'on augmente la valeur de la fenêtre glissante. Rappelons que nous nous intéressons à l'étude des singularités du champ d'où notre analyse sera consacrée aux données filtrées avec $T=3$ mois et $T=6$ mois, car pour $T=12$ mois le signal devient trop lisse.

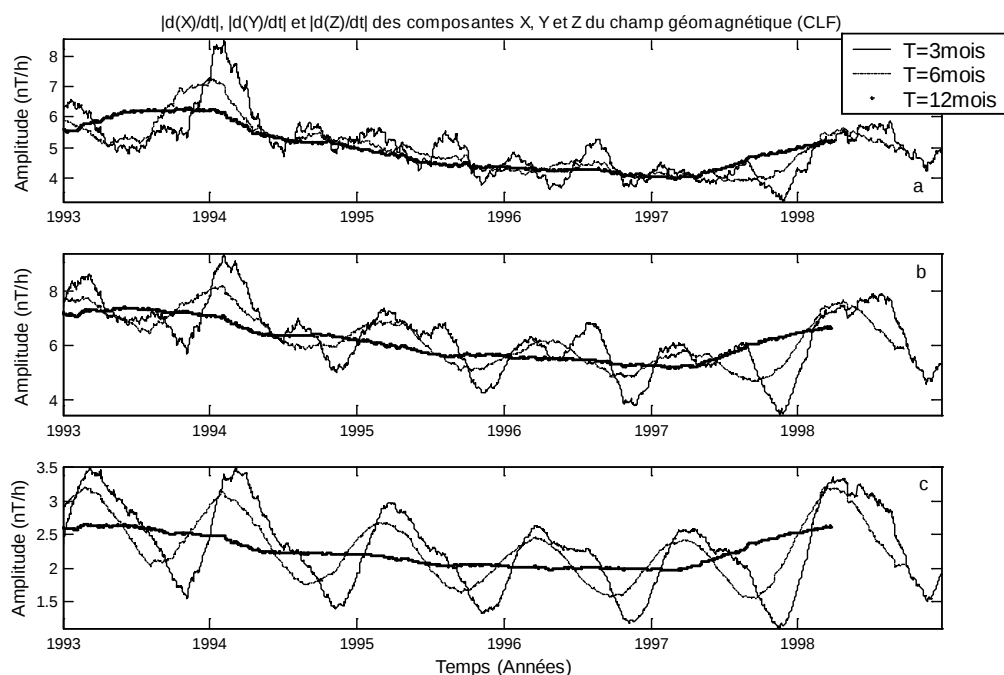


Fig. 38 : Dérivées absolues moyennes des composantes du champ géomagnétique X, Y et Z de CLF, pour $T=\{3,6,12\}$ mois.

II.2.3. Analyse en ondelettes continues de la dérivée absolue moyenne des composante X, Y et Z

L'analyse en ondelettes des dérivées absolues moyennes des composantes horizontale Nord X et Est Y ainsi que la composante verticale Z du champ géomagnétique pour les différentes valeurs de T révèle des lignes de maxima localisées sur toute la longueur du signal (Fig. 39). On remarque que leur nombre diminue quand la période T augmente, ce qui est normal puisque le signal devient plus lisse. Les localisations des singularités de $|d(X)/dt|$ pour T=3mois et T=6mois sont représentées sur la figure 40(a, b, c, d, e et f), où nous pouvons observer l'influence de la période T sur la localisation des lignes de maxima. En effet, nous constatons qu'en général les singularités de $|d(X)/dt|$ déterminées pour T=3mois et T=6mois ne sont pas synchrones. Elles apparaissent parfois à des heures différentes quand elles sont localisées le même jour. A titre d'exemple, nous observons une singularité qui apparaît le 03/07/1994 à 7h pour T=3mois et 6h pour T=6mois (Fig. 40b). Nous estimons que cette différence dans la localisation est due à la fenêtre de filtrage utilisée.

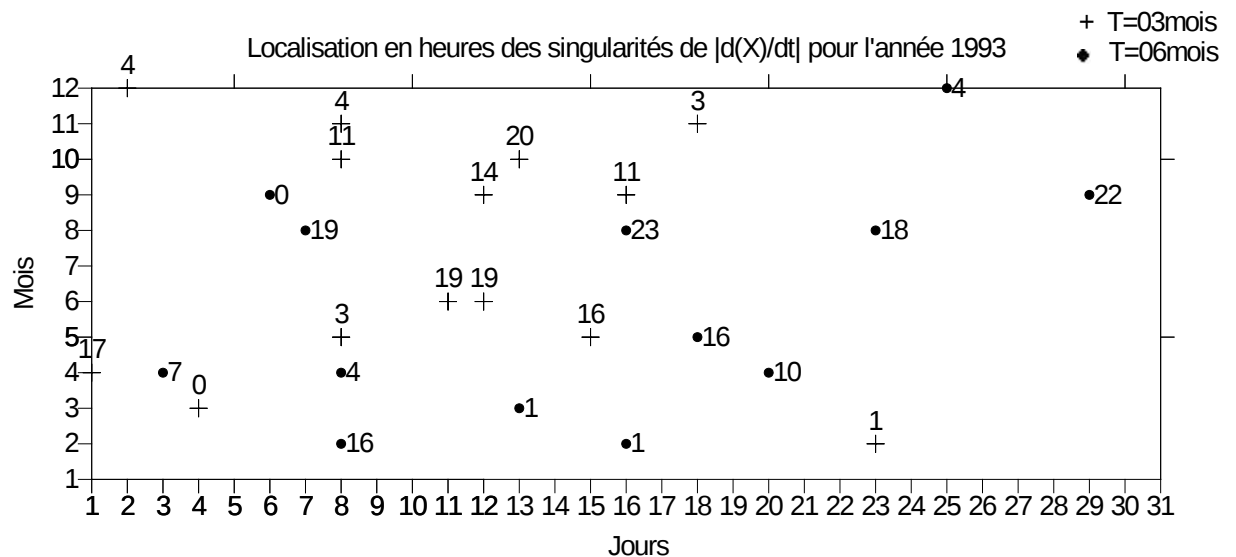


Fig. 40a: Localisation des singularités de la dérivée absolue moyenne de X de l'observatoire CLF, pour l'année 1993.

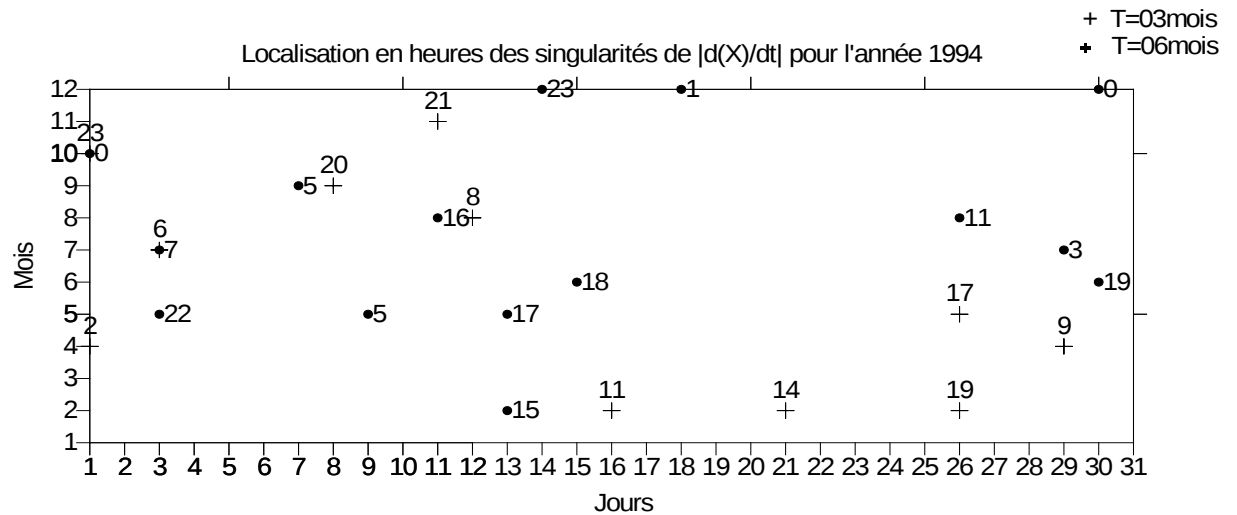


Fig. 40b: Localisation des singularités de la dérivée absolue moyenne de X de l'observatoire CLF, pour l'année 1994.

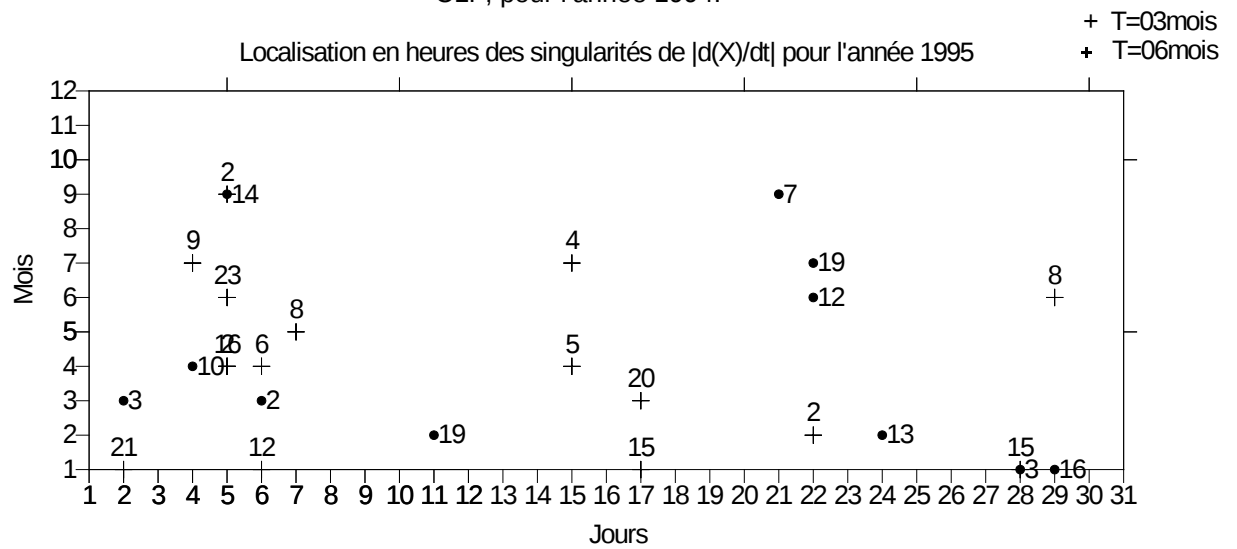


Fig. 40c: Localisation des singularités de la dérivée absolue moyenne de X de l'observatoire CLF, pour l'année 1995.

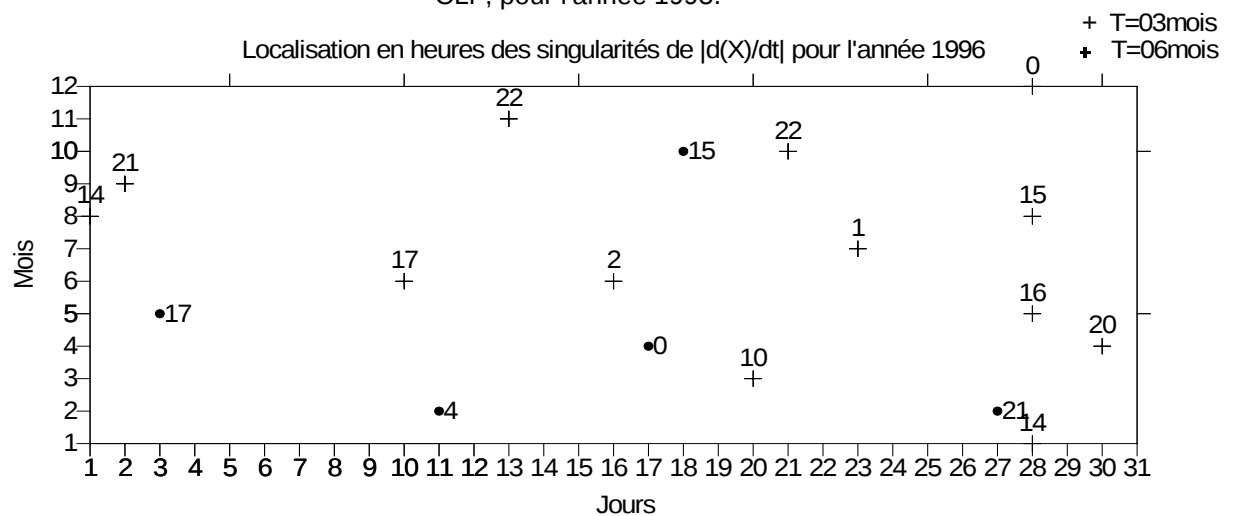


Fig. 40d: Localisation des singularités de la dérivée absolue moyenne de X de l'observatoire CLF, pour l'année 1996.

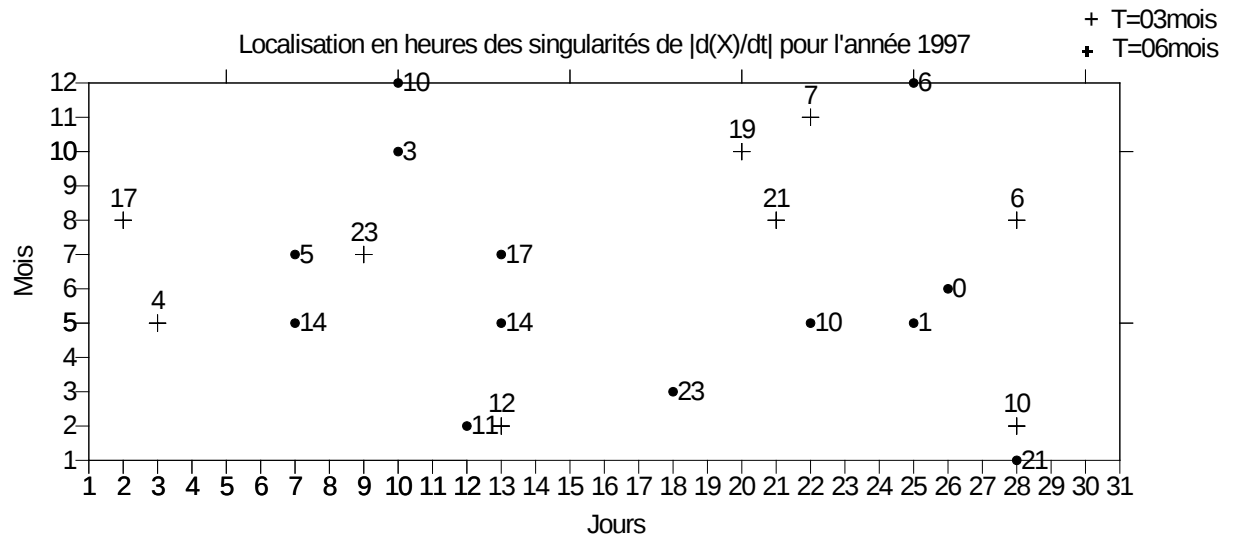


Fig. 40e: Localisation des singularités de la dérivée absolue moyenne de X de l'observatoire CLF, pour l'année 1997.

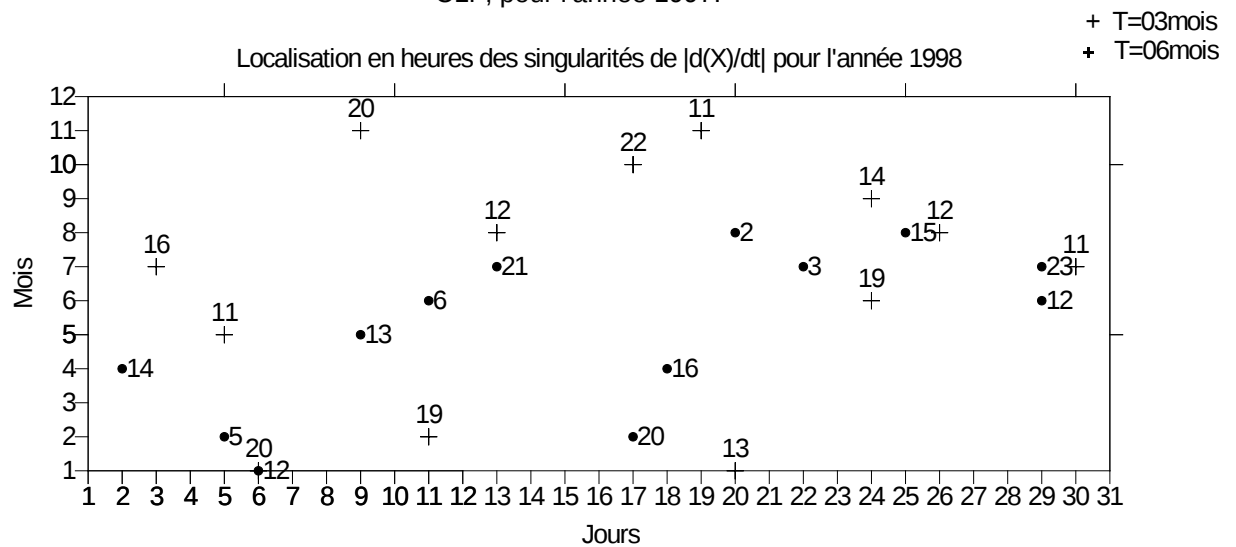


Fig. 40f: Localisation des singularités de la dérivée absolue moyenne de X de l'observatoire CLF, pour l'année 1998.

Nous ne présentons ici que la localisation des lignes de maxima de $|d(X)/dt|$ déterminées pour T=3mois et T=6mois, car elles ne révèlent aucune particularité. Les figures illustrant celle de $|d(Y)/dt|$ et $|d(Z)/dt|$ sont données dans l'annexe B.

Les crêtes d'ondelettes associées aux singularités de $|d(X)/dt|$, $|d(Y)/dt|$ et $|d(Z)/dt|$ sont essentiellement à tendance linéaire positive ; tantôt influencées par uniquement les contributions harmoniques (Fig. 41a), tantôt par les contributions harmoniques et le bruit (Fig. 41b).

^ Nous ne présentons pas toutes les crêtes obtenues.

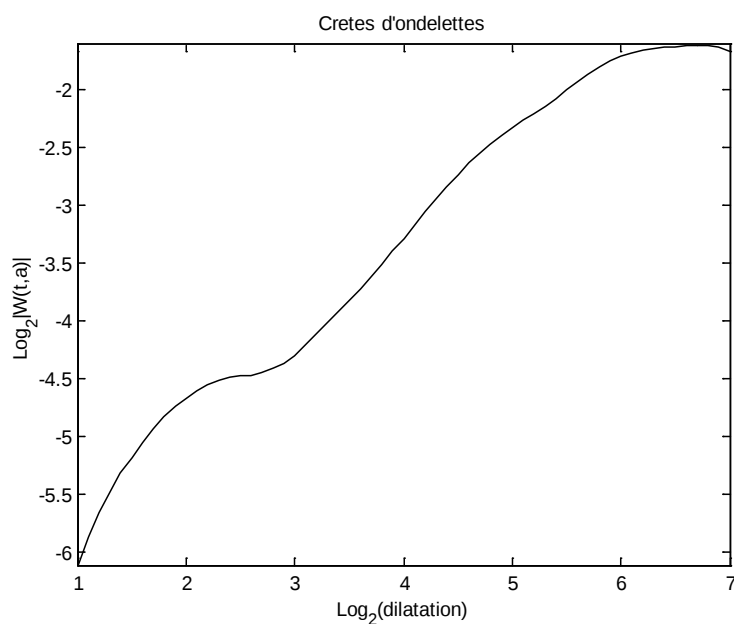


Fig. 41a : Crête d'ondelette à tendance linéaire positive avec influence des contributions harmoniques.

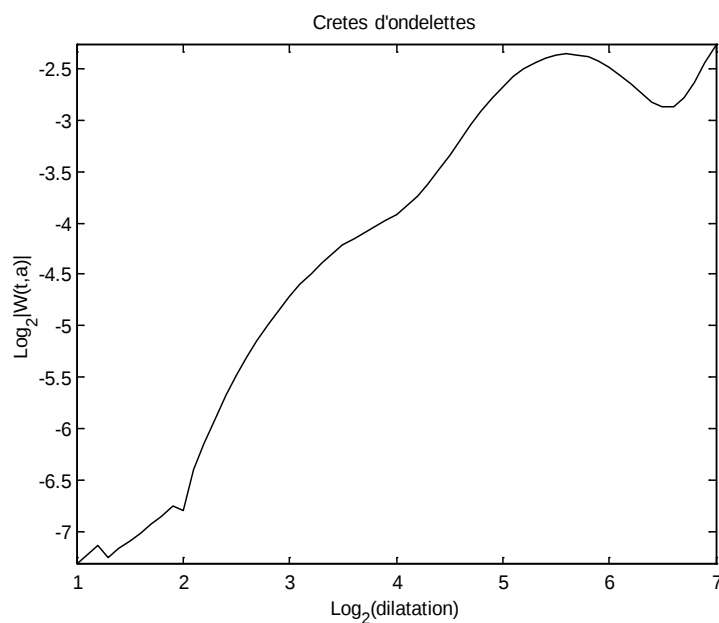


Fig. 41b : Crête d'ondelette à tendance linéaire positive influencée par les contributions harmoniques et par le bruit.

Rappelons que les crêtes d'ondelettes permettent de déterminer les régularités α des singularités contenues dans les signaux étudiés. La distribution de α en fonction de la localisation temporelle des singularités de $|d(X)/dt|$, $|d(Y)/dt|$ et $|d(Z)/dt|$ calculées pour $T=\{3, 6\}$ mois est représentée sur la figure 42. Nous constatons, dans les trois cas de figures, des amplitudes de α très variables et une distribution aléatoire de cette dernière en fonction de la localisation temporelle. Pour mieux observer les intervalles de variation de α nous les résumons dans la tableau ci-dessous.

	Régularité α			
	T=3mois		T=6mois	
	$\alpha_{\min}$	$\alpha_{\max}$	$\alpha_{\min}$	$\alpha_{\max}$
$ d(X)/dt $	0.18	2.11	0.19	1.68
$ d(Y)/dt $	0.07	1.75	0.18	1.86
$ d(Z)/dt $	-0.04	1.47	0.07	1.37

Table 3 : Intervalles de variation de la régularité α .

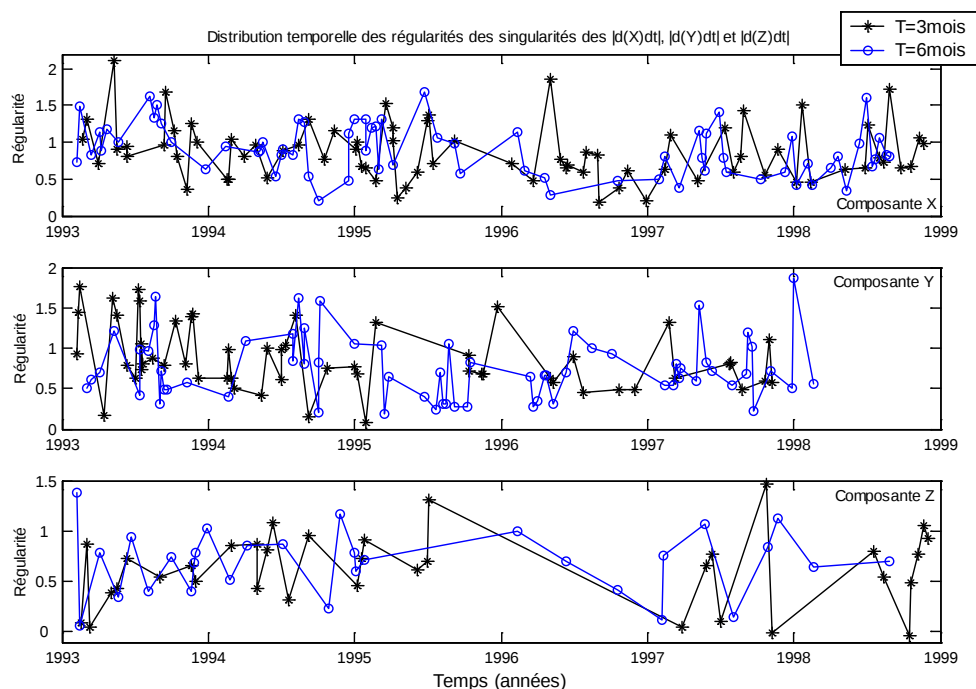


Fig. 42 : Distribution des régularités des crêtes d'ondelettes des dérivées absolues moyennes des composantes X, Y et Z du champ géomagnétique (CLF) pour $T=\{3, 6\}$ mois.

Nous allons tenter de faire correspondre les singularités mises en évidence par l'analyse en ondelettes continues de $|dX/dt|$, $|dY/dt|$ et $|dZ/dt|$ aux évènements, recueillis sur le site web (www.sec.noaa.gov), relatifs aux activités géomagnétique et solaire observés depuis 1996. Pour cela nous allons représenter, sur un même graphique, la distribution des localisations temporelles des singularités contenues dans chaque composante du champ géomagnétique et celle des évènements. Rappelons que la série de données du champ géomagnétique étudiée s'étale de 1993 à 1999 et que les évènements recueillis remontent à 1996. Ceci va nous limiter quant à l'interprétation des résultats obtenus. Les figures 43 (a, b et c) ; 44 (a, b et c) et 45 (a et b) représentent, respectivement, les distributions des localisations des singularités de $|dX/dt|$, $|dY/dt|$ et $|dZ/dt|$ et les dates d'évènements de l'activité géomagnétique et solaire observés, pour les années 1996, 1997 et 1998.

D'après la figure 43(a, b et c) on voit clairement qu'il y a plus d'évènements qui correspondent aux singularités détectées pour les années 1997 et 1998 que pour l'année 1996. Les évènements le plus fréquemment détectés, à partir de l'analyse en ondelettes de $|dX/dt|$ pour $T=3$ mois et $T=6$ mois, sur la période allant de 1996 à 1998 est « un champ géomagnétique instable à actif » suivi d'« un champ calme à orages mineurs », « calme à actif », « calme à instable » et « actif à orages mineurs ».

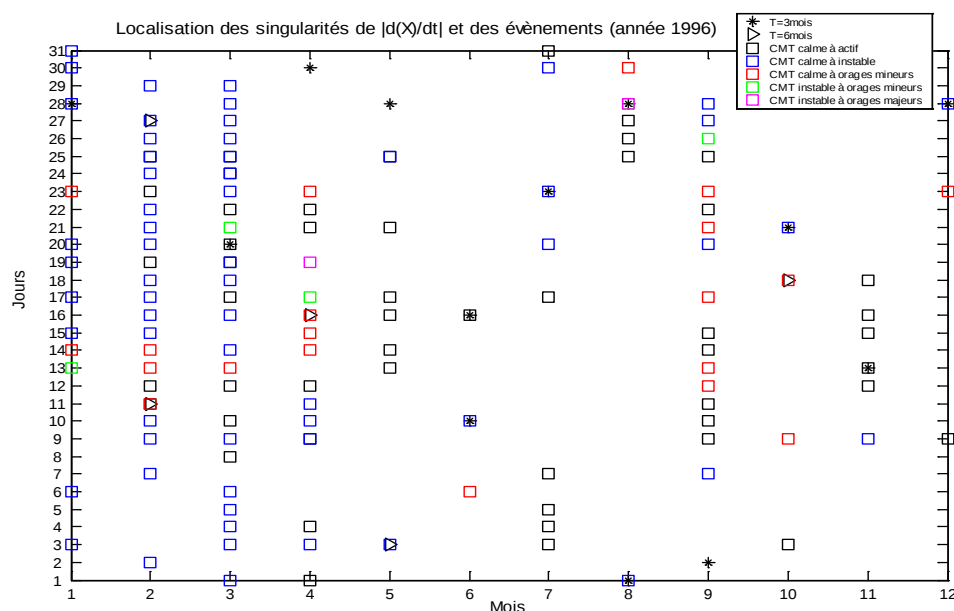


Fig. 43a :Distributions des localisations des singularités de $|dX/dt|$ et des évènements de l'activité géomagnétique et solaire observés, pour l'année 1996.

La description de chaque événement sera donnée dans l'annexe C.

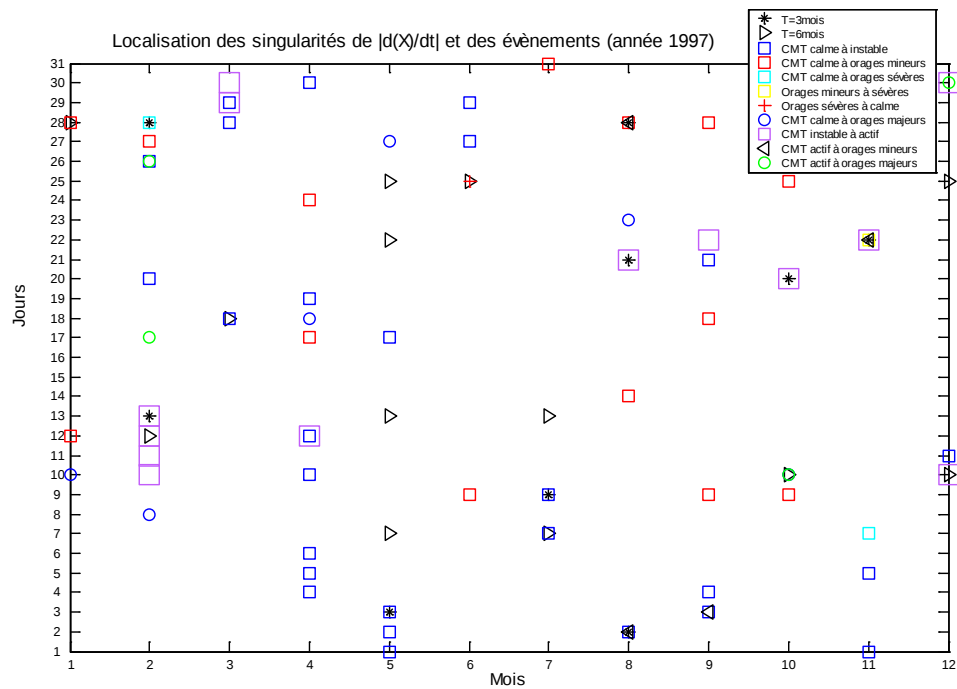


Fig. 43b :Distributions des localisations des singularités de $|dX/dt|$ et des évènements de l'activité géomagnétique et solaire observés, pour l'année 1997.

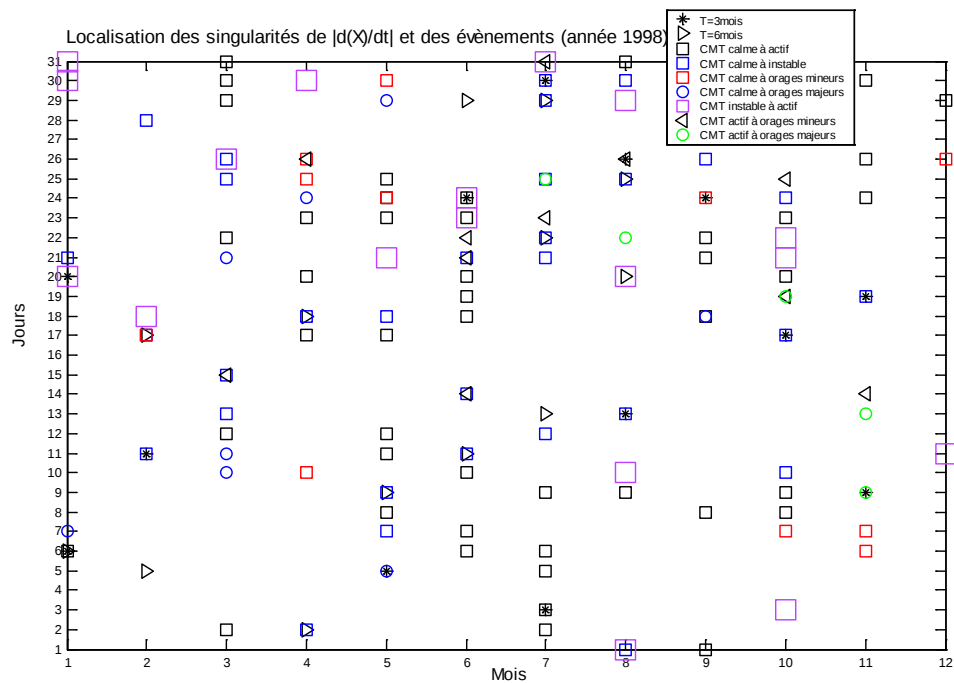


Fig. 43c : :Distributions des localisations des singularités de $|dX/dt|$ et des évènements de l'activité géomagnétique et solaire observés, pour l'année 1998.

Comparé à la figure 43, la figure 44(a, b et c) révèle moins de correspondance entre les singularités détectées dans l'analyse de $|dY/dt|$ pour $T=\{3, 6\}$ mois et les activités géomagnétique et solaire relevées. On remarque aussi que la majorité des évènements est détectée par les singularités de $|dY/dt|$ calculée pour $T=6$ mois pour l'année 1997. Les événements les plus fréquents sont « un champ magnétique terrestre calme à actif » et « instable à actif ».

Les singularités détectées dans l'analyse en ondelettes de $|dZ/dt|$ pour $T=\{3, 6\}$ mois ne correspondent à aucun événement de l'activité géomagnétique et solaire relevé dans l'année 1996. Or on observe plus de correspondance durant la période allant de 1997 à 1998 (Fig. 45a et b). Les événements les plus fréquemment détectés sont : « un champ géomagnétique calme à actif » et « instable à actif » suivi de « actif à orages mineurs ».

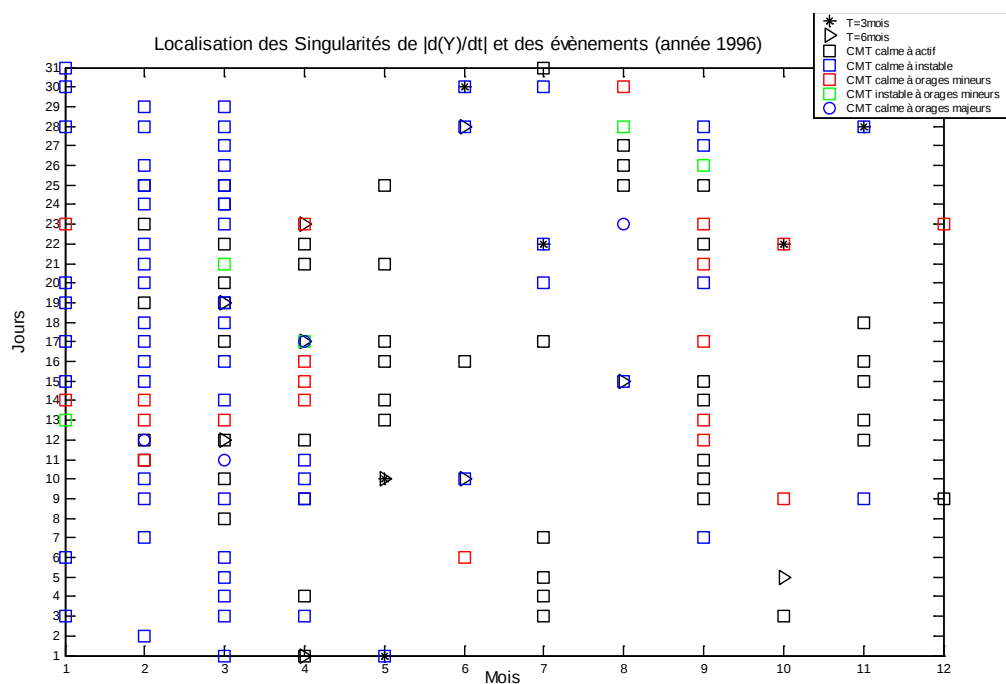


Fig. 44a : Distributions des localisations des singularités de $|dY/dt|$ et des événements de l'activité géomagnétique et solaire observés, pour l'année 1996.

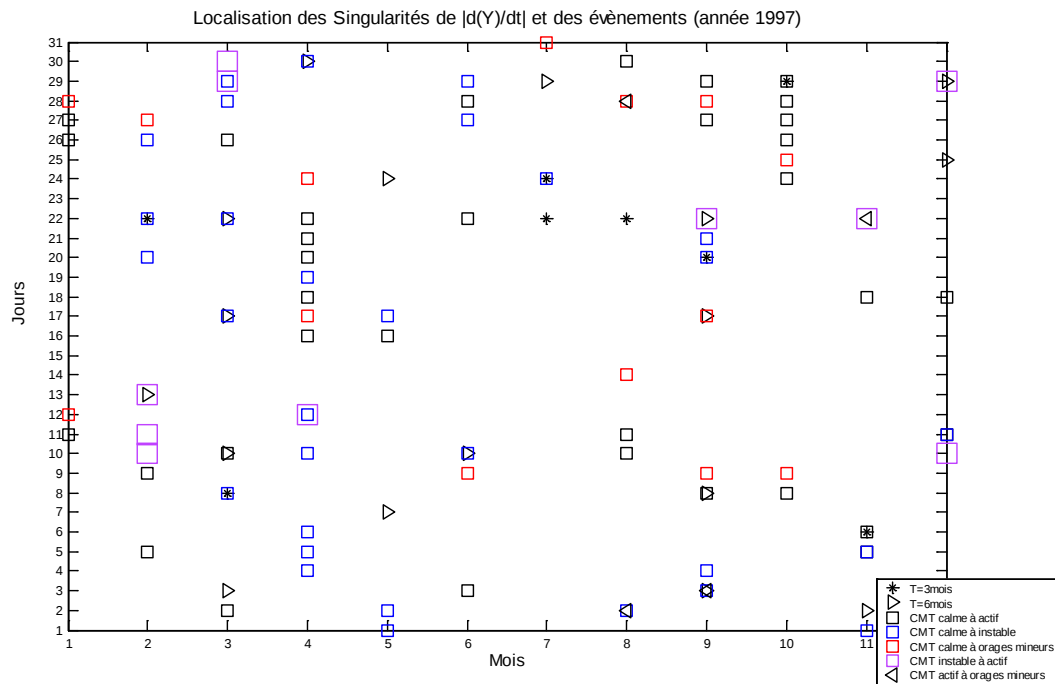


Fig. 44b : Distributions des localisations des singularités de $|dY/dt|$ et des évènements de l'activité géomagnétique et solaire observés, pour l'année 1997.

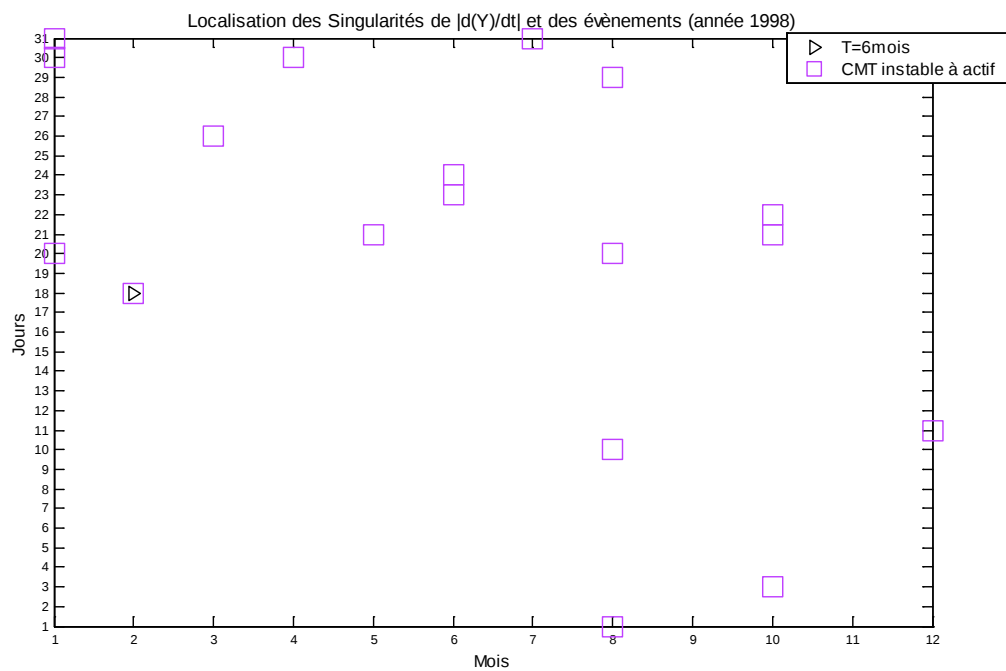


Fig. 44c : Distributions des localisations des singularités de $|dY/dt|$ et des évènements de l'activité géomagnétique et solaire observés, pour l'année 1998.

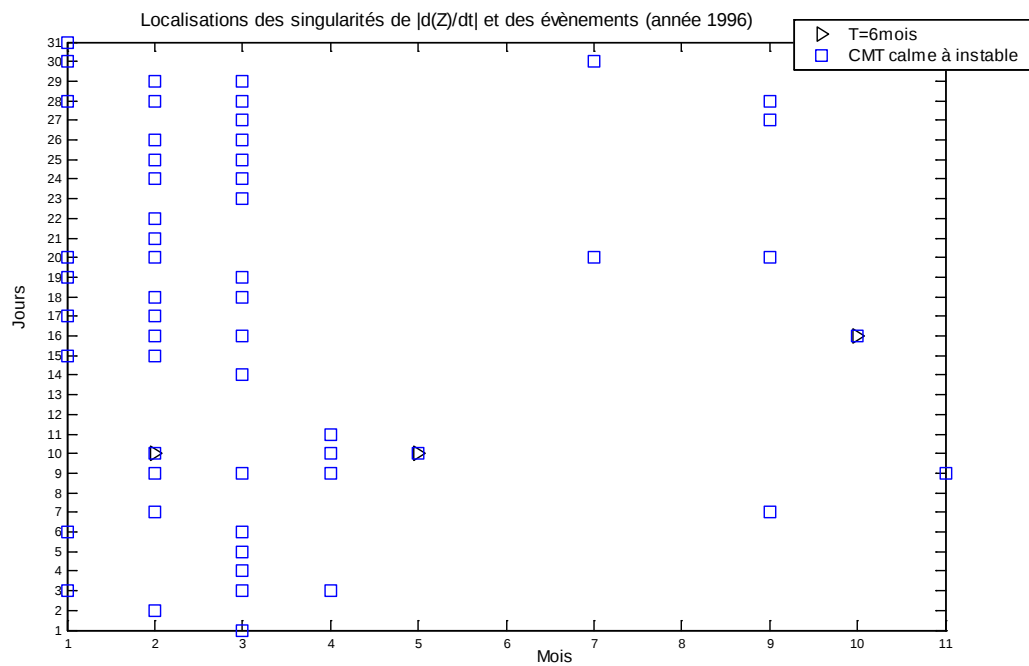


Fig. 45a : Distributions des localisations des singularités de $|dY/dt|$ et des événements de l'activité géomagnétique et solaire observés, pour l'année 1998.

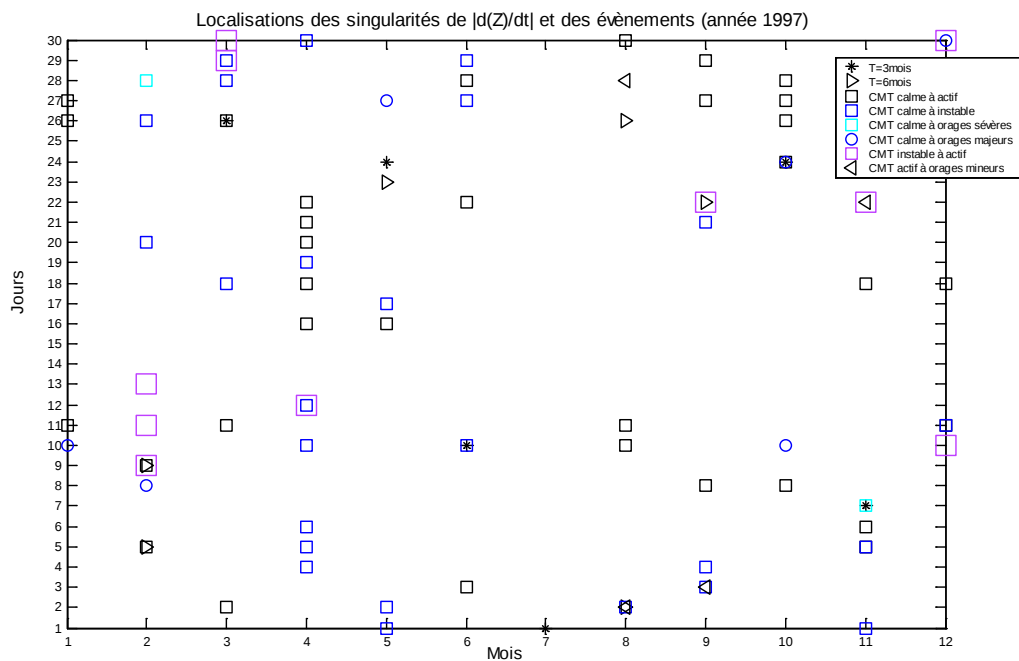


Fig. 45b : Distributions des localisations des singularités de $|dY/dt|$ et des événements de l'activité géomagnétique et solaire observés, pour l'année 1997.

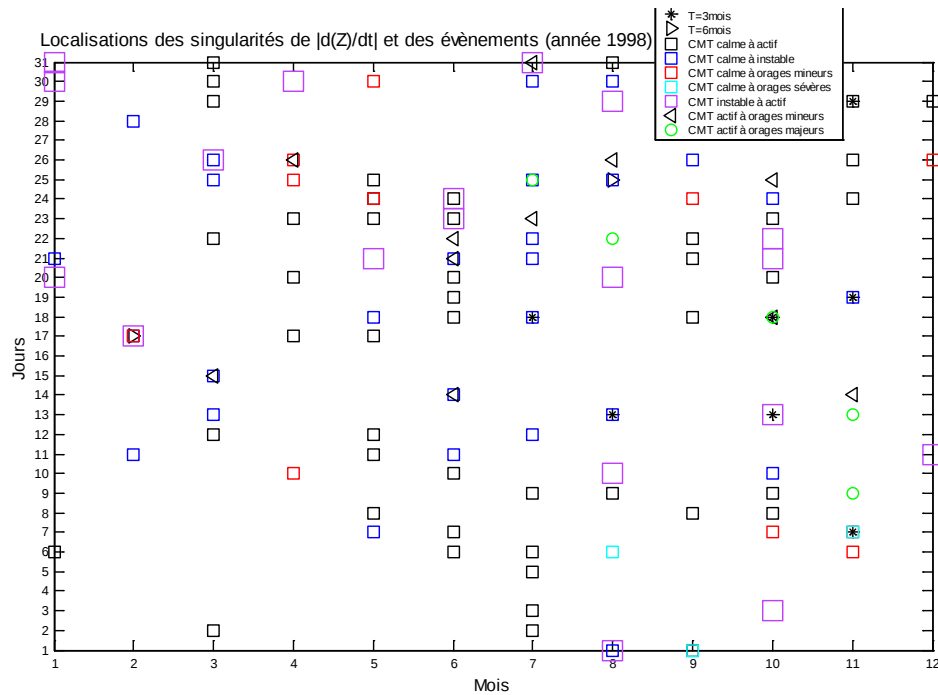


Fig. 45c : Distributions des localisations des singularités de $|dZ/dt|$ et des événements de l'activité géomagnétique et solaire observés, pour l'année 1998.

Maintenant que nous avons relevé les événements de l'activité géomagnétique et solaire mis en évidence par l'analyse en ondelettes, nous allons essayer d'établir un lien entre le type d'événement observé et les régularités α des singularités de $|dX/dt|$, $|dY/dt|$ et $|dZ/dt|$ pour $T=\{3, 6\}$ mois. La figure 46 décrit la distribution de ces événements en fonction des régularités α . Cette distribution permet de situer la nature de l'activité géomagnétique et solaire observée par rapport à un intervalle de variation de la régularité α .

D'après cette figure, nous remarquons une fréquence d'événements par rapport à d'autres. Par exemple, l'apparition des événements 1, 2, 3, 14 et 15 est plus fréquente. Nous remarquons aussi, comme le montre le tableau ci-dessous (Table 2), que les intervalles de variation des régularités ne correspondent pas à un type précis d'activité géomagnétique et solaire. Ceci ne permet pas d'identifier systématiquement le type d'activité par rapport à la régularité calculée. Or les résultats obtenus sont encourageants. Pour mieux exploiter cette méthode nous proposons pour de futurs travaux de prendre des séries de données plus longues et de réduire la fenêtre de filtrage T .

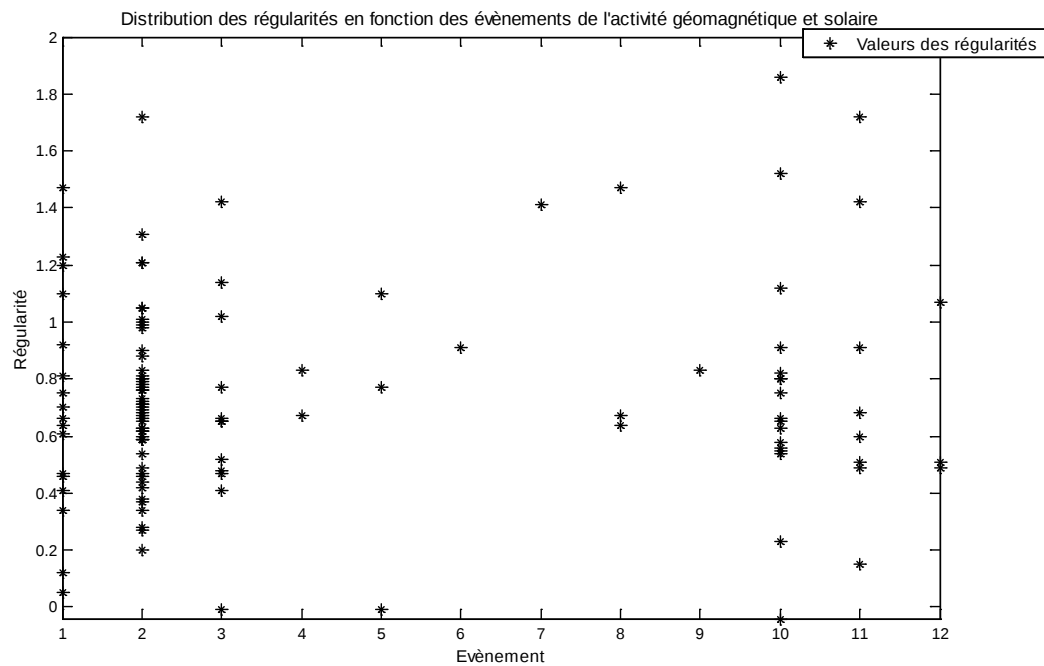


Fig. 46 : Distribution des régularités des singularités de $|dX/dt|$, $|dY/dt|$ et $|dZ/dt|$ pour $T=3$ et 6 mois, en fonction du type de l'activité géomagnétique et solaire observé.

Nous donnons dans la table ci-dessous les intervalles de variation des régularités des singularités de $|dX/dt|$, $|dY/dt|$ et $|dZ/dt|$ calculées pour $T=3$ et 6 mois en fonction des évènements de l'activité géomagnétique et solaire observés. On remarque, à titre d'exemple, que la gamme de variation des régularités est plus large pour un champ magnétique terrestre calme à orages mineurs que pour un champ magnétique instable à orages mineurs.

N°	Evènement	$\alpha_{\min}$	$\alpha_{\max}$
1	CMT· calme à actif	0.05	1.47
2	CMT calme à instable	0.20	1.72
3	CMT calme à orages mineurs	-0.01	1.42
4	CMT instable à orages mineurs	0.67	0.83
5	CMT calme à orages sévères	-0.01	1.10
6	Orages mineurs à sévères	$\alpha=0.91$	
7	Orages sévères à calmes	$\alpha=1.41$	
8	CMT calme à orages majeurs	0.64	1.47
9	CMT instable à orages majeurs	$\alpha=0.83$	
10	CMT instable à actif	-0.04	1.86
11	CMT actif à orages mineurs	0.15	1.72
12	CMT actif à orages majeurs	0.49	1.07

Table 4 : Table résumant les intervalles de variation de α par rapport au type d'évènement observé.

· CMT≡ Champ magnétique terrestre.

Analyse de l'Activité Solaire

Introduction

L'observation du nombre de taches solaires et des indices de l'activité géomagnétique constitue un outil d'investigation de l'activité solaire pour une meilleure compréhension des phénomènes physiques mis en jeu à l'intérieur de l'étoile et l'interaction électromagnétique du vent solaire avec l'environnement magnétique de la Terre. Les cycles solaires, qu'il soient décrits par le nombre de taches solaires **ssn** ou par les indices **aa**, sont très variables dans leurs caractéristiques et montrent que les phénomènes mis en jeu sont complexes. Ces variations sont représentées sur les figures 47 et 48, et montrent des cycles différents les uns des autres par leur amplitudes, leur durée ou leur longueur, qui est conventionnellement définie comme la différence de temps entre deux minimums consécutifs de taches solaires (Mursula et al., 1998). Durant un cycle les variations sont rapides aussi bien pour **ssn** (Fig. 49) que pour **aa** (Fig. 50).

Notre but ici est d'analyser l'activité solaire en proposant un modèle paramétrique équivalent à celui proposé par Hathaway et al. (1999). Pour cela nous utiliserons les distributions du nombre de taches solaires **ssn** et les indices de l'activité géomagnétique **aa** décrits au chapitre II. Un modèle analytique pour chaque cycle est ainsi déterminé. Dans la suite nous désignerons ce modèle par signal synthétique, par opposition au signal réel. Nous appliquons, enfin, au signal synthétique ainsi obtenu la TOC afin de déterminer et de caractériser les singularités liées aux différents cycles solaires. Un bruit blanc sera par la suite ajouté aux données des deux modèles. Ainsi, nous tenterons de différencier les singularités caractéristiques du bruit de celles liées au signal. Cette analyse sera ensuite appliquée aux données réelles. L'analyse spectrale des cycles de taches solaires ainsi que ceux de l'activité géomagnétique réalisée au préalable. Nous nous intéresserons, également, aux spectres de fréquence des cycles 22 de **ssn** et **aa**. Cette étude spectrale permettra de mettre en évidence les composantes harmoniques régulières des activités solaire et géomagnétique.

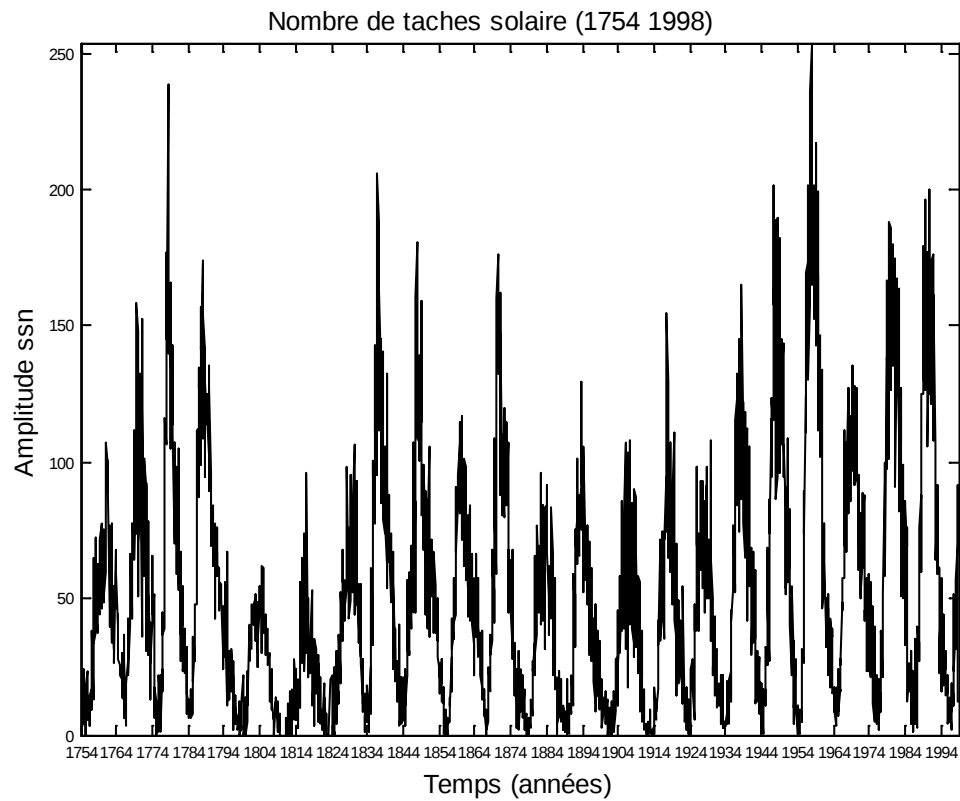


Fig. 47: Distribution temporelle du nombre de taches solaires (**ssn**) 1754-1997.

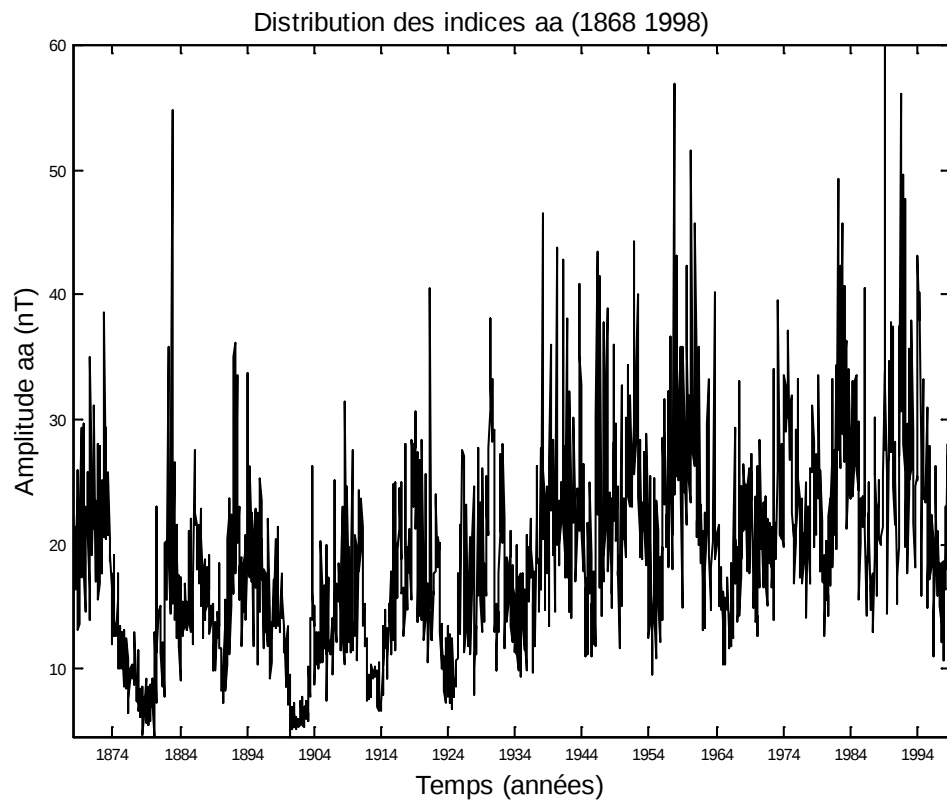


Fig. 48: Distribution temporelle des indices (**aa**) de l'activité géomagnétique 1868-1998.

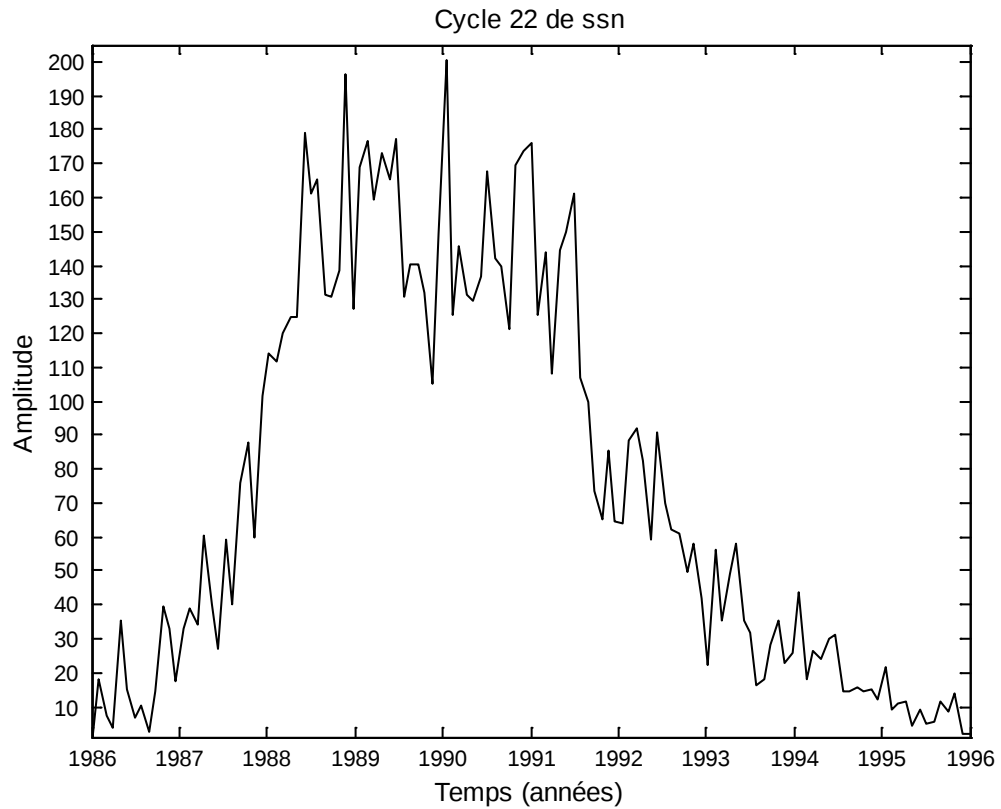


Fig. 49: Variation du nombre de taches solaires dans un cycle solaire.

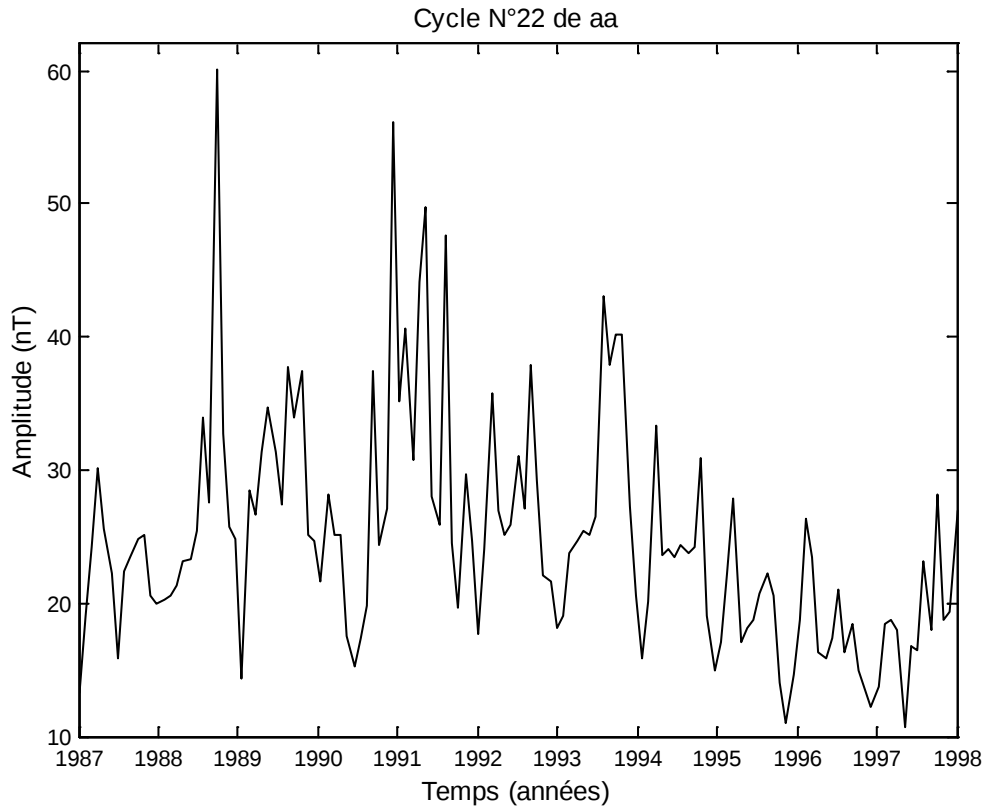


Fig. 50: Variation de l'indice **aa** dans un cycle solaire.

I. Analyse spectrale des cycles de taches solaires (ssn)

L'analyse spectrale de la distribution du nombre de taches solaires (**ssn**) par la TF permet de déterminer les différentes périodes du phénomène. Cette analyse portera sur l'ensemble des cycles disponibles puis sur le cycle 22 pour une éventuelle corrélation avec l'analyse du champ magnétique terrestre.

I.1. Analyse spectrale des cycles de taches solaires sur la période 1754-1997

L'analyse spectrale des cycles de taches solaires porte sur les données de période 1754-1997 dont le résultat est représenté sur la figure 51. On peut voir un battement de 244ans et son harmonique à 122ans ainsi que le cycle de Gleissberg de l'ordre de 80ans qui décrit la période de variation de la longueur du cycle de taches solaires (Vigouroux, 1996). On trouve aussi les périodes de 22 ans où le champ magnétique du Soleil change de polarité sur la durée de deux cycles successifs. On voit également le battement de 11ans; période caractéristique de la variation d'un cycle de taches solaires. Dans cette figure nous n'avons montré que les périodes de variation à long terme. Quant aux périodes inférieures à 11 ans, nous les montrons dans l'analyse spectrale du cycle 22.

I.2. Analyse spectrale du cycle 22 du nombre de taches solaires

Les battements des périodicités d'un cycle de taches solaires révélés par l'analyse spectrale, sont ceux de 10ans qui caractérise la variation du champ magnétique solaire sur un cycle. La quasi périodicité de 1,3 ans qui apparaît pendant les cycles solaires paires et qui correspond à l'évolution des trous coronaux (Mursula et al., 2000). Les trous coronaux souvent localisés aux pôles, peuvent descendre à l'équateur durant certaines périodes du cycle solaire. Le champ magnétique émis par ces trous est largement ouvert sur le milieu interplanétaire (Vigouroux, 1996). Celle d'un an et son harmonique six mois qui apparaissent pendant les mois d'équinoxe (en mars et septembre) et de solstice (juin et décembre) (Nevanlinna et al., 1993b).

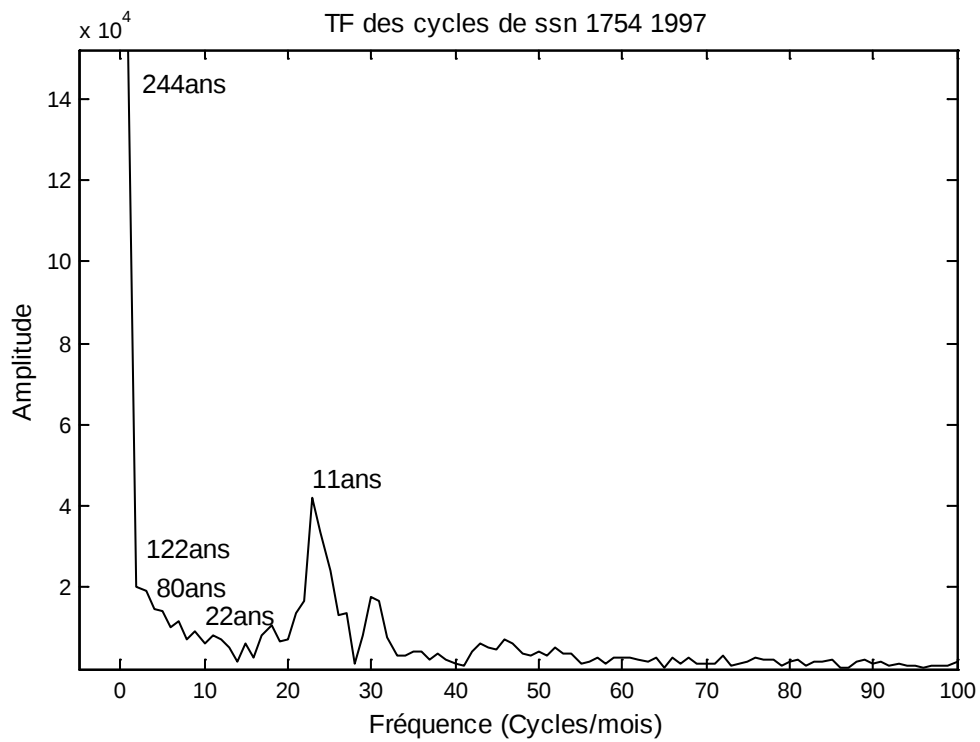


Fig. 51: Analyse spectrale des cycles de **ssn** (1754-1997).

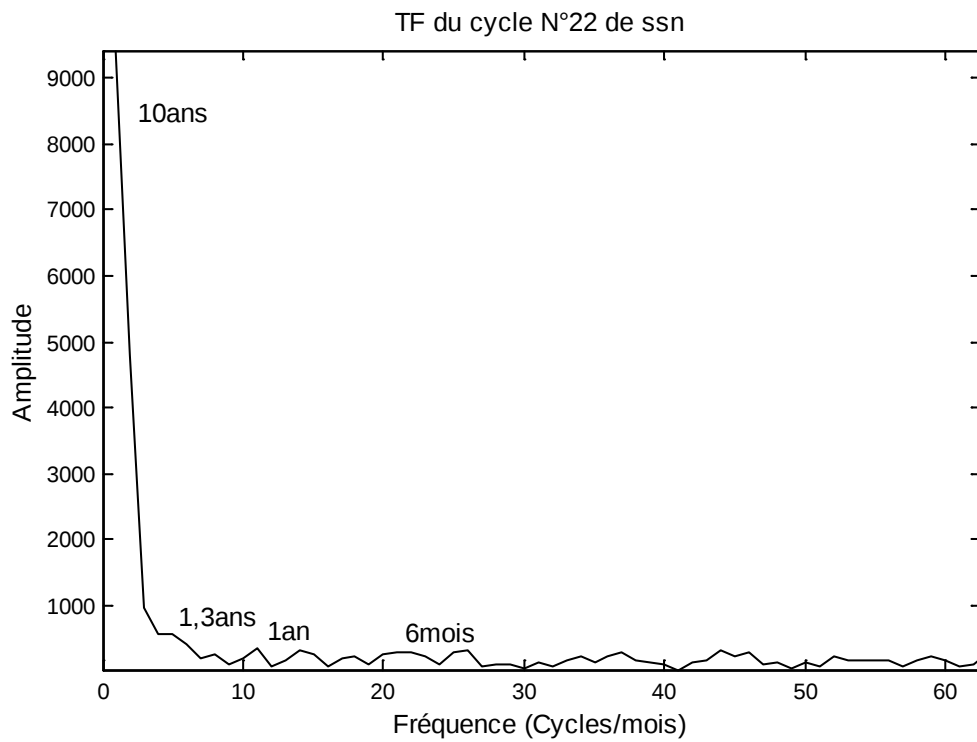


Fig. 52: Analyse spectrale du cycle 22 de **ssn** (1986-1997).

II. Calcul du Modèle des cycles de l'activité solaire

Hathaway et al., (1999) ont montré que le cycle solaire pouvait être représenté par une fonction paramétrique $R(t)$:

$$R(t) = a(t - t_0)^b e^{-c(t-t_0)} \quad (1)$$

Où a , b , c , et t_0 sont des paramètres qui caractérisent chaque cycle. Les termes en puissance et en exponentielle décrivent, respectivement, la phase montante et la phase descendante d'un même cycle solaire.

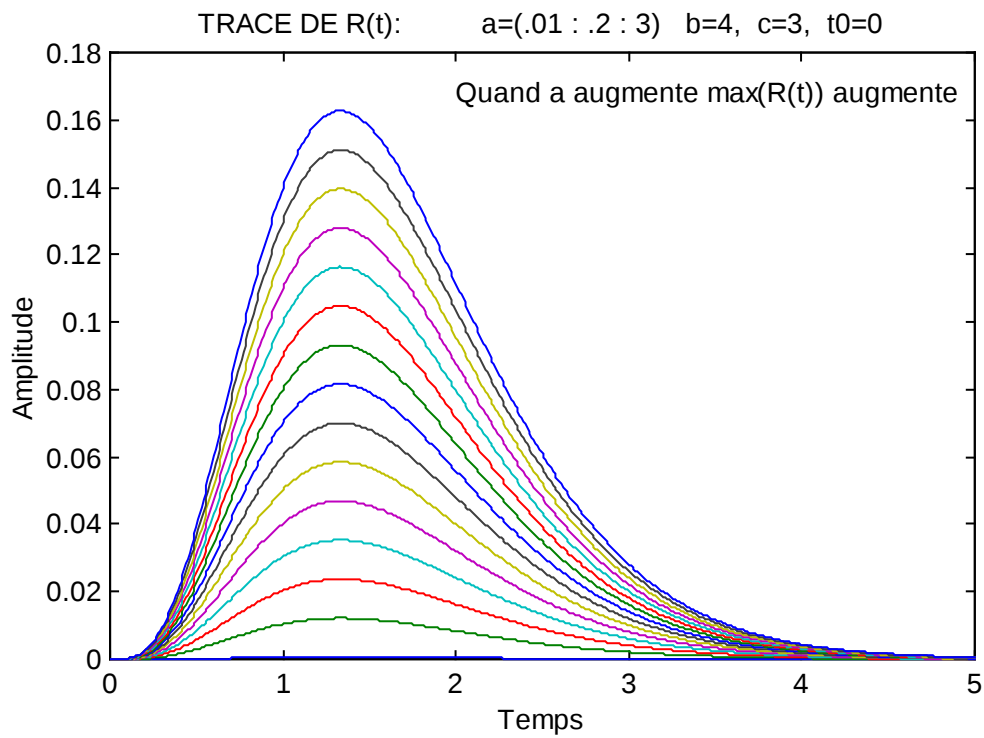
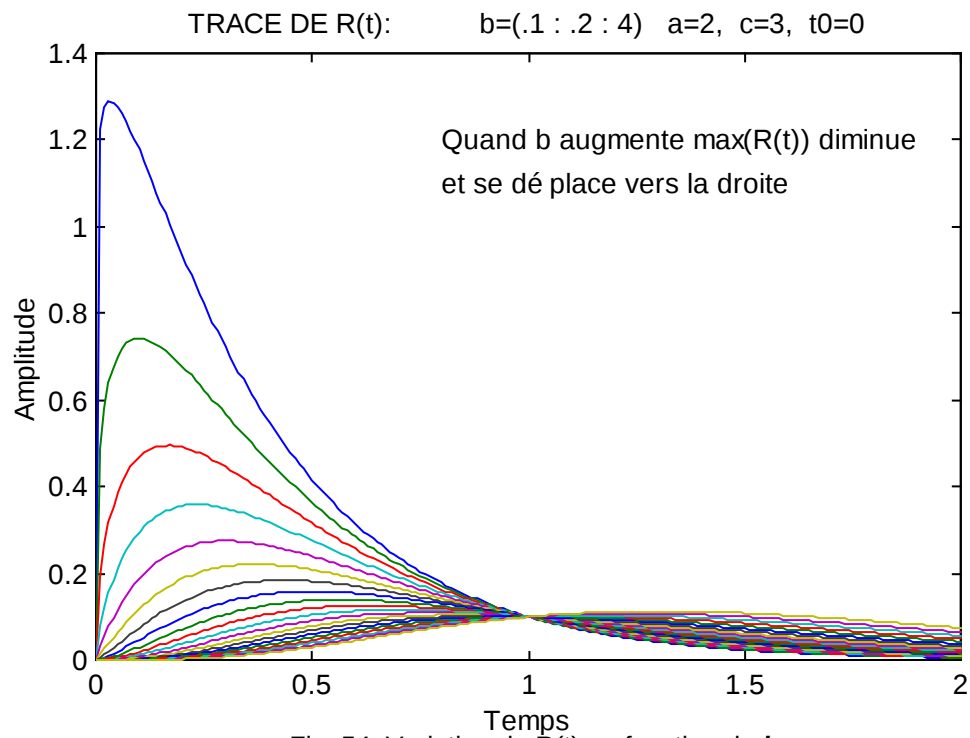
II.1. Etude analytique de $R(t)$

Avant de passer au calcul du modèle synthétique et à son analyse en ondelettes, nous commençons par l'étude analytique du modèle $R(t)$. Comme $R(t)$ varie au même temps en fonction des trois paramètres (a , b et c), sachant que t_0 est fixé, nous essayons de voir l'influence de l'un par rapport à l'autre en faisant varier, dans un premier temps, un paramètre et fixer les deux autres. Et en second lieu, nous ferons varier deux paramètres simultanément en fixant le troisième.

Le tableau établi ci-dessous illustre la variation de $R(t)$ en fonction de a , b et c .

Paramètre(s) varié(s)	Variation de $R(t)$
a (Fig. 53)	Influe sur la valeur du maximum de $R(t)$: quand a augmente la valeur du maximum de $R(t)$ augmente.
b (Fig. 54)	En augmentant, la valeur du maximum de $R(t)$ diminue et sa position se déplace vers la droite (elle s'éloigne de l'origine des temps).
b et c : $c \in \mathbb{R}$ $b < 1$ (Fig. 55a) $c \in \mathbb{R}$ $b = 1$ (Fig. 55b) $c \in \mathbb{R}$ $b > 1$ (Fig. 55c)	Influent sur la valeur et la position du maximum de $R(t)$; en augmentant, la valeur du maximum de $R(t)$ diminue et sa position se déplace vers la gauche (elle se rapproche de l'origine des temps).

Table 5: Tableau illustrant la variation de $R(t)$ en fonction de a , b et c .

Fig. 53: Variation de $R(t)$ en fonction du paramètre a .Fig. 54: Variation de $R(t)$ en fonction de b .

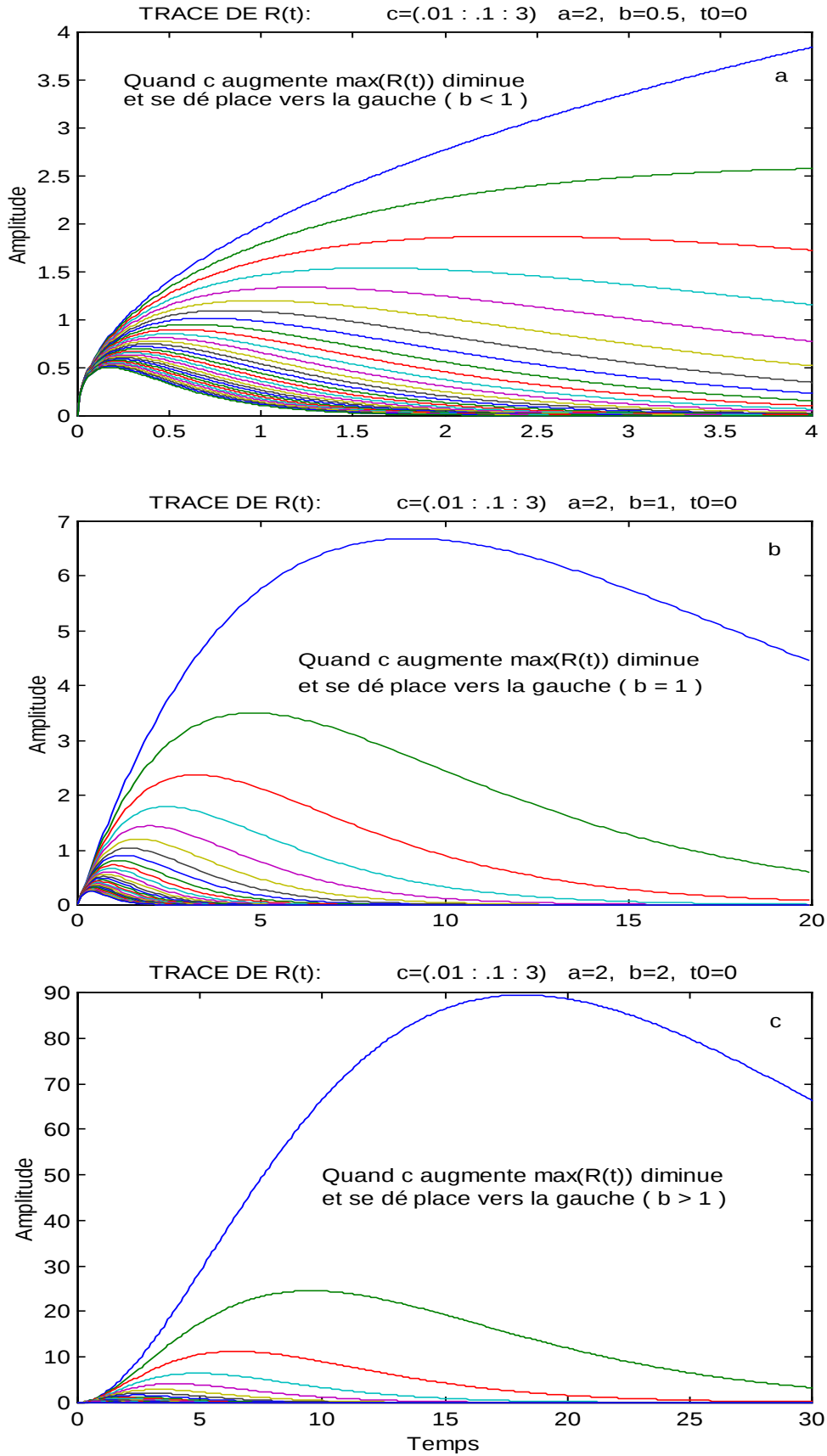


Fig. 55: (a) Variation de $R(t)$ en fonction de c avec $b < 1$. (b) Variation de $R(t)$ en fonction de c avec $b = 1$. (c) Variation de $R(t)$ en fonction de c avec $b > 1$.

Les paramètres **a**, **b** et **c** permettent, par un ajustement approprié, de mettre en forme la fonction **R(t)**. A savoir la valeur et la position du maximum et la largeur du "lobe principal".

Ce modèle est, donc, appliqué pour décrire les cycles de taches solaires et de l'activité géomagnétique, à partir des moyennes mensuelles du nombre de taches solaires **ssn** et de **aa**, respectivement.

II.2. Modèle de distribution du nombre de taches solaires **ssn**

Il s'agit de trouver un modèle synthétique qui ajuste au mieux chaque cycle de taches solaires en faisant varier **a**, **b** et **c** sur IR. Pour un cycle donné (**t₀** fixé) on détermine les valeurs des paramètres **a**, **b** et **c** pour lesquels le signal obtenu est, au sens des moindres carrés, celui qui minimise l'écart entre le signal réel et le modèle (Fig. 56). Ceci revient à résoudre le problème suivant:

On pose $t' = t - t_0$, $\theta^T = (a, b, c)$

Il revient à résoudre $\underset{\text{Cycle}}{\text{Min}}_{\theta} \int (R(\theta, t') - Cr)^2 dt$ Où **Cr** désigne un cycle réel donné.

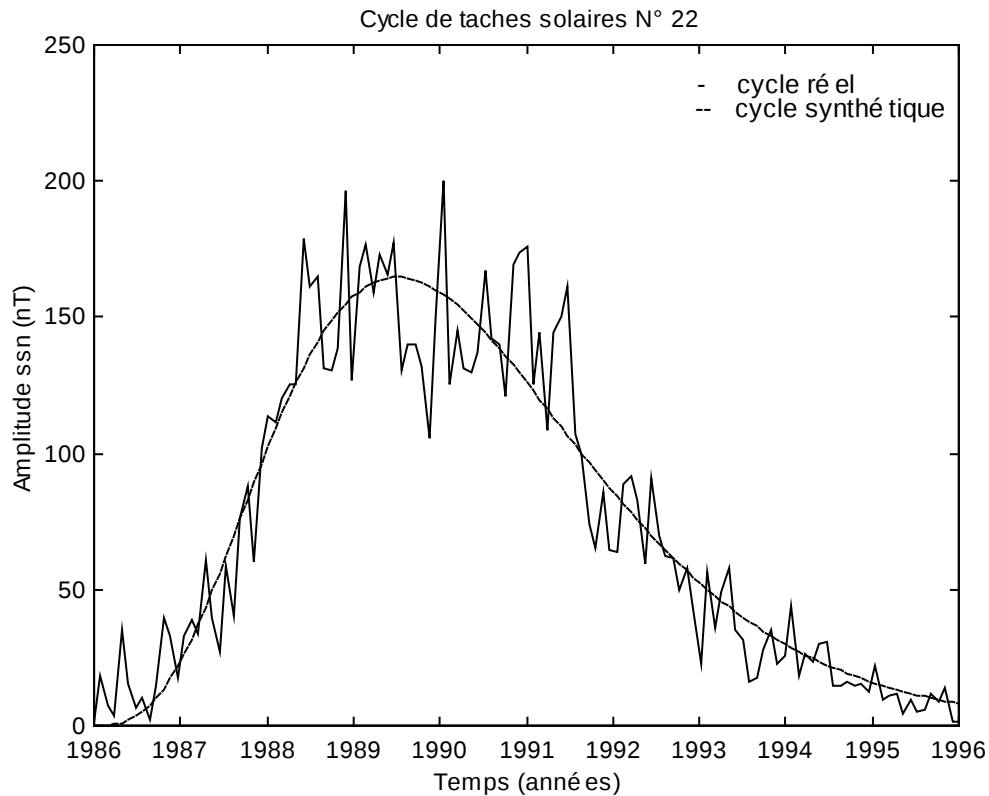


Fig. 56: Approche du cycle réel N°22 de **ssn** par le modèle synthétique.

Les modèles sont calculés en déterminant les valeurs optimales des paramètres **a**, **b** et **c** pour chacun des 22 cycles de l'activité solaire. On obtient alors des séries de valeurs des paramètres **a**, **b** et **c**, dont nous examinerons la nature de leur variation sur une échelle logarithmique (Fig. 57).

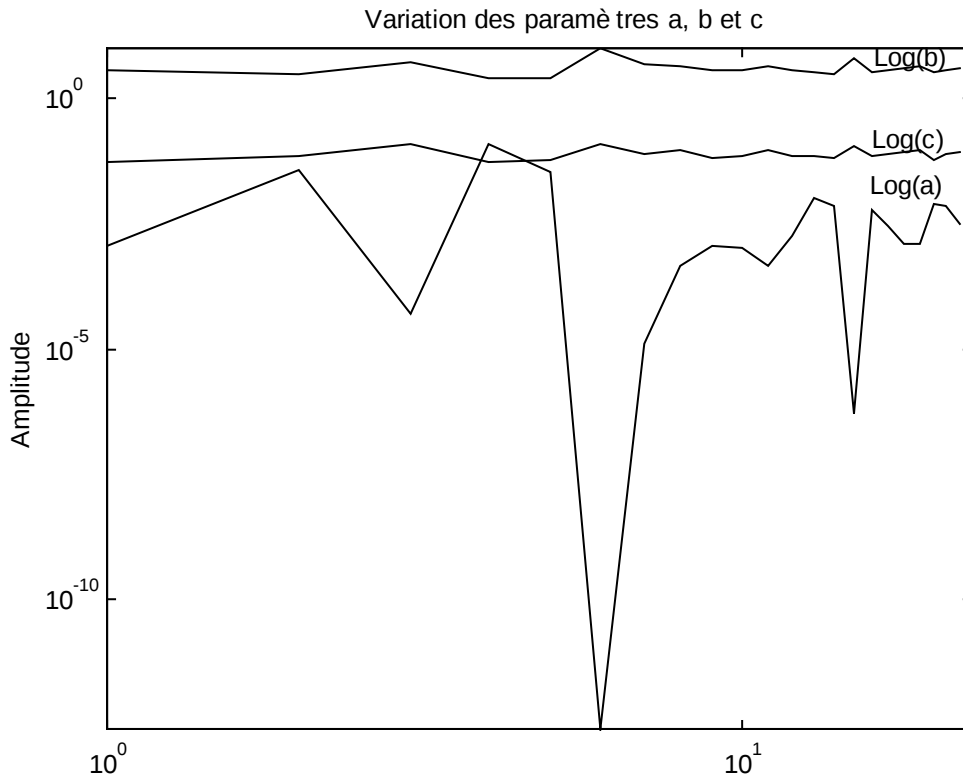


Fig. 57: Variation, sur une échelle logarithmique, de la série des paramètres **a**, **b** et **c** calculée pour les 22 cycles de l'activité solaire décrites par **ssn**.

D'après la figure 57, on remarque que les paramètres **a**, **b** et **c**, représentés sur une échelle logarithmique, varient de manière aléatoire et ne sont, *a priori*, pas décrits par une loi mathématique simple. Il est donc impossible en utilisant les méthodes classiques de les calculer à l'avance afin de modéliser des cycles à venir. Or les tracés de $\text{Log}(\mathbf{b})$ et $\text{Log}(\mathbf{c})$ présentent une similitude dans leur variation. Quant à $\text{Log}(\mathbf{a})$, il varie de façon très différente des deux autres paramètres. Ce que nous remarquons c'est que les minimums de $\text{Log}(\mathbf{a})$ correspondent aux maximums de $\text{Log}(\mathbf{b})$ et $\text{Log}(\mathbf{c})$.

Notons qu'aucune condition n'a été posée, par les auteurs, quant à la reconstitution, à partir du modèle proposé, d'un signal décrivant l'activité solaire sur plusieurs cycles. Le modèle synthétique de l'activité solaire sur toute la période est

obtenu en juxtaposant les 22 cycles calculés individuellement (Fig. 58a). Pour cela nous procédons comme suit:

Soient $R_1(t'_1)$ et $R_2(t'_2)$ sont les modèles de deux cycles consécutifs, tels que:

$$\begin{aligned} R_1(t'_1) &= a_1(t_1 - t_{01})^{b_1} e^{-c_1(t_1 - t_{01})^1} = a_1 t_1^{b_1} e^{-ct_1^1} \\ R_2(t'_2) &= a_2(t_2 - t_{02})^{b_2} e^{-c_2(t_2 - t_{02})} = a_2 t_2^{b_2} e^{-ct_2} \end{aligned} \quad \begin{cases} t'_2 = t_2 - t_1 = t_2 - t_{02} \\ t_1 = t'_1 + t_{01} \end{cases}$$

où t_{0i} est le temps de commencement du cycle N°i

La juxtaposition de tous les cycles (Fig. 58a) est donnée par $R_T(t)$ tel que:

$$R_T(t) = R_1(t'_1) + R_2(t'_2) + R_3(t'_3) + \dots + R_n(t'_n) \quad \text{avec } t'_n = t_n - t_{n-1}$$

Où n est le numéro de chaque cycle; $n \in [1, N]$, et N; le nombre total des cycles.

III. Analyse du modèle des cycles de taches solaires

III.1. Analyse du modèle synthétique des cycles de taches solaires sur la période 1754-1997

L'analyse en ondelettes continues doit nous permettre de déterminer et de caractériser les singularités propres au signal synthétique.

L'ondelette utilisée est du type "Chapeau mexicain". C'est une ondelette réelle construite à partir de la dérivée seconde d'une gaussienne (Truchetet, 1998). Elle possède l'avantage d'être bien adaptée à la détection des discontinuités (Bouchereau, 1997):

$$\psi(x) = \frac{2}{\sqrt{3}} \pi^{-1/4} (1 - x^2) \exp(-x^2/2) \quad (2)$$

Rappelons que la transformée en ondelettes $WR(t, a)$ du modèle synthétique, décrivant l'activité solaire sur la période 1754-1997, $R(t)$, sera défini par:

$$WR(t, a) \equiv R(t) * \psi_a(t)$$

$$\psi_a(t) = a^{-1} \psi\left(\frac{t}{a}\right) \quad (3)$$

Les lignes de maxima du modèle synthétique du nombre de taches solaires sont représentées sur la figure 58b. Nous constatons, qu'elles sont concentrées au niveau des minima du modèle, ce qui n'est pas surprenant, car ils constituent à eux seuls par construction des singularités.

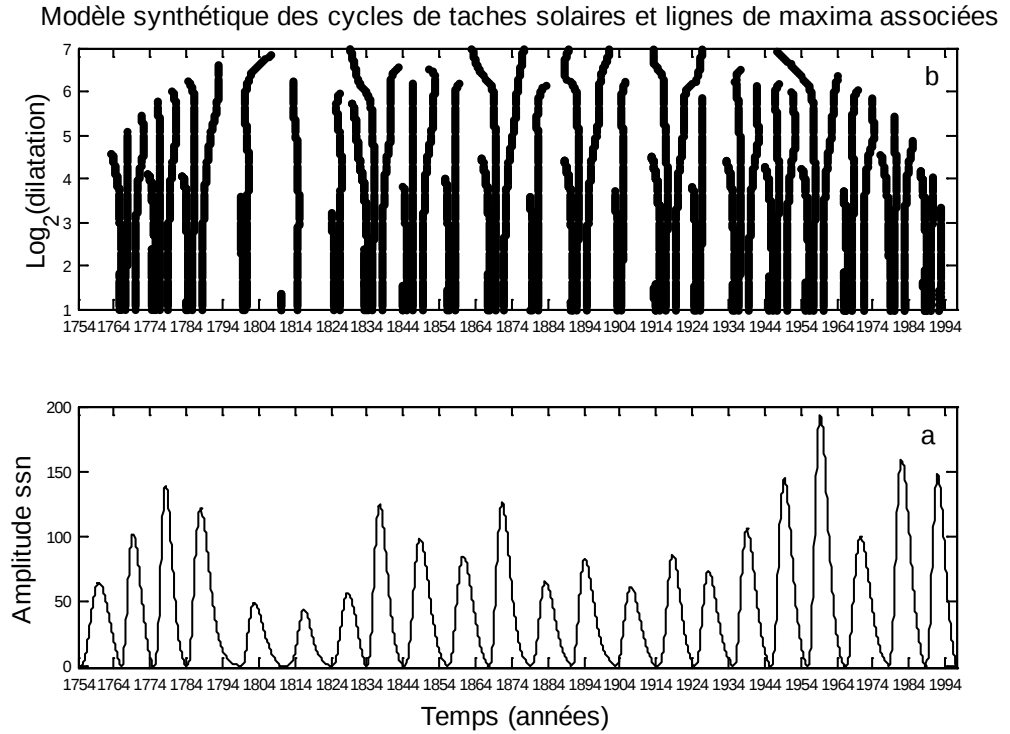


Fig. 58: (a) Modèle synthétique des cycles du nombre de taches solaires sur la période 1754-1997. (b) Lignes de maxima associées.

III.2. Analyse en ondelettes continues du modèle synthétique du cycle 22 de l'activité solaire

Nous étudions, donc dans un premier temps par TOC un cycle synthétique tel qu'il est représenté sur la figure 59a. Ce modèle sera évidemment bruité pour simuler les données réelles (Fig. 60a). L'étude de la régularité des lignes de maxima fournit les

caractéristiques des singularités. Sachant que cette régularité est donnée en fonction des variations du module de la TOC le long des lignes de maxima.

III.2.1. Analyse en ondelettes continues du modèle synthétique exact

L'analyse en ondelettes révèle 4 lignes de maxima du modèle synthétique du cycle 22 de **ssn** (Fig. 60). Ces lignes sont localisées au début, à l'extremum et à la fin du cycle.

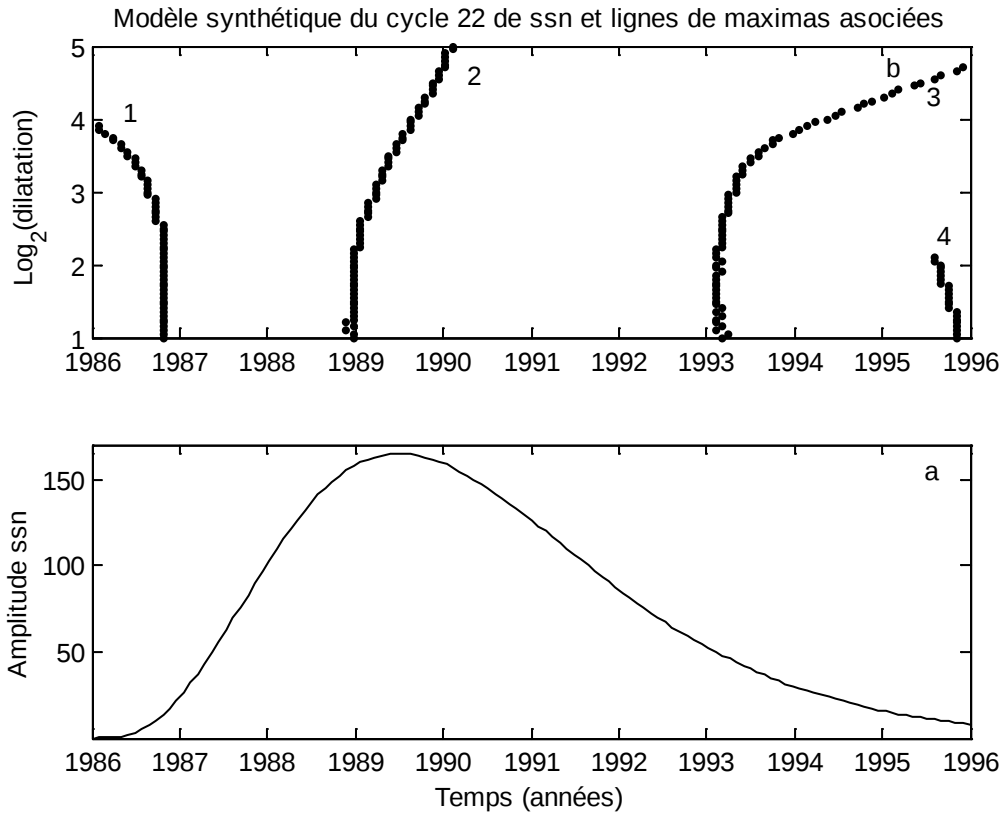


Fig. 60: Modèle synthétique du cycle 22 de **ssn** (a) et lignes de maxima (b).

Les lignes de maxima sont différentes par leur forme et leurs amplitudes. Les trois premières lignes de maxima sont d'une amplitude plus importante que la dernière ligne. La figure 61 représente les crêtes d'ondelettes sur une échelle logarithmique. Elles sont données par la variation de $|W[f(t,a)]|$ le long d'une ligne de maxima en fonction de la dilatation (a) . En observant les crêtes on voit qu'elles sont croissantes à

¹ Rappelons que dans tout le manuscrit les crêtes d'ondelettes ainsi que les lignes de maxima sont tracées sur une échelle logarithmique à base 2.

tendance linéaire à l'exception de la dernière qui est décroissante. Ces crêtes ont, respectivement, les régularités $\alpha_i = \{1.39; 1.63; 1.74; -8.69\}$.

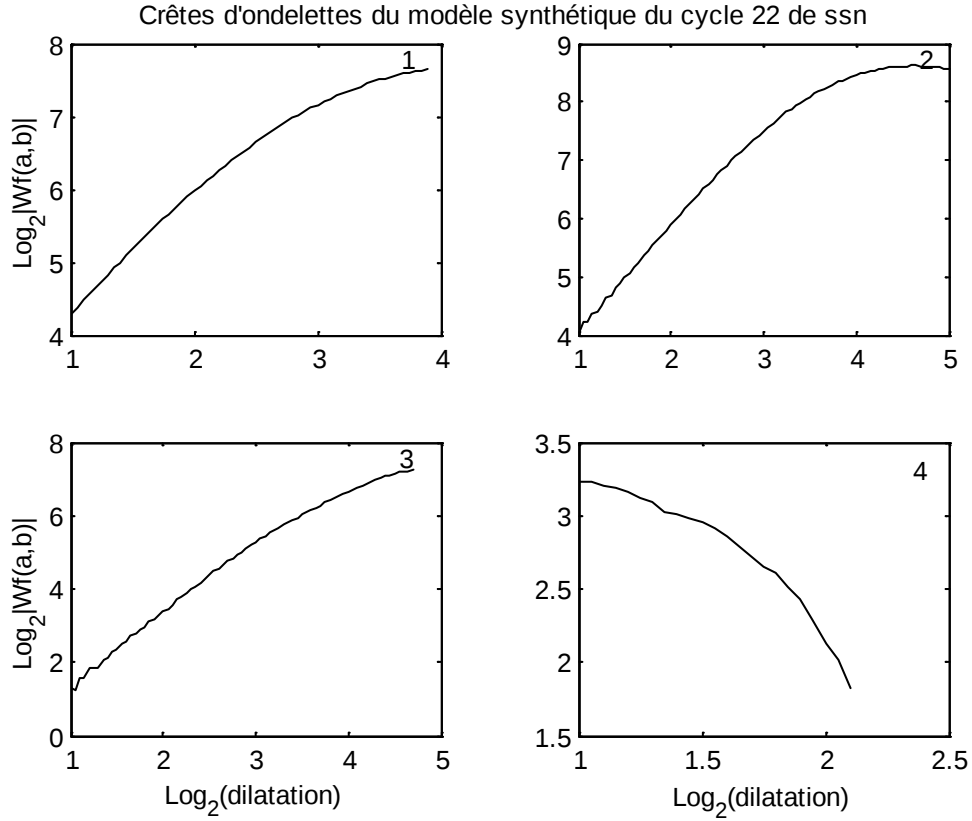


Fig. 61: Crêtes d'ondelettes du modèle synthétique du cycle 22 de *ssn*.

III.2.2. Analyse en ondelettes continues du modèle synthétique du cycle 22 avec bruit

Passons maintenant à l'analyse en ondelettes et la détermination des lignes de maxima associées au même modèle auquel nous avons ajouté un bruité (Fig. 62a). Le bruit ajouté est de moyenne nulle, de variance égale à l'unité et d'amplitude de l'ordre 1.5% de celle du signal utile. La propriété de linéarité de la transformée en ondelettes continues donne, en représentant le bruit ajouté par $n(t)$ et le signal global par $f(t) = R(t) + n(t)$:

· D'un point de vue pratique, nous nous intéressons aux crêtes d'ondelettes de type 1 où nous étudions la partie linéaire pour les singularités caractérisées par des régularités positives ($\alpha > 0$).

$$Wf(t, a) = W[R(t, a)] + W[n(t, a)]$$

Les lignes de maxima associées à ce modèle sont décrites en (Fig. 62b). A première vue, on remarque que le bruit ajouté a généré d'autres lignes de maxima plus ou moins importantes en amplitude. Le bruit a apparemment influencé, en amplitudes et localisations, les lignes de maxima associées au modèle synthétique initial. Ces dernières correspondent, respectivement, aux lignes 1, 2, 13 et 20 (Fig. 62). Nous remarquons un léger décalage vers la gauche des lignes 1 et 2 (Fig. 62) par rapport à leur position (Fig. 60). La ligne de maxima 3 (Fig. 60), sous l'influence du bruit, a changé de forme et d'amplitude. Alors que le cas 20 n'a pas été, *a priori*, influencé par le bruit.

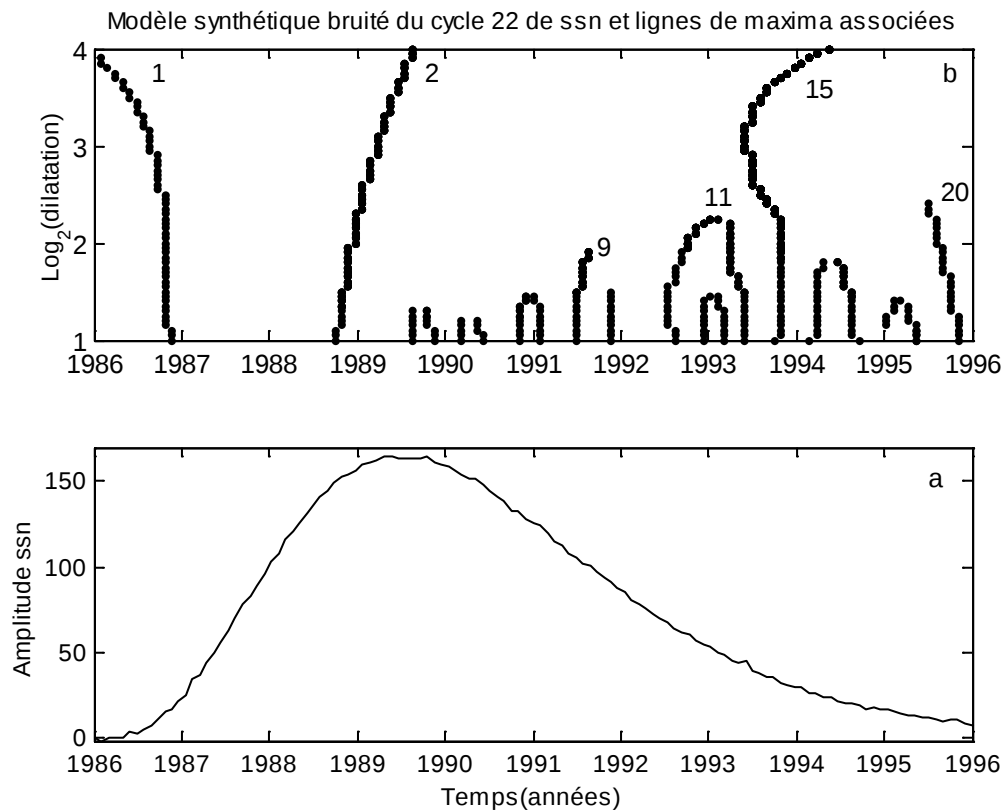


Fig. 62: (a) Modèle synthétique du cycle 22 de **ssn**. (b) Lignes de maxima associées.

Nous représentons dans la figure 63 les localisations des singularités contenues dans les modèles synthétique exact et bruité du cycle 22 de **ssn**. Cette illustration permettra de mieux observer l'influence du bruit sur les dates d'occurrence des

singularités. On voit clairement que seule la ligne 4 (Fig. 60b) qui apparaît le 27/10/1995 n'a pas été décalée par le bruit, contrairement aux trois autres lignes de maxima. Ces dernières ont été déplacées soit à droite ou à gauche de leur localisation originelle. Un tableau (Table 6) donnera, par la suite, des détails quant à l'influence du bruit sur les singularités contenues dans le modèle synthétique exact.

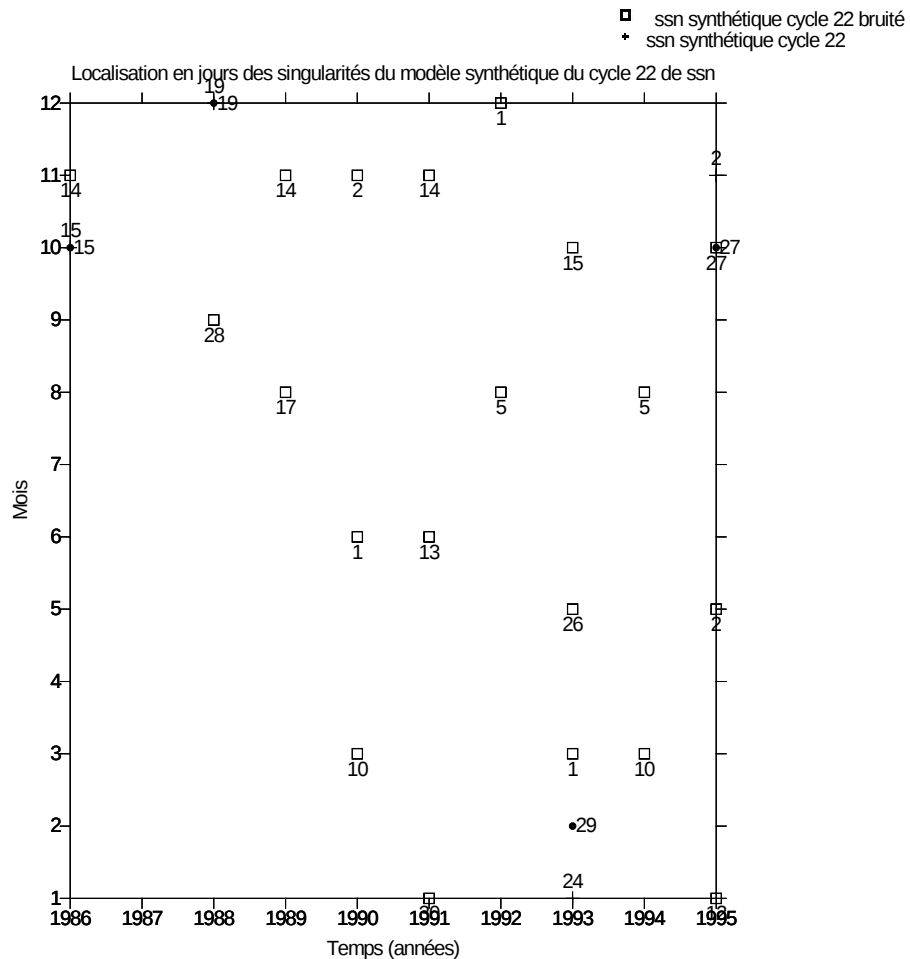


Fig. 63 : Localisation des singularités du modèle synthétique exact et bruité du cycle 22 de **ssn**.

Observons maintenant de quelle manière le bruit influence-t-il les crêtes d'ondelettes du modèle initial? Les crêtes 1 et 2 décrivent la même variation, elles ont une tendance linéaire positive et sont décroissantes à partir de $a=2^{4.6}$. La crête 13 (Fig. 64) (laquelle correspond à la crête 3 (Fig. 61)) n'a pas, *a priori*, subi de changement. La crête 20 (Fig. 64) a une tendance linéaire positive à partir de $a=2^{2.4}$ alors que la

crête 4 (Fig. 61) a une tendance linéaire négative. On remarque que cette dernière est contenue dans la partie négative de la crête 20.

Nous résumons dans un tableau (Table 6) l'influence du bruit sur le modèle exact du cycle 22 de **ssn**. Où on peut lire la valeur de la régularité α de chaque singularité contenue dans le modèle exact et de celle leur correspondant dans le modèle bruité du cycle 22 de **ssn** ainsi que leur localisation temporelle. Des commentaires seront donnés quant à l'influence du bruit sur les caractéristiques des lignes de maxima mises en évidence.

	N° Crête		Régularité α		Localisation		Observation
	exact	bruité	exact	bruité	exact	bruité	
Modèle synthétique du cycle 22 de ssn	1	1	1.4	1.4	15/10/1986	14/11/1986	Décalage temporel.
	2	2	1.6	1.5	19/12/1988	28/09/1988	Décalage temporel et variation de la régularité α .
	3	13	1.7	1.7	29/02/1993	01/03/1993	Décalage temporel.
	4	20	-0.8	1.5	27/10/1995	27/10/1995	Variation de la régularité α .

Table 6: Valeurs des régularités des crêtes d'ondelettes et localisation des singularités des modèles synthétiques exact et bruité du cycle 22 de **ssn**.

D'après le tableau ci-dessus nous notons, un décalage temporel des crêtes 1 et 2 du modèle exact. Ce décalage peut atteindre une durée d'un mois, voire plus. Quant aux valeurs des régularités, nous marquons une légère variation dans celle de la crête 2 alors qu'elle est importante dans le cas de la crête 4 du modèle exact. Le bruit peut donc jouer sur la localisation des singularités ainsi que sur leur régularité.

III.2.3. Classement des crêtes d'ondelettes

Les crêtes d'ondelettes (Fig. 64) sont décrites par la variation de $|Wf(t,a)|$ en fonction de la dilatation a le d'une ligne de maxima. Elles nous permettent de déterminer les valeurs des régularités α des singularités contenues dans le signal étudié, à noter, le modèle synthétique bruité du cycle 22 de **ssn**.

Rappelons que nous adoptons le même classement des crêtes d'ondelettes que celui établi dans le chapitre IV, dans l'étude du modèle synthétique décrivant les variations temporelles du champ magnétique terrestre.

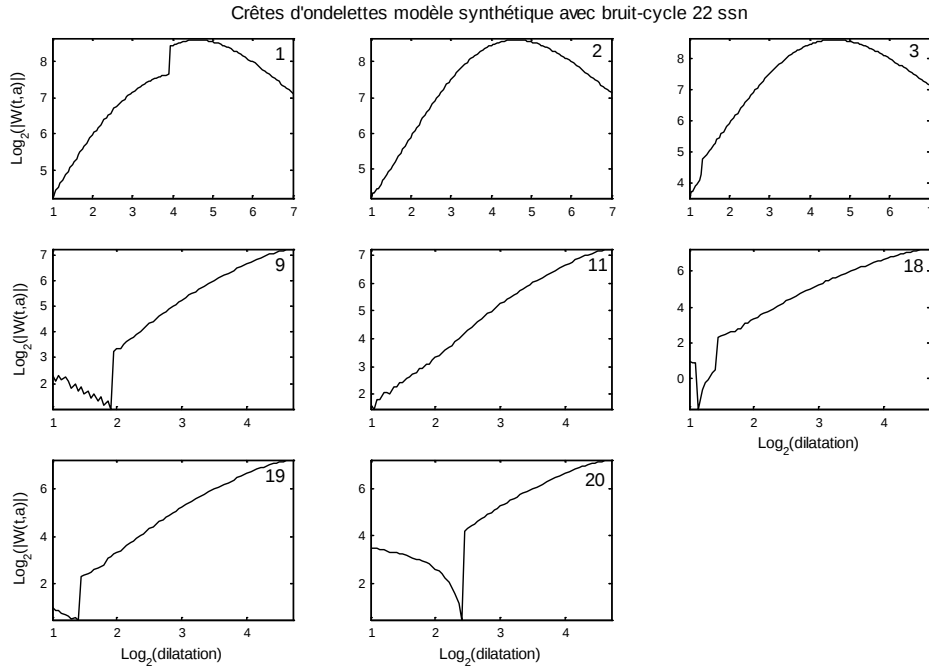


Fig. 64: Crêtes d'ondelettes du modèle synthétique bruité du cycle 22 de **ssn**.

Type 1: cas des crêtes à tendance linéaire positive ($\alpha > 0$). Elles peuvent être influencées, tantôt par les composantes harmoniques (cas de la crête 19; Fig. 64), elle prend une tendance linéaire à partir de $a=2^{1.09}$. Tantôt par le bruit (cas 9 et 11; Fig. 64). Celles-ci sont parfois caractérisées par une partie déformée située au début de la crête (cas 9) pour devenir quasi-linéaire à partir de $a=2^{1.89}$. Les crêtes d'ondelettes sont aussi influencées par la combinaison des deux contributions comme dans le cas de la crête 18 (Fig. 64) où on observe une tendance linéaire à partir de $a=2^{1.09}$.

Type3: on retrouve les crêtes relatives aux contributions harmoniques influencées par les singularités voisines telles que les crêtes 2 et 3 (Fig. 64). Elles deviennent décroissantes à partir de $a=2^{4.6}$.

On obtient donc des singularités avec des régularités positives non entières. Nous les représentons en fonction de la localisation des lignes de maxima dans la figure 65. Nous donnons également la distribution des régularités du modèle exact sur la même figure. Cette représentation permet d'examiner la variation des valeurs de α ainsi que l'influence du bruit sur ces dernières. On remarque que α varie de manière aléatoire. Elle marque des paliers de stabilité dans les intervalles de temps [1988 1992] et [1992

1994] dans le cas du modèle bruité. L'amplitude des régularités est comprise entre 1.4 et 1.7 pour le modèle bruité et -0.8 et 1.7 dans le cas du modèle exact.

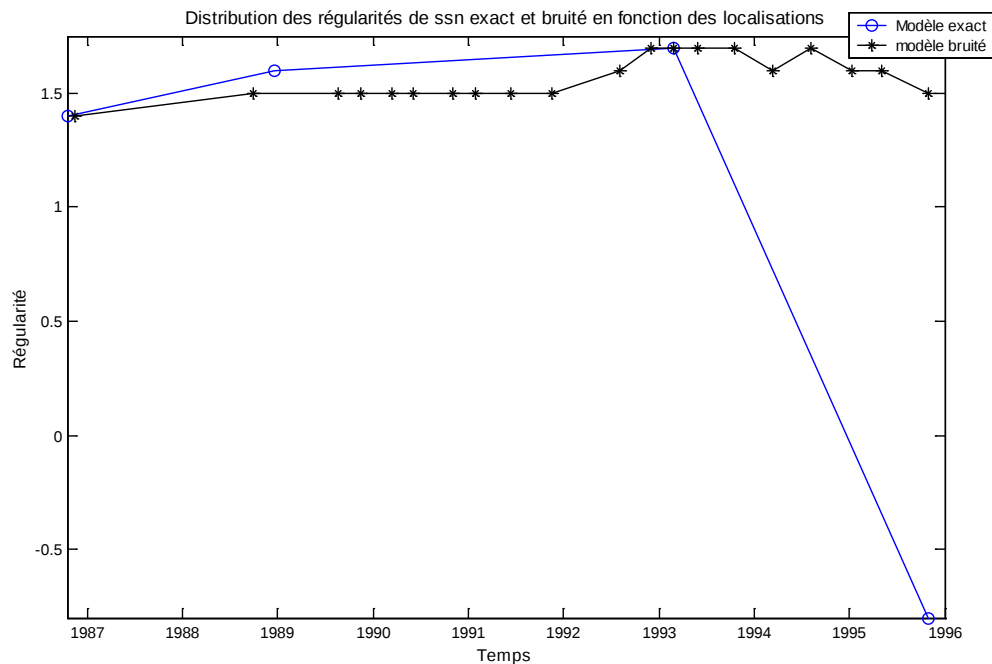


Fig. 65 : Distribution des régularités en fonction des localisation des singularités contenues dans les modèles exact et bruité du cycle 22 de **ssn**.

Après avoir établi la manière dont influence le bruit le modèle synthétique des cycles de taches solaires, nous entamons notre étude sur les données réelles du cycle 22 de **ssn**.

IV. Analyse en ondelettes continues du cycle réel N°22

IV.1. Analyse en ondelettes continues du cycle 22

En appliquant la même ondelette dans la détection et l'étude des singularités du cycle réel N° 22 de **ssn** (Fig. 66a), nous allons essayer d'étudier et de caractériser les singularités contenues dans ce signal.

L'analyse en ondelettes révèle des lignes de maxima plus dominantes que d'autres (Fig. 66b). En comparant le cycle de taches solaires (Fig. 66a) avec la

distribution des lignes de maxima sur l'axe des temps on trouve que celles-ci sont plus concentrées dans l'intervalle de temps compris entre 1988 et 1994.

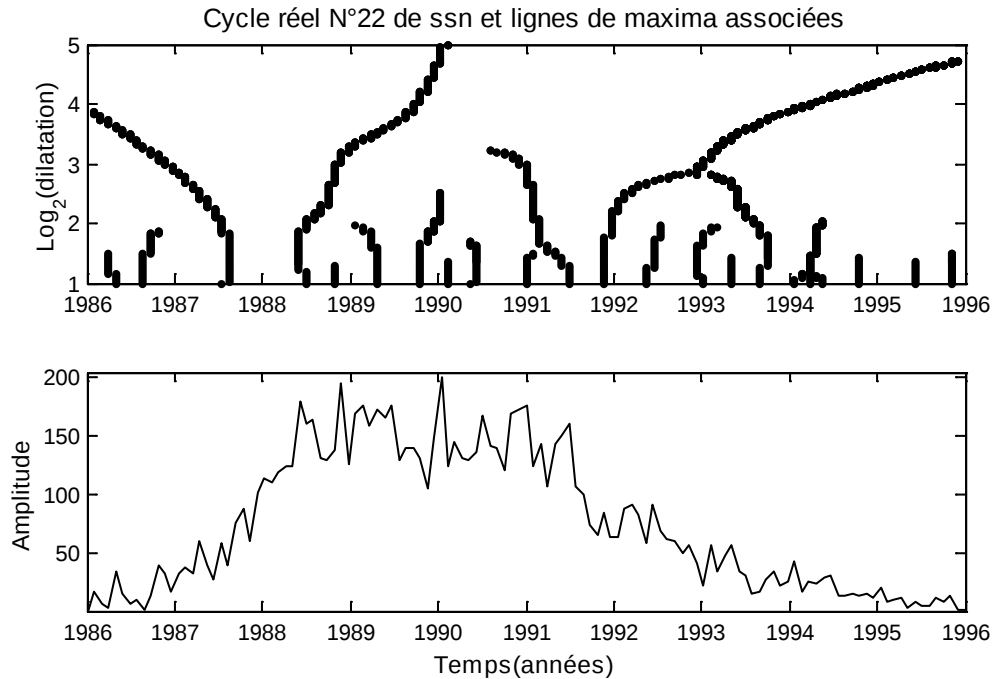


Fig. 66: (a) Cycle réel 22 de **ssn** et (b) lignes de maxima associées.

IV.1.1. Description des crêtes d'ondelettes du cycle réel N°22 de ssn

Les crêtes d'ondelettes (Fig. 67) du cycle réel N°22 du nombre de taches solaires peuvent être classées en 3 types :

Type 1: Crêtes d'ondelettes à tendance linéaire positive ($\alpha > 0$); cas de la crête 2. Cette tendance peut être influencée par une contribution harmonique, observée dans la partie courbée au début des crêtes, cas 14. Comme elle peut l'être par le bruit (cas des crêtes 3 et 4), ou bien par la combinaison des deux comme dans le cas de la crête 6 (Fig. 67).

Type 2: Crêtes d'ondelettes présentant une forme ondulée principalement dues aux composantes harmoniques (cas 11 (Fig. 67)).

Type 3: Crêtes d'ondelettes ayant une tendance linéaire négative ($\alpha < 0$) cas de la crête 7 (Fig. 67). Ce type de crêtes n'est attribué ni aux singularités bruitées ni au bruit lui même (Alexandrescu et al., 1995).

Rappelons, au passage, que nous nous intéressons qu'aux crêtes de régularité positive ($\alpha > 0$).

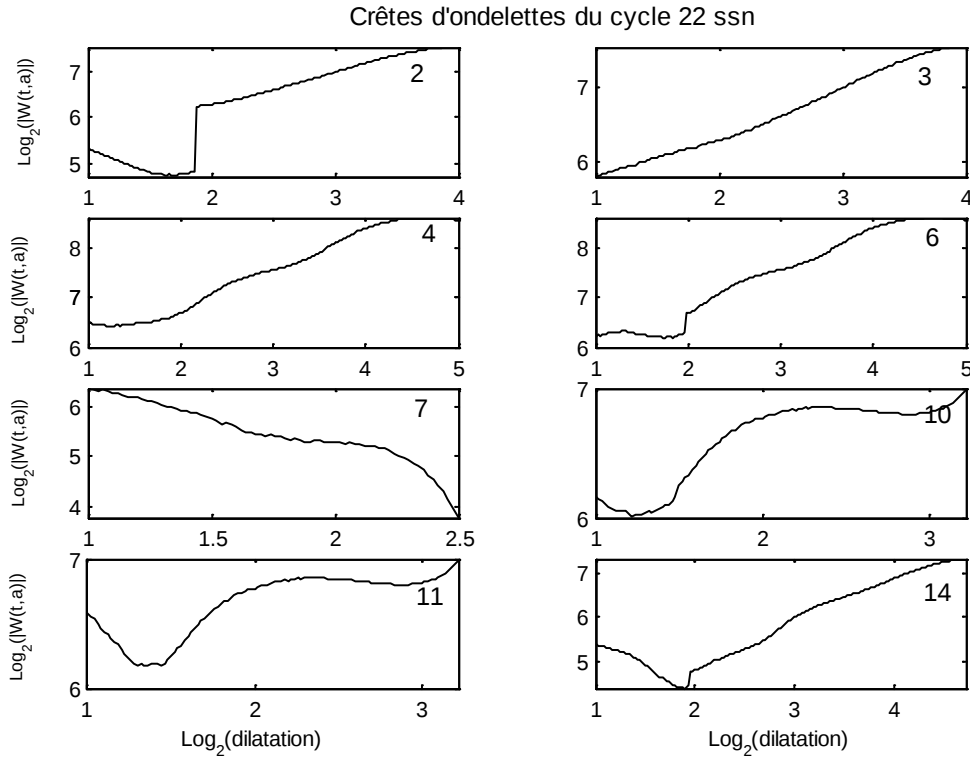


Fig. 67: Crêtes d'ondelettes du cycle 22 de **ssn**.

En observant le cycle de taches solaires (Fig. 66a), nous remarquons qu'il est caractérisé par des variations irrégulières et très rapides tout en sachant qu'il comporte du bruit ainsi que des composantes périodiques, comme nous l'avons montré par l'analyse spectrale du cycle 22 de **ssn**. Une meilleure étude des singularités du cycle 22 de **ssn** nécessiterait donc un filtrage du signal afin d'éliminer les composantes périodiques et d'affiner le bruit. Pour cela, nous avons calculé la dérivée absolue moyenne du nombre de taches solaires sur une période T .

IV.2. Méthode de la dérivée absolue moyenne

Sachant que la dérivée absolue permet de mesurer les variations irrégulières, alors que la moyenne mobile lisse le signal et élimine les composantes périodiques (Blanter et al., 2001). Cette méthode a été appliquée dans le calcul de la dérivée

· Rappelons que le formalisme mathématique de cette méthode a été décrit dans le chapitre IV.

absolue moyenne du cycle 22 du nombre de taches solaires pour deux périodes différentes, appelées aussi fenêtres de filtrage. Soient $T=3\text{mois}$ et 6mois , avec un pas d'échantillonnage τ de l'ordre du mois. La superposition du modèle réel du cycle 22 de taches solaires ainsi que des dérivées absolues moyennes du même cycle est décrite par la figure 68. En comparant donc les signaux filtrés et le cycle 22, on remarque que plus la période T augmente plus le signal est affiné ; les variations rapides qui caractérisent le cycle de **ssn** non filtré sont considérablement atténuées. On remarque également que l'amplitude des dérivées absolues moyennes de ssn baisse de manière spectaculaire quand T augmente. Notamment, une nette diminution en amplitude des deux pics qui marquent la dérivée absolue moyenne calculée pour $T=3\text{mois}$ et $T=6\text{mois}$, localisés en $t_1=18/03/1989$ et $t_2=24/04/1990$. Notons que la $|d(\text{ssn})/dt|$ calculée pour $T=6\text{mois}$ marque des variations cycliques de l'ordre d'un an, ce qui n'est pas le cas des deux autres signaux. Le calcul de la dérivée absolue moyenne des signaux peut suggérer que les variations de périodes inférieures ou égales à T sont éliminées.

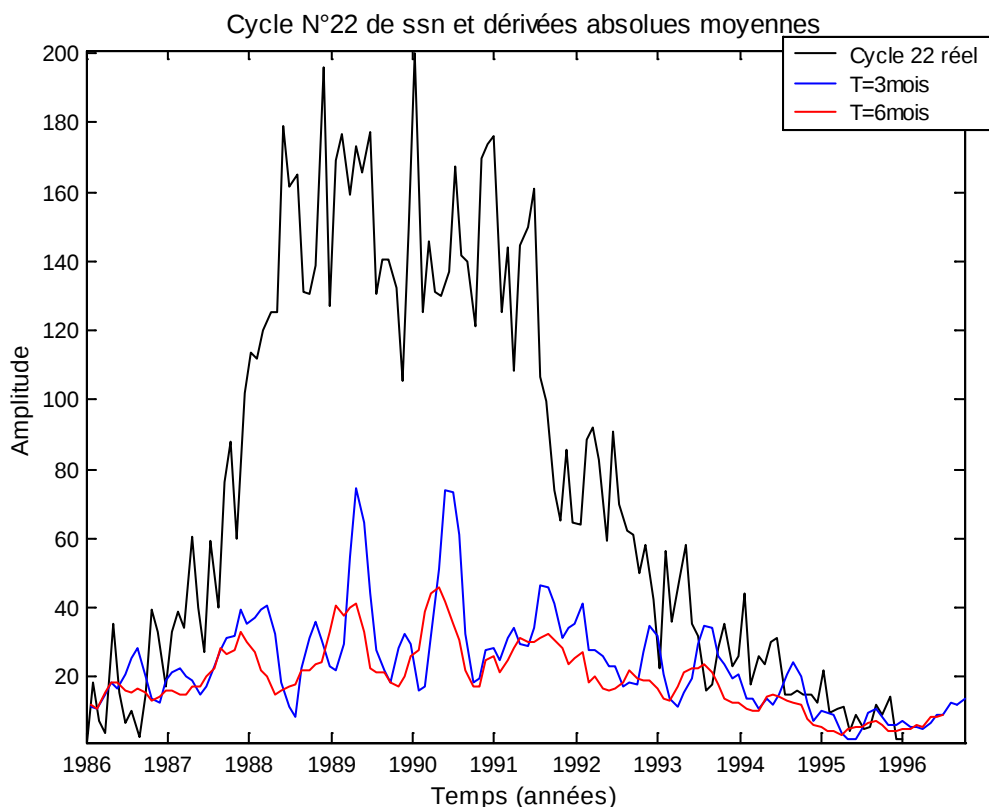


Fig. 68: Superposition du cycle 22 de **ssn** et de ses dérivées absolues moyennes calculées pour $T=3\text{mois}$ et $T=6\text{mois}$.

IV.2.1. L'analyse en ondelettes des dérivées absolues moyennes du cycle réel N°22 de *ssn*

Les lignes de maxima des dérivées absolues moyennes du cycle 22 de *ssn*, calculées pour les périodes $T=\{3, 6\}$ mois avec un pas d'échantillonnage $\tau=1$ mois, sont données, respectivement, dans les figures 69b et 70b. En les comparant, en premier, avec les lignes de maxima du cycle réel N°22 de *ssn* (Fig. 63b), des différences apparaissent par rapport au nombre de lignes qui diminue, leur forme et amplitudes.

En effet, les lignes de maxima relatives au cycle réel N°22 de *ssn* (Fig. 66b) sont plus nombreuses, on trouve aussi plus de lignes dominantes en amplitudes par rapport aux lignes de maxima associées aux dérivées absolues moyennes du même cycle (Fig. 69b) et (Fig. 70b).

En comparant les lignes de maxima générées par les singularités de $|d(ssn)/dt|$ du cycle 22 de *ssn*, calculées pour $T=\{3, 6\}$ mois. Nous remarquons qu'elles sont caractérisées par une même ligne de maxima dominante, localisée en $t_1=13/06/1990$ pour $T=3$ mois et $t_2=24/04/1990$ pour $T=6$ mois. Par contre il n'existe pas, *a priori*, une grande différence entre les lignes de maxima des modèles filtrés quant à leur nombre et amplitude, ce qui n'est pas le cas des localisations. Effectivement, nous notons un décalage de la date d'occurrence de la ligne de maxima dominante. Ceci suggère la possibilité de détecter les mêmes singularités qui sont probablement dues aux variations rapides qui caractérisent le cycle. Comme on peut supposer l'apparition d'autres singularités non détectées auparavant. Une meilleure comparaison de l'analyse en ondelettes de ces deux signaux sera donnée en étudiant les régularités des différentes singularités.

Afin d'établir une éventuelle influence du filtre sur les résultats obtenus à partir de l'application de la TOC au cycle 22 de *ssn*, nous rapportons sur la figure 71 les dates d'apparition des singularités contenues dans les signaux étudiés. En effet, nous remarquons qu'en général les singularités ne sont pas synchrones. Elles montrent des décalages temporels de quelques jours, comme pour celles contenues dans les $|d(ssn)/dt|$ calculé pour $T=3$ mois et $T=6$ mois et apparaissent, respectivement, le 13 et 23 septembre 1986. Ou bien celles contenues dans le cycle réel de *ssn* et les $|d(ssn)/dt|$ qu'on retrouve, respectivement, le 17 ; 22 et 27 juin 1993. Nous avons également noté des singularités qui apparaissent à la même date ; telle que celle associée au cycle réel N°22 et la $|d(ssn)/dt|$ calculée pour $T=3$ mois qui apparaît le 23 octobre 1993. Or la localisation temporelle n'est pas une condition suffisante pour déterminer si les singularités détectées à la même date ou avec un décalage sont

générées par un même phénomène physique. Pour cela nous allons calculer les régularités α qui sont caractéristiques de chaque singularité.

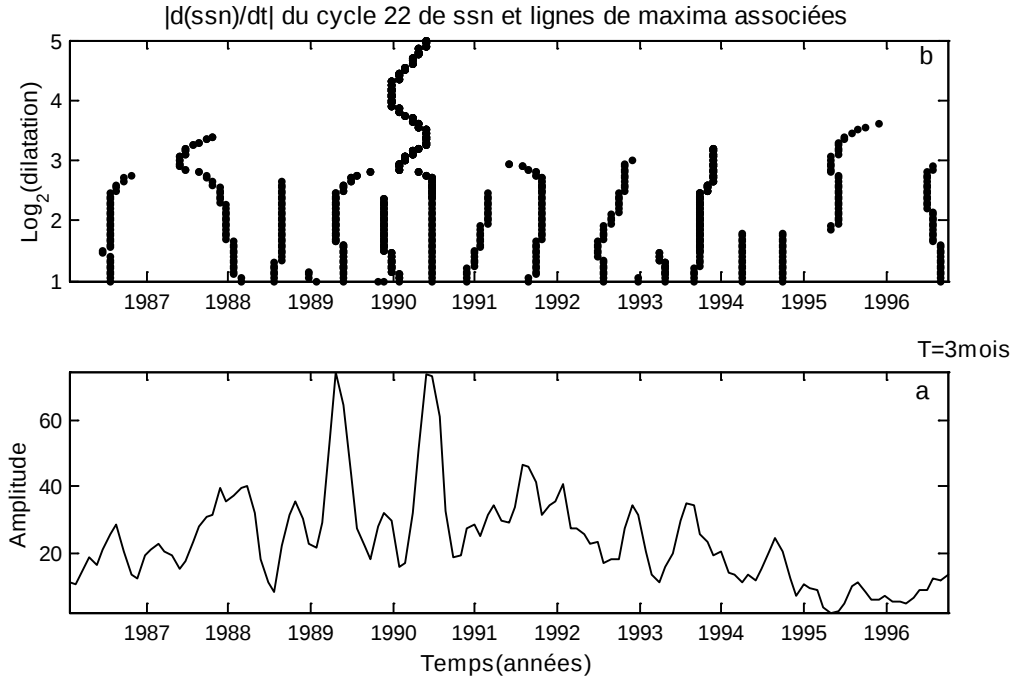


Fig. 69: (a) Dérivée absolue moyenne du cycle 22 de **ssn** (T=3mois). (b) Lignes de maxima associées.

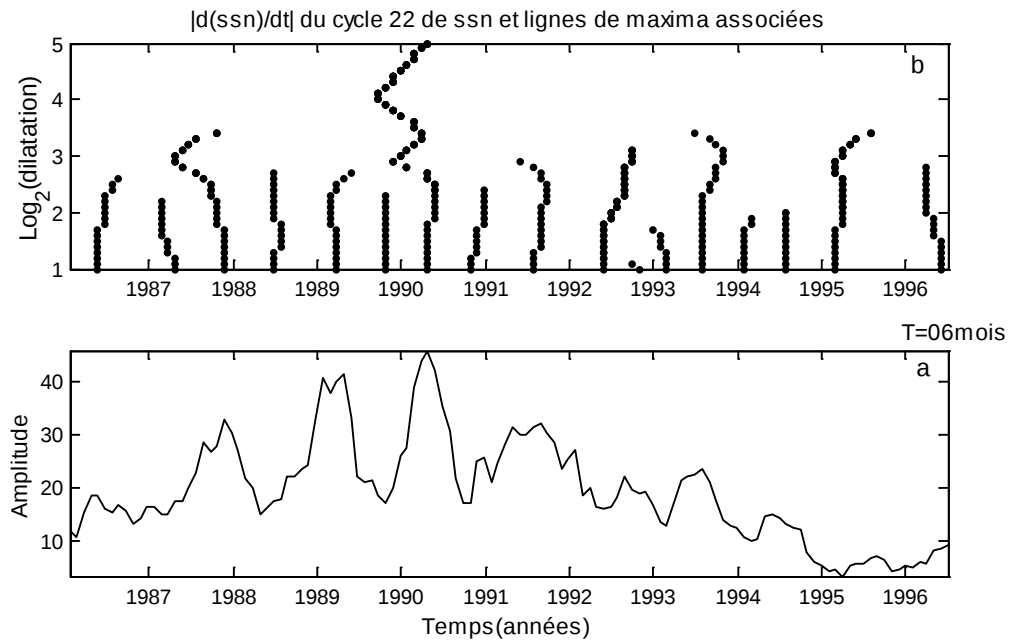


Fig. 70: (a) Dérivée absolue moyenne du cycle 22 de **ssn** (T=6mois). (b) Lignes de maxima associées.

Type 1 : crêtes à tendance linéaire positive ($\alpha > 0$) cas 4 et 10 (Fig. 73) avec influence des contributions harmoniques et/ou du bruit (cas 5 et 6 (Fig. 72) ; 5 et 6 (Fig. 73)).

Type 2 : crêtes dues aux contributions harmoniques influencées par les singularités voisines (cas 2 et 11 (Fig. 72) ; 3 et 9 (Fig. 73)).

Type 3 : Crêtes à tendance linéaires négatives ($\alpha < 0$) cas 12 et 15 (Fig. 72) et 13 (Fig. 73).

Afin de déterminer une éventuelle influence de la méthode de la dérivée absolue moyenne sur nos résultats, notamment les valeurs des régularités des singularités contenues dans les signaux filtrés, nous allons représenter sur la figure 74 leur distribution en fonction des dates d'apparition des singularités qui leur sont associées. Nous pouvons également lire sur la même figure la distribution des régularités des singularités contenues dans le cycle réel 22 de *ssn*.

D'après la figure 74 la variation des régularités des singularités contenues dans les différents signaux analysés est aléatoire. Nous remarquons, cependant une même localisation pour des valeurs de régularités différentes. Ce comportement nous amène à faire deux suppositions : soit elle met en évidence d'autres singularités en augmentant la valeur de la fenêtre de filtrage. Soit elle influe sur la nature des singularités en les lissant. Les intervalles de variation des régularités sont donnés dans la table 7.

Valeurs des régularités	Cycle réel N°22 <i>ssn</i>	Dérivée absolue moyenne du cycle 22 de <i>ssn</i>	
		T=3mois	T=6mois
$\alpha_{\min}$	-0.24	-0.72	-0.65
$\alpha_{\max}$	1.23	1.42	1.48

Table 7 : Gammes de variation des régularités des singularités contenues dans les signaux analysés.

Nous tenterons enfin de montrer si les dates d'apparition des singularités contenues dans les trois signaux correspondent à une activité géomagnétique ou solaire quelconque (Fig. 75). Compte tenu des archives, décrivant l'activité solaire et géomagnétique, disponibles nous ne reportons dans cette figure que les singularités apparues en 1996. On trouve, cependant que la singularité contenue dans la

$|d(ssn)/dt|$ calculée pour $T=6$ mois correspond à la manifestation d'un champ magnétique terrestre calme à actif.

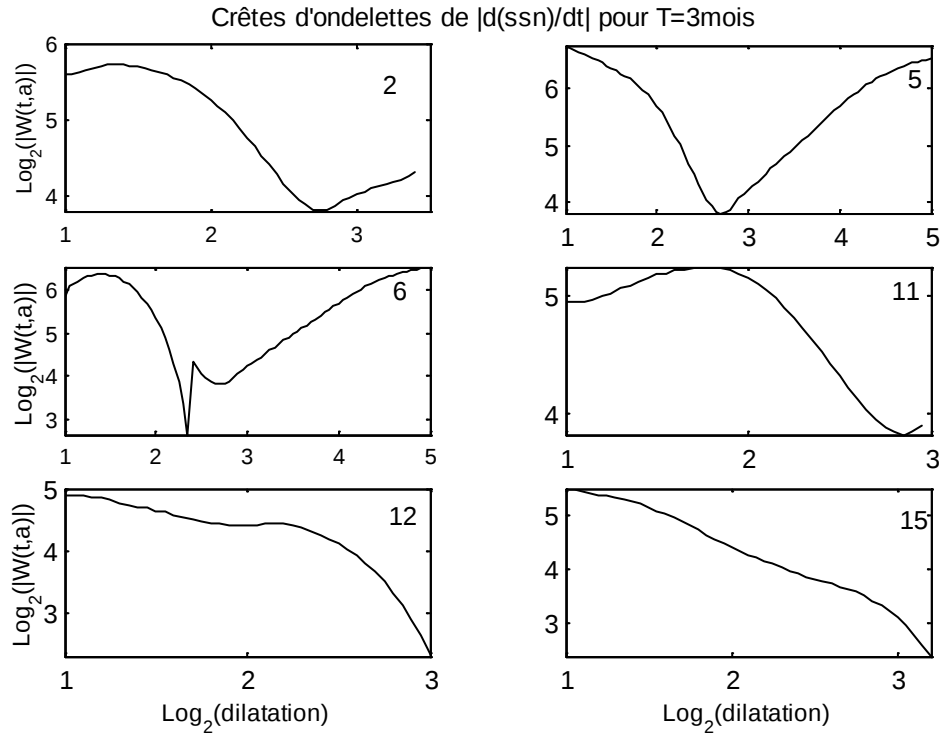


Fig. 72: Crêtes d'ondelettes de la moyenne mobile de la dérivée absolue du cycle 22 ssn avec $T=3$ mois

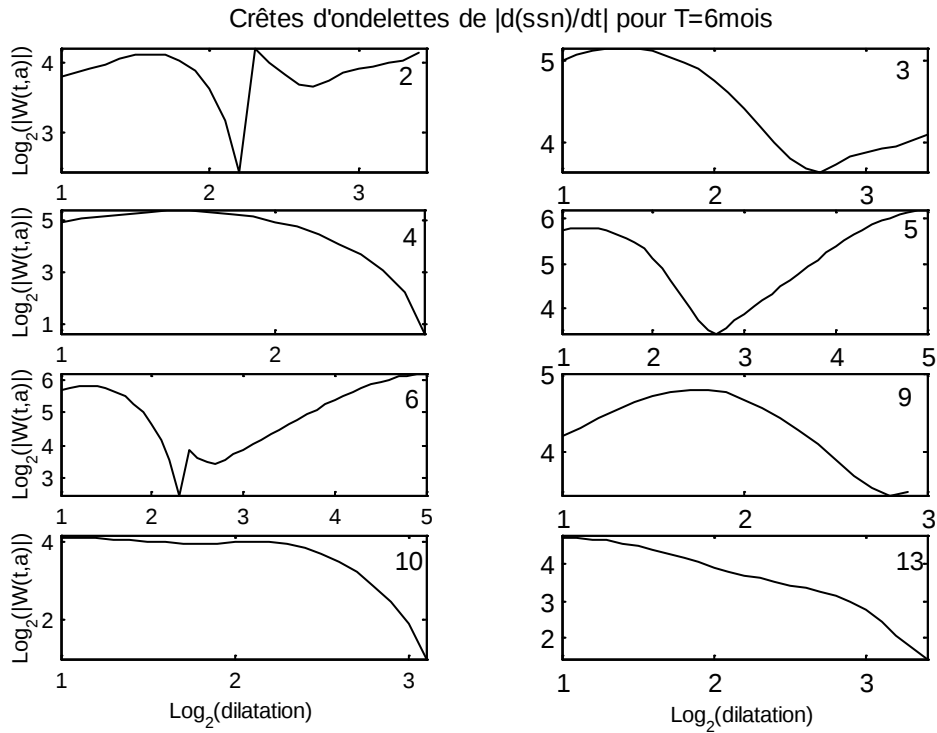


Fig. 73: Crêtes d'ondelettes de la moyenne mobile de la dérivée absolue du cycle 22 ssn avec $T=6$ mois.

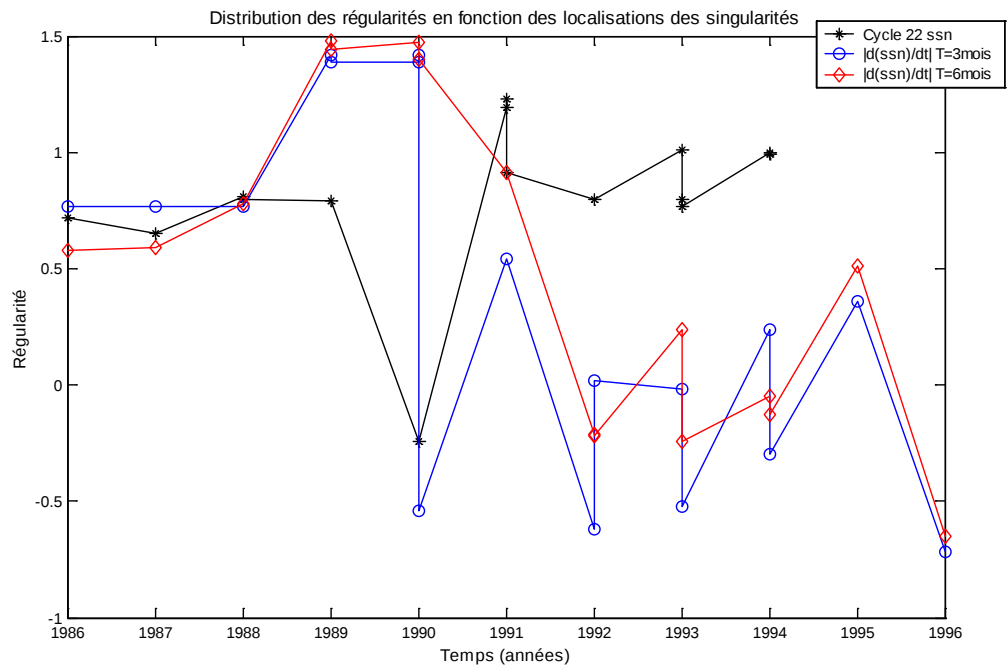


Fig. 74 : Distribution des régularités en fonction des singularités contenues dans le cycle réel N°22 de **ssn** et ses dérivées absolues moyennes calculées pour $T=\{3, 6\}$ mois.

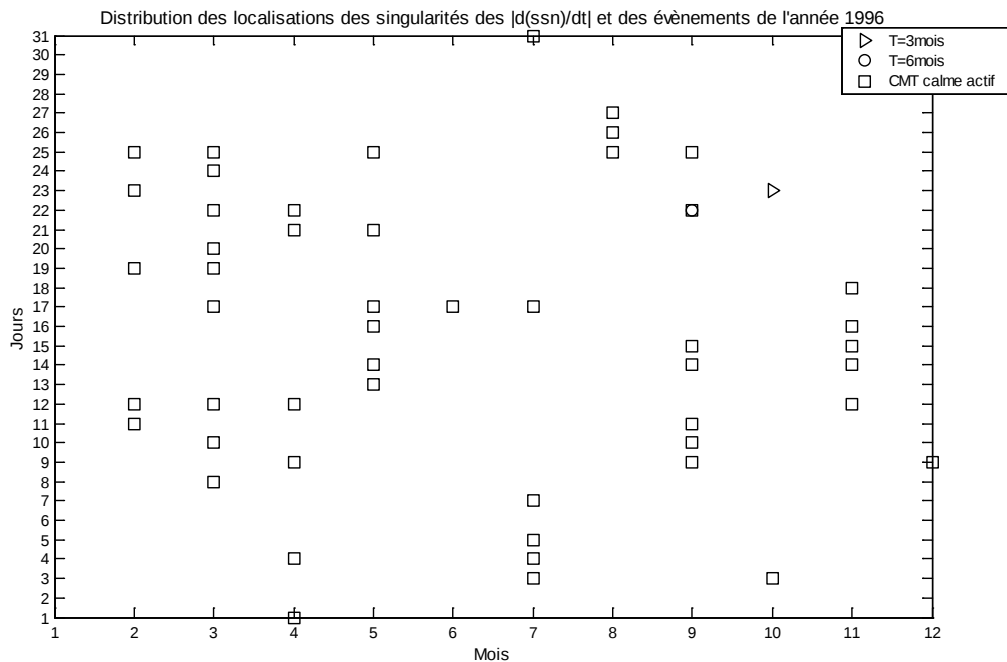


Fig. 75 : Distribution des localisations des singularités des dérivées absolues moyennes du cycle 22 de **ssn** et des événements de l'activité solaire et géomagnétique.

V. Analyse spectrale des indices aa

De la même façon que pour les données de taches solaires, nous étudions également les données de l'activité géomagnétique en analysant les cycles décrits par les moyennes mensuelles des indices **aa** pour la période 1868-1998. La TF révélera les différentes contributions harmoniques du signal.

V.1. Analyse spectrale de l'activité géomagnétique

V.1.1. Analyse spectrale des indices aa sur la période 1868-1998

La TF des indices **aa** pour la période 1868-1998 met en évidence les périodes suivantes (Fig. 76): 130 ans; 10ans; 2ans qui est l'harmonique de la périodicité d'un an ainsi que la périodicité de six mois. La variation annuelle de l'activité géomagnétique résulte du passage annuel de la Terre à travers la répartition asymétrique de la vitesse du vent solaire (Mursula et al., 2000).

Cette asymétrie est en liaison avec la champ magnétique solaire et est à l'origine de la variation annuelle de l'activité géomagnétique ainsi que celle de la vitesse du vent solaire. Actuellement la répartition du vent solaire est dans l'hémisphère magnétique nord alors qu'au milieu du 19^e siècle elle était dans l'hémisphère magnétique sud. L'inversion de l'asymétrie observée dans cette période suggère une nouvelle forme d'oscillation à l'échelle séculaire dans l'asymétrie nord-sud de l'activité magnétique solaire (Mursula et al., 2000). Nous supposons que le battement de 130ans, correspond, justement à cette asymétrie.

Quant aux variations de 10 ans et 6mois, elles sont caractéristiques :pour la 1^{ière} du cycle undecennal. Alors que la seconde correspond aux mois d'équinoxe (mars et septembre) et de solstice (juin et décembre) de l'activité géomagnétique (Nevanlinna et al., 1993b).

V.1.2. Analyse spectrale du cycle 22 de l'activité géomagnétique

De même l'étude de l'analyse spectrale du cycle 22 de l'activité géomagnétique révèle les mêmes périodicités (Fig. 77), à l'exception de celle de 130ans, ce qui est tout à fait normal compte tenu de la durée d'un cycle qui est de l'ordre de 11ans. Nous observons donc des pics d'énergie à 11ans, 2ans, 1an et 6mois. Le pic peu différent de ~ 1.3 ans (1.25ans) correspond à la variation de l'activité des trous coronaux. Quant aux périodes de 11ans, 2ans, 1année et 6mois, elles décrivent les mêmes phénomènes périodiques cités ci-dessus.

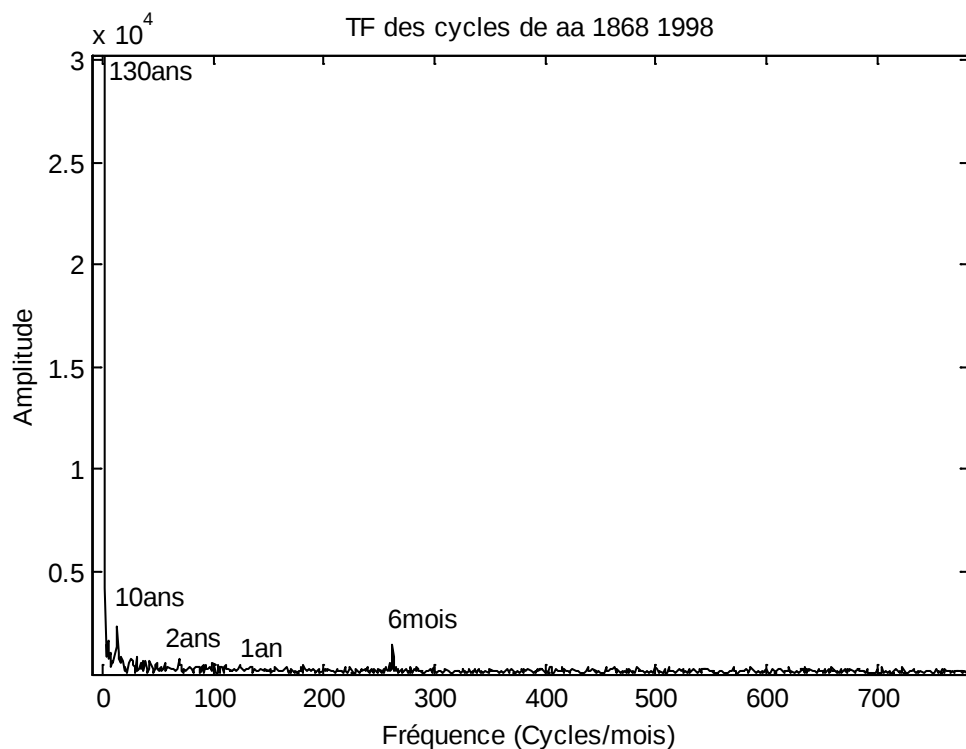


Fig. 76: Analyse spectrale des valeurs mensuelles des cycles de l'activité géomagnétique sur la période 1868-1997.

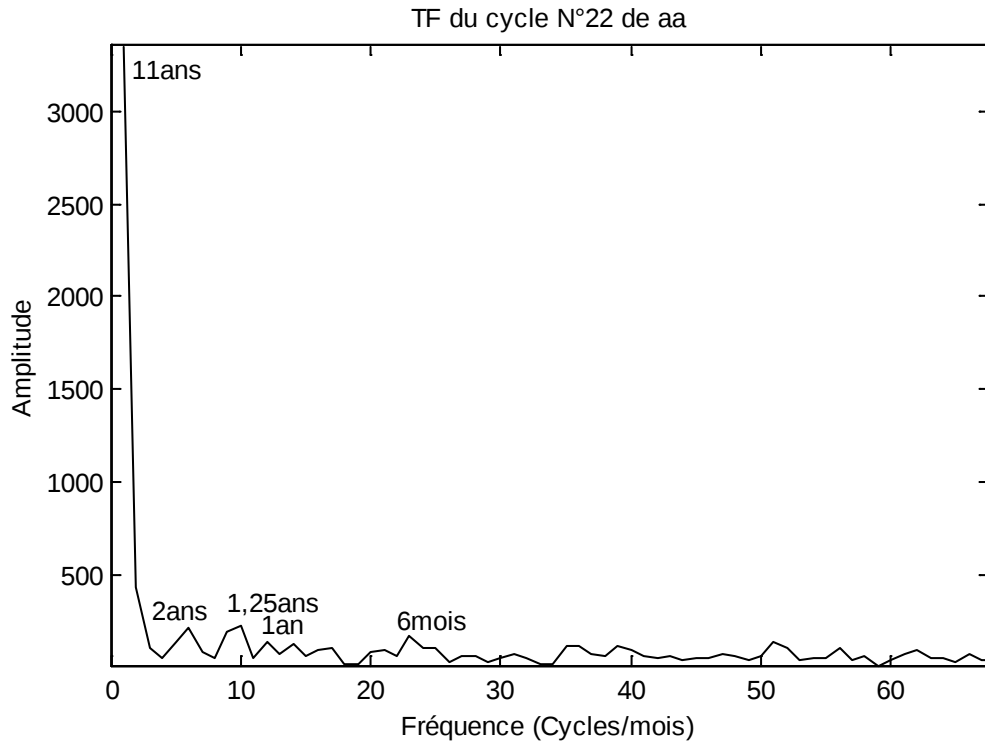


Fig. 77 : Analyse spectrale du cycle 22 de l'activité géomagnétique.

V.2. Calcul du modèle de l'activité géomagnétique décrit par les indices *aa*

La méthode décrite précédemment, dans le calcul d'un modèle synthétique du cycle de taches solaires, est également utilisée pour calculer un modèle synthétique de l'activité géomagnétique à partir des moyennes mensuelles de l'indice *aa* sur la période (1868-1998).

Chacun des 12 cycles synthétiques de l'activité géomagnétique (Fig. 79a) est calculé individuellement, en appliquant le modèle décrit par $R(t) = a(t - t_0)^b e^{-c(t-t_0)}$, où *a*, *b*, *c*, et *t*₀ sont des paramètres qui caractérisent chaque cycle (Hathaway et al., 1999). Nous obtenons ainsi un ensemble de valeurs des paramètres *a*, *b* et *c*, dont la variation est représentée sur la figure 78. D'après cette figure nous remarquons qu'ils varient de manière aléatoire suivant une loi mathématique complexe.

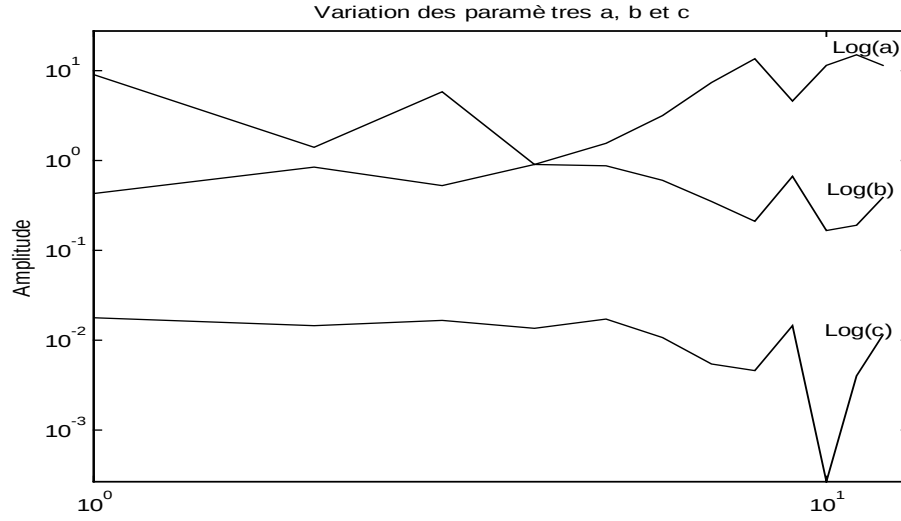


Fig. 78: Variation des paramètres **a**, **b** et **c**, respectivement. Indices **aa**.

Les différents modèles des cycles de l'activité géomagnétique calculés sont juxtaposés (Fig. 79a). Nous obtenons ainsi la distribution temporelle des indices calculés pour la période allant de 1868 à 1998.

Pour cela nous procédons comme suit:

Soient $R_1(t'_1)$ et $R_2(t'_2)$ les modèles de deux cycles consécutifs, tels que:

$$R_1(t'_1) = a_1(t_1 - t_{01})^{b_1} e^{-c_1(t_1 - t_{01})} = a_1 t_1^{b_1} e^{-c_1 t_1}$$

$$R_2(t'_2) = a_2(t_2 - t_{02})^{b_2} e^{-c_2(t_2 - t_{02})} = a_2 t_2^{b_2} e^{-c_2 t_2} \quad \begin{cases} t'_2 = t_2 - t_1 = t_2 - t_{02} \\ t_1 = t'_1 + t_{01} \end{cases}$$

où t_{0i} est le temps de commencement du cycle N°i

La juxtaposition de tous les cycles (Fig. 79a) est donnée par $R_T(t)$ tel que:

$$R_T(t) = R_1(t'_1) + R_2(t'_2) + R_3(t'_3) + \dots + R_n(t'_n) \quad \text{avec } t'_n = t_n - t_{n-1}$$

où n est le numéro de chaque cycle; $n \in [1, N]$, et N; le nombre total des cycles.

Afin de détecter d'éventuelles singularités créées par ce modèle, nous passons à son analyse en ondelettes continues.

V.3. Analyse en ondelettes continues de l'activité géomagnétique

V.3.1. Analyse en ondelettes continues des cycles des indices aa pour la période 1869 1998

Les lignes de maxima associées au signal sont représentées sur la figure 79b. Nous remarquons qu'elles sont concentrées au niveau des minima des cycles. Résultat auquel nous nous attendions car les fins des cycles représentent par construction à eux seuls des singularités.

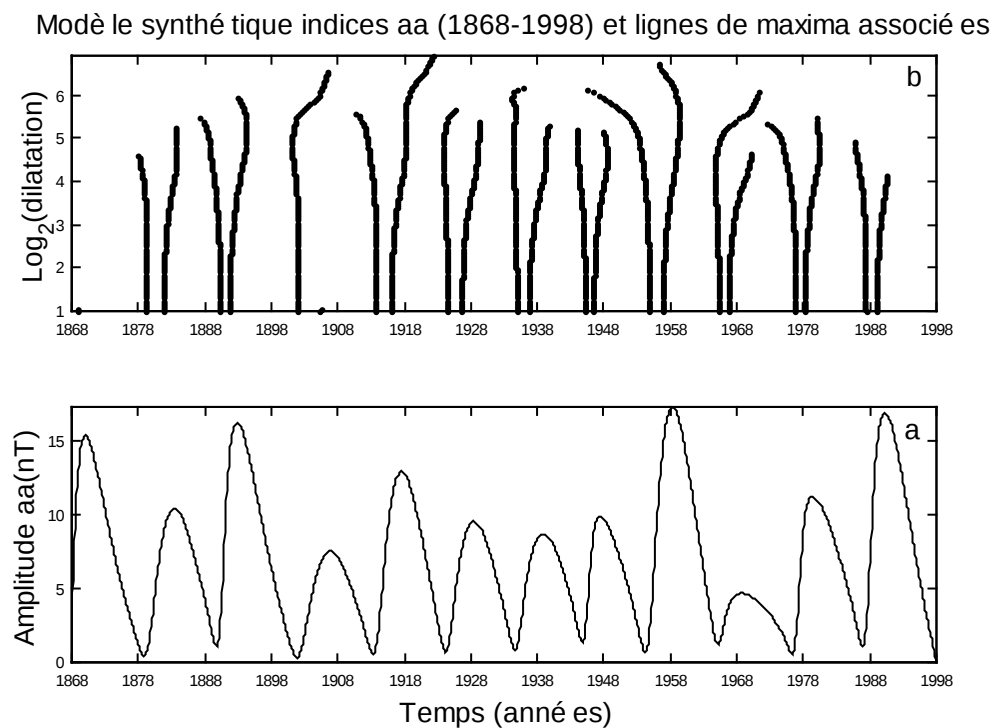


Fig. 79: (a) Modèle synthétique des cycles des indices aa sur la période 1868-1998. (b) Lignes de maxima associées au modèle synthétique de l'activité géomagnétique.

V.3.2. Analyse en ondelettes du cycle 22 de l'activité géomagnétique

Comme dans le cas de l'étude du modèle des taches solaires **ssn**, nous nous intéressons également à l'analyse du cycle 22 de l'activité géomagnétique décrite par les indices **aa**.

Un modèle synthétique du cycle 22 des indices **aa** a été créé (Fig. 80a) et analysé à partir de la TOC en utilisant l'ondelette « chapeau mexicain ». Un bruit sera ajouté, par la suite, au modèle déjà établi (Fig. 82a). De même la TOC avec la même ondelette analysante lui sera appliquée.

Ces deux étapes vont nous permettre d'observer l'influence du bruit sur le signal utile. Cette étude se basera, essentiellement, sur l'observation des lignes de maxima relatives à chacun des deux modèles, ainsi que sur l'étude des crêtes d'ondelettes associées aux singularités des deux signaux.

V.3.2.1. L'analyse en ondelettes du modèle synthétique du cycle 22 de aa

L'analyse en ondelettes continues du modèle synthétique du cycle 22 des indices **aa** de l'activité géomagnétiques révèle cinq lignes de maxima (Fig. 80b) dont l'une est plus dominante en amplitude que les autres. Elles sont localisées au début du modèle, dans la phase montante du cycle avant le maximum et à la fin du cycle. On distingue : la ligne 2 est localisée en $t_1=1987.6$ (07/07/1987), la ligne 3 en $t_2=1988.5$ (01/06/1988) et les deux dernières en $t_3=1996.7$ (13/08/1996) et $t_4=1997.2$ (13/02/1997), respectivement.

Les crêtes d'ondelettes, décrivant la variation du module de la TOC en fonction de la dilatation le long d'une ligne de maxima, sont représentées dans (Fig. 81). Elles nous renseignent sur la régularité des singularités contenues dans le signal. Notons que nous ne représentons que les crêtes de régularité positive ($\alpha > 0$), à savoir, celles qui correspondent aux lignes de maxima 2, 3 et 5.

En observant la figure 81, nous constatons que les crêtes d'ondelettes présentent toutes trois une tendance linéaire positive. La première ainsi que la dernière crête sont influencée par les contributions harmoniques du modèle. Cette influence nous la remarquons dans le changement de pente de l'une, à partir de $a \geq 2^{1.2}$, et dans la forme

quasi ondulée de l'autre. Les régularités calculées pour les trois crêtes sont, respectivement, de l'ordre $\alpha_2=1.22$; $\alpha_3=1.33$ et $\alpha_5=2.94$.

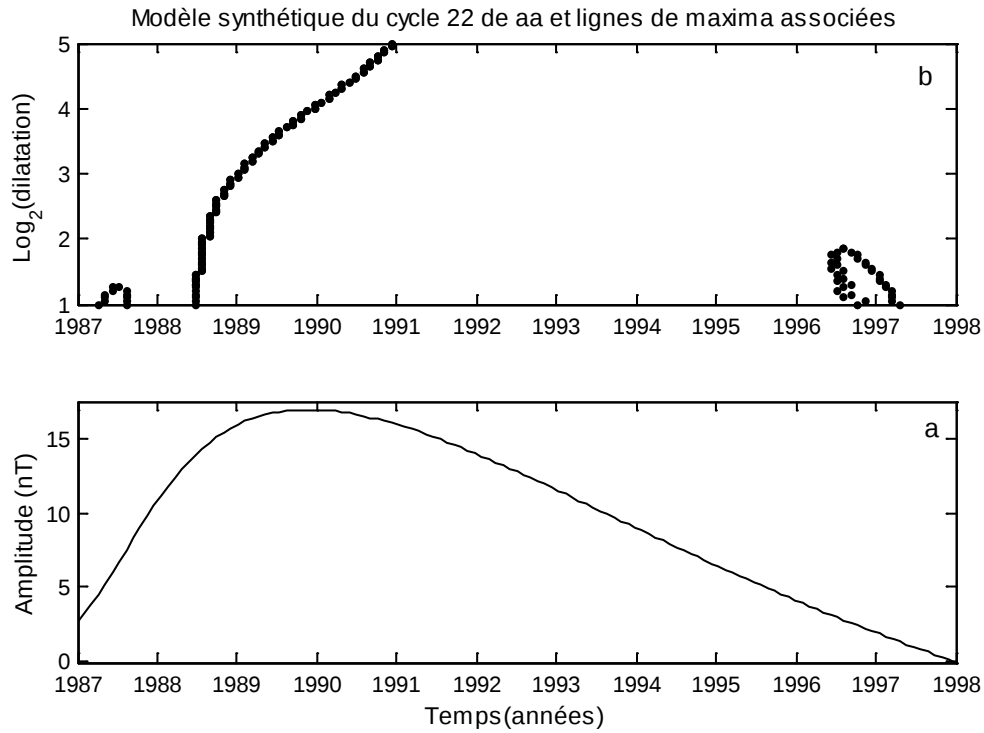


Fig. 80: (a) Modèle synthétique du cycle 22 de l'activité géomagnétique. (b) Lignes de maxima associées.

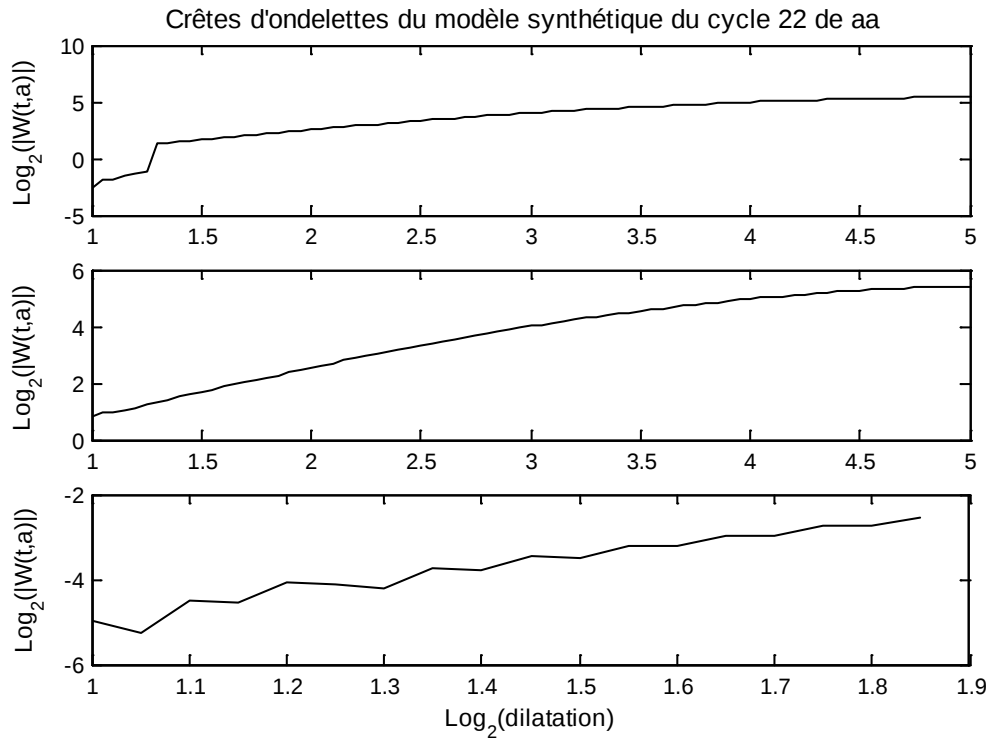


Fig. 81: Crêtes d'ondelettes du modèle synthétique du cycle 22 de l'activité géomagnétique.

Or un signal physique réel est toujours accompagné de bruit. Afin de cerner l'influence de cette contribution, nous avons ajouté aux données du modèle décrit ci-dessus un bruit blanc. Le bruit ajouté est de moyenne nulle, de variance égale à l'unité et d'amplitude de l'ordre de 1.5% de celle du modèle exact. Le signal obtenu est illustré dans la figure 82a.

V.3.2.2. Analyse en ondelettes du modèle synthétique du cycle 22 avec bruit

En observant les lignes de maxima du modèle synthétique du cycle 22 de **aa** bruité, nous remarquons, par rapport au modèle exact, que le bruit a généré de nouvelles lignes de maxima. On voit aisément qu'elles sont concentrées autour du maximum d'activité dans l'intervalle de temps compris entre 1988 et 1994, caractérisé par un maximum de la TOC (Fig. 82b). Afin d'établir une éventuelle influence du bruit sur les dates d'apparition des singularités contenues dans le signal, nous représentons sur la figure 80 la distribution des localisations des lignes de maxima de chacun des deux modèles synthétiques.

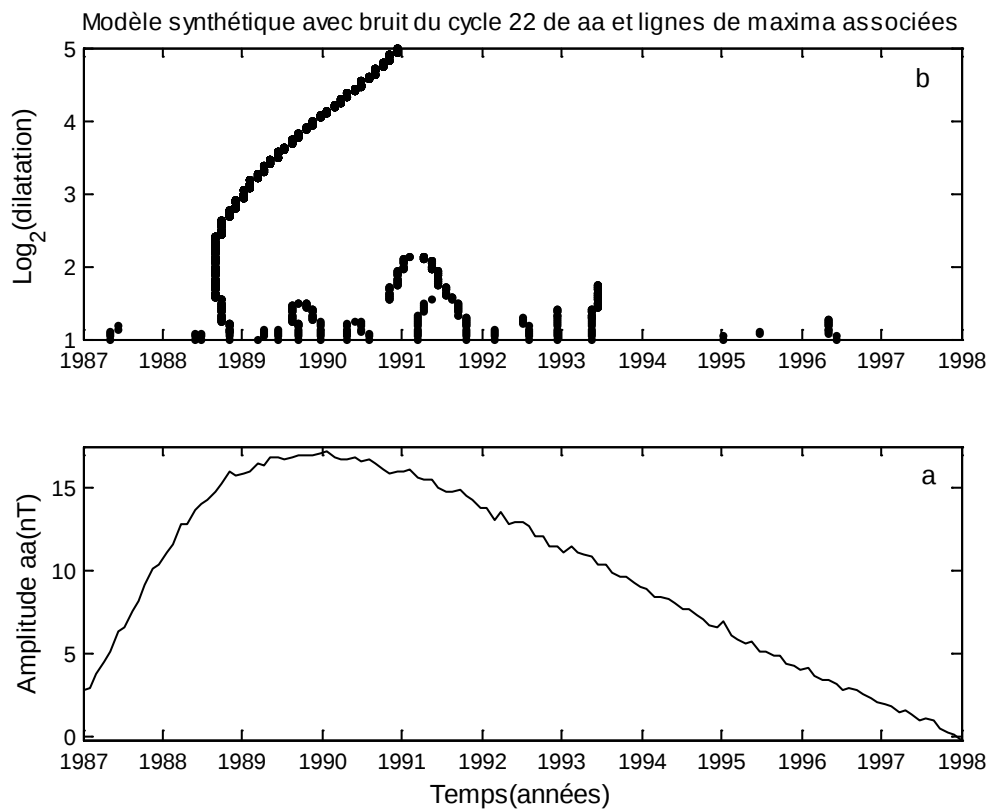


Fig. 82 : (a) Modèle synthétique avec bruit du cycle 22 de **aa**. (b) Lignes de maxima associées.

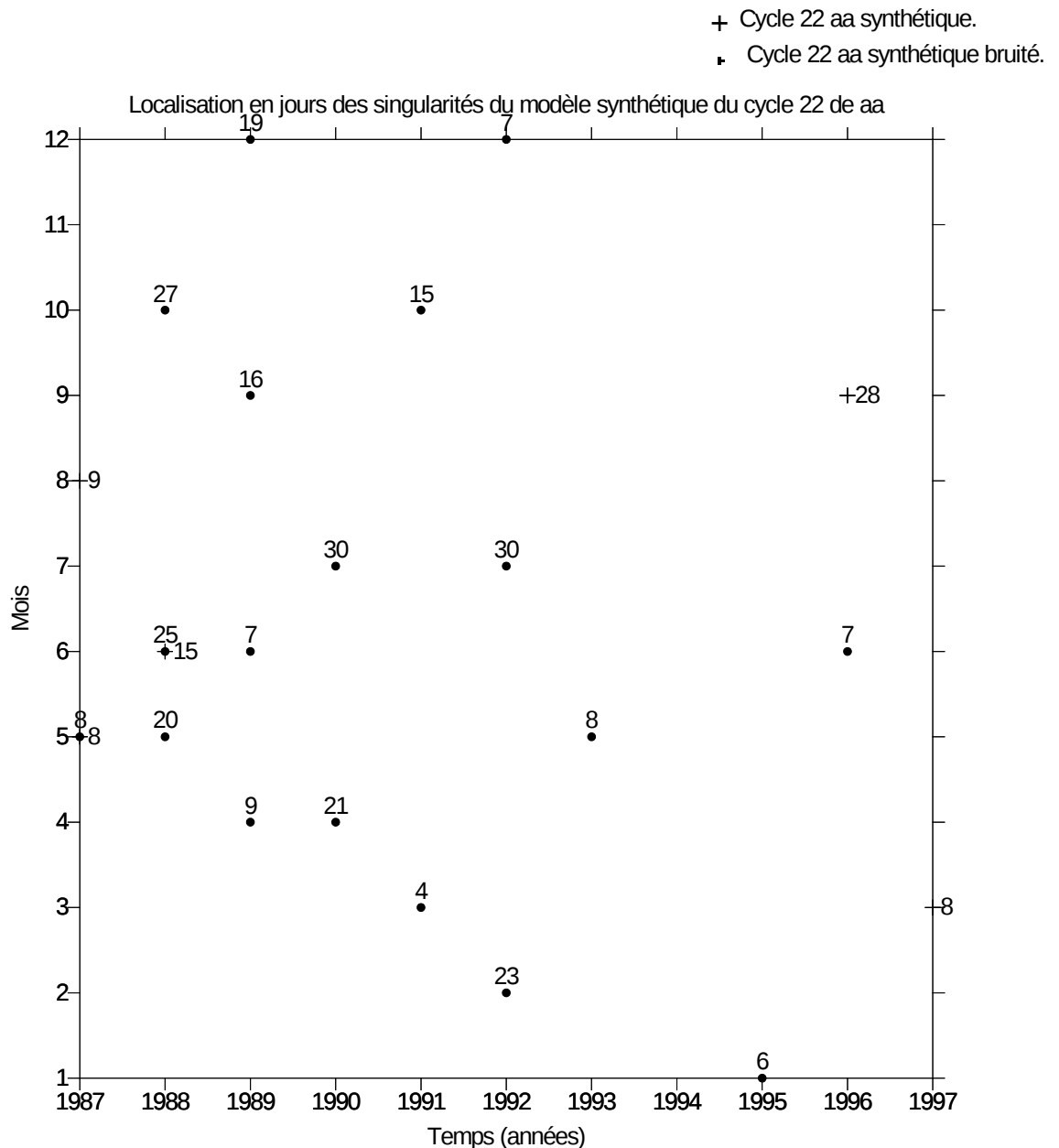


Fig. 83 : Distribution des dates d'occurrence des singularités contenues dans les modèles synthétiques exact et bruité du cycle 22 de aa.

D'après la figure 83 ; on constate que, contrairement aux singularités localisées le 06/05/1987 et le 15/06/1988 dans les deux modèles synthétiques, celle localisée dans le modèle exact le 28/09/1996 n'apparaît pas dans le modèle bruité. Ceci signifie que comme le bruit génère des singularités, il peut également en éliminer d'autres déjà présentes dans le modèle exact. Sachant que la comparaison des localisations n'est pas une condition suffisante dans la détection de l'influence du bruit sur les singularités

contenues dans le signal. Pour cela nous allons comparer, par la suite, les crêtes d'ondelettes et les régularités des deux modèles.

V.3.3. Classement des crêtes d'ondelettes du modèle synthétique du cycle 22 de aa avec bruit

Les crêtes d'ondelettes qui caractérisent le modèle synthétique bruité du cycle 22 de aa sont toutes à tendance linéaire positive (Fig. 84) telle que la crête 4. Elles sont parfois influencées par les contributions harmoniques comme on peut l'observer sur la crête 2 qui décrit une variation quasi linéaire à partir de $a \geq 2^1$. Et parfois par la combinaison des contributions harmoniques et du bruit cas des crêtes 5 et 11 où elles commencent à varier linéairement à partir de $a \geq 2^{1.49}$ et $a \geq 2^{2.12}$ respectivement. Ces singularités sont de régularités non entières et positives de l'ordre $\alpha_2=1.37$; $\alpha_4= 1.51$; $\alpha_5= 1.29$; $\alpha_{11}=1.06$.

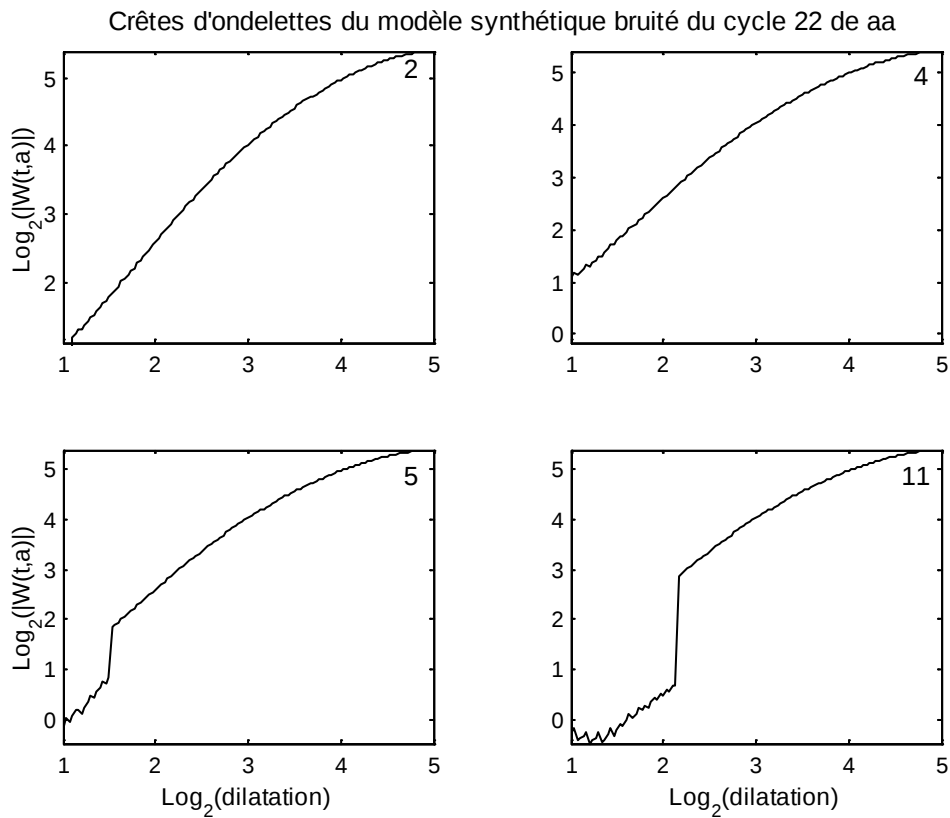


Fig. 84 : Crêtes d'ondelettes du modèle synthétique du cycle 22 de aa avec bruit.

En comparant les valeurs des régularités des deux modèles synthétiques (Fig. 85), nous remarquons qu'elles sont très différentes, à l'exception de celle localisée en 1988 ($\alpha=1.33$) dans le cas du modèle exact et ($\alpha=1.27$) dans celui bruité. Notons que ces régularités sont associées à la ligne de maxima la plus dominante des deux modèles.

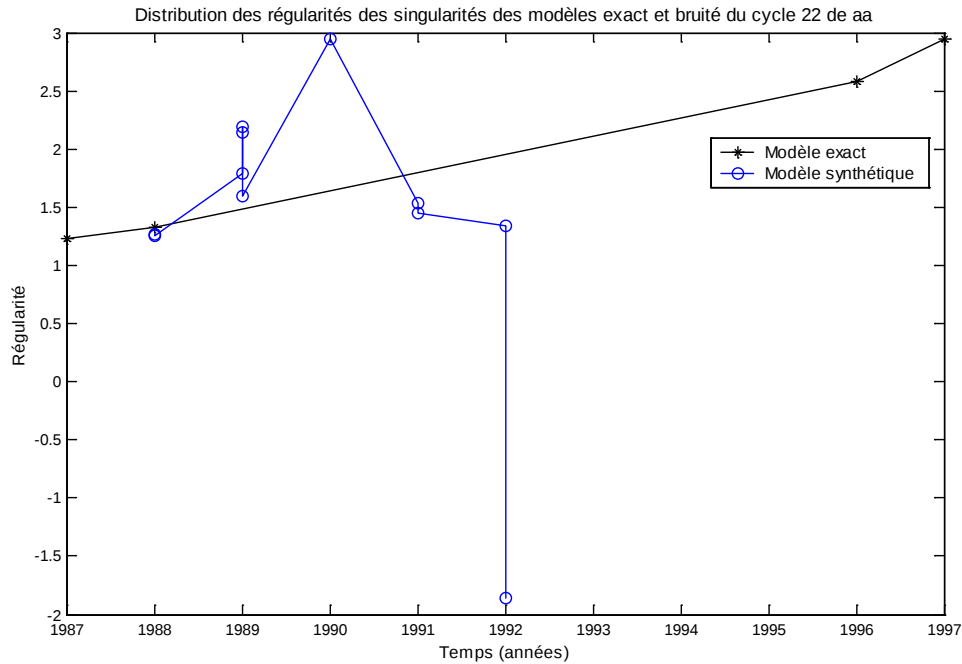


Fig. 85 : Distribution des régularités des modèles synthétiques exact et bruité du cycle 22 de aa en fonction des dates d'apparition des singularités.

V.4. Analyse en ondelettes du cycle réel N°22 de aa

Le cycle réel N°22 des indices **aa** de l'activité géomagnétique décrit une variation temporelle rapide et irrégulière (Fig. 86a). Ces irrégularités représentent les singularités contenues dans le signal accompagnées de bruit ; comme c'est le cas de tout signal physique réel. Nous nous proposons d'étudier ces singularités à partir de l'application de la TOC afin de les caractériser.

L'analyse en ondelettes de cette distribution fait apparaître plusieurs lignes de maxima réparties sur toute la longueur du signal (Fig. 86b). Notons qu'elles sont d'amplitudes variables et que la TOC marque un maximum à $t=13/08/1988$.

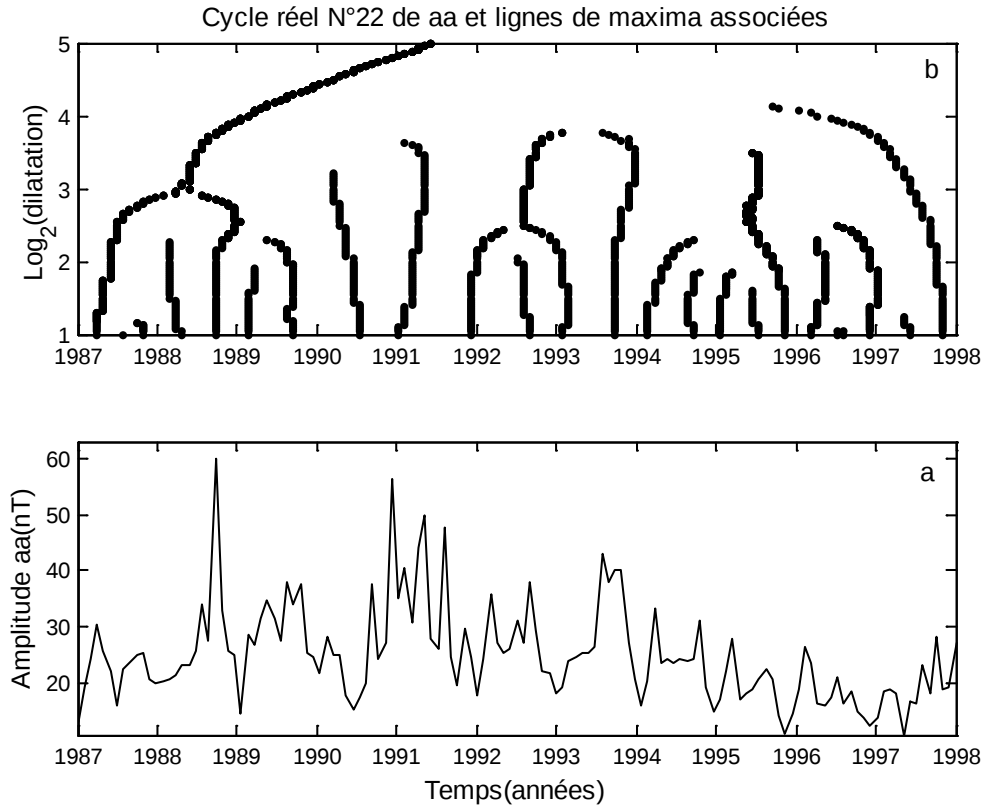


Fig. 86 : Cycle réel N°22 de **aa** et lignes de maxima associées.

Nous allons tenter de caractériser les lignes de maxima associées au cycle réel N°22 des indices **aa**. Pour ce faire nous étudions la régularité de chacune d'entre elles à partir de la variation du module de l'ondelette en fonction de la dilatation.

V.4.1. Classement des crêtes d'ondelettes du cycle réel 22 de aa

Les crêtes d'ondelettes des singularités du cycle réel N°22 des indices **aa** décrivent une variation à tendance linéaire positives influencées par les contributions harmoniques et le bruit (cas 1 et 7).

Des crêtes de type 3 avec des régularités proches de zéro, montrent une décroissance à partir de $a \geq 2^{1.75}$ (cas 8; 12 et 21) (Fig. 87).

Les crêtes 1 et 7 deviennent quasi linéaires à partir de $a \geq 2^{2.5}$ et $a \geq 2^{2.29}$ avec des régularités de l'ordre $\alpha_1=0.8$ et $\alpha_7=0.7$, respectivement. Quant aux crêtes 8, 12 et 21 dont les régularités sont, respectivement, de l'ordre de $\alpha_8=\alpha_{12}=0.1$ et $\alpha_{21}=0.3$.

La description des crêtes d'ondelettes (Fig. 87) laisse supposer une importante influence du bruit.

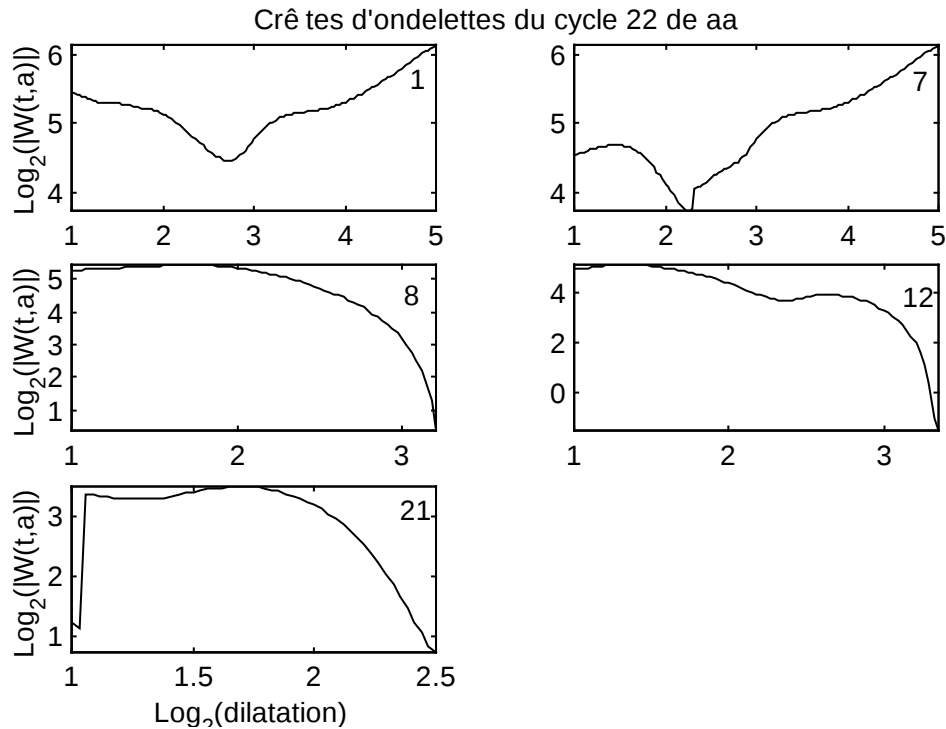


Fig. 87 : Crêtes d'ondelettes du cycle réel 22 de **aa**.

La TOC appliquée au signal tel qu'il est décrit dans la figure 86a ne nous apporte pas suffisamment de renseignements quant à la nature des singularités qu'il contient. Pour cela, nous allons appliquer au cycle réel N°22 des indices **aa** la technique des dérivées absolues moyennes calculées pour deux périodes $T=\{3, 6\}$ mois.

V.5. Méthode de la dérivée absolue moyenne

Le formalisme de la méthode de la dérivée absolue moyenne est décrit dans le chapitre IV. Rappelons que la dérivée absolue permet de mesurer les variations irrégulières, alors que la moyenne mobile lisse le bruit et élimine les composantes périodiques (Blanter et al., 2001).

La figure 84 permet de comparer simultanément les signaux obtenus et le cycle réel 22 de **aa**. En effet, nous observons une atténuation en amplitudes des variations

rapides quand T augmente. Alors que les variations de faibles amplitudes disparaissent au fur et à mesure que T augmente pour que finalement il ne reste que les grands traits relatifs aux singularités plus ou moins intenses. Notons aussi l'importance des deux variations, comprises entre 1988 et 1993, qui caractérisent ce cycle.

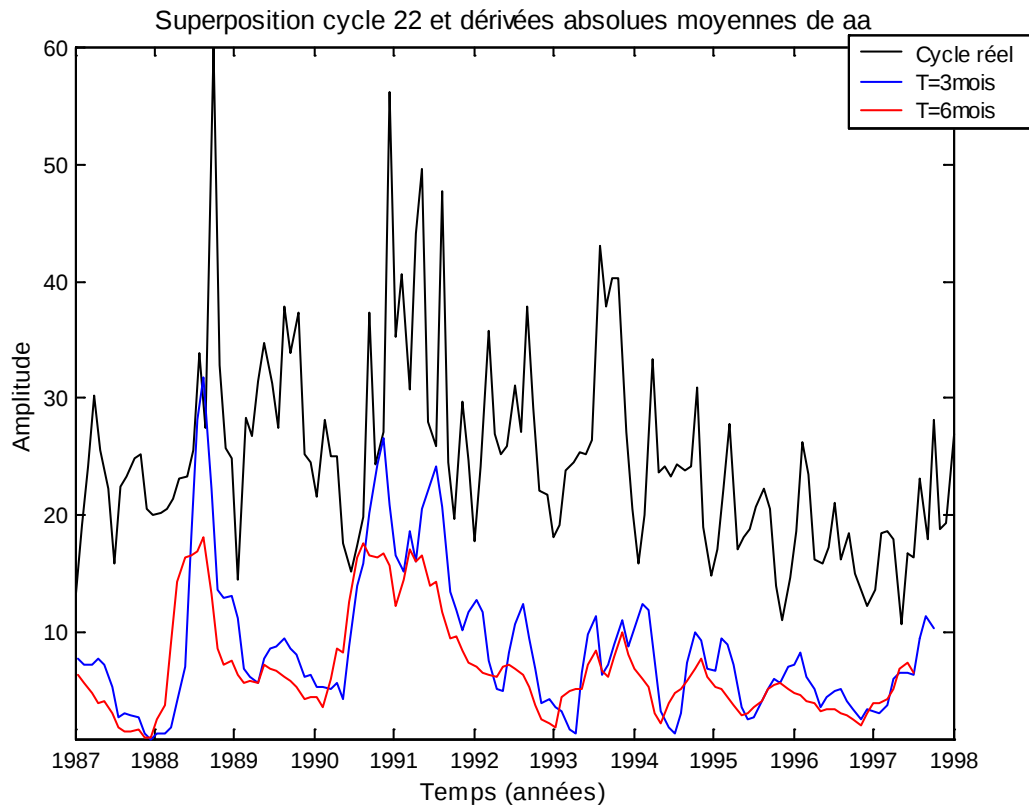


Fig. 88 : Comparaison du cycle réel N°22 des indices **aa** de l'activité géomagnétique et de ses dérivées absolues moyennes calculées pour $T=\{3, 6\}$ mois.

V.5.1. Analyse en ondelettes des dérivées absolues moyennes du cycle réel N°22 de aa

L'ondelette analysante « chapeau mexicain » est utilisée dans l'analyse des dérivées absolues moyennes du cycle réel 22 des indices **aa** de l'activité géomagnétique. Les lignes de maxima associées à chacun des deux modèles sont données dans les figures 89b et 90b.

Comme on peut le voir sur les figures 89b et 90b, les lignes de maxima révélées par la TOC apparaissent plus ou moins dominantes par rapport à d'autres sur toute la longueur du signal. Celles d'amplitudes importantes sont localisées au niveau des perturbations intenses de l'activité géomagnétique, dans l'intervalle de temps compris entre 1988 et 1993. On remarque aussi qu'elles ne s'atténuent pas bien que la valeur de la fenêtre de filtrage T augmente.

En comparant les figures 89b et 90b ; on trouve que les lignes de maxima se décalent vers la droite au fur et à mesure que T augmente et que celles de faibles amplitudes s'atténuent. Pour une meilleure comparaison des localisations des singularités, nous représentons sur la figure 91 la distribution des dates d'apparition des lignes de maxima associées aux singularités contenues dans le cycle réel 22 des indices **aa** ainsi que celles apparaissant dans les modèles filtrés avec $T=3$ et 6 mois. Effectivement, nous remarquons des singularités contenues dans le cycle réel et les $|d(\mathbf{aa})/dt|$ qui apparaissent soit le même jour (24/8/1997) pour $T=3$ mois et (4/04/1991) pour $T=6$ mois. Soit avec un décalage temporel comme celles qui apparaissent le 25/03/1987 et le 11/03/1987 pour $T=6$ mois. Notons également que les singularités contenues dans les $|d(\mathbf{aa})/dt|$ n'ont pas la même localisation des dates de leur apparition.

Ce comportement suggère deux hypothèses : Soit le filtre utilisé décale les dates d'occurrence des singularités contenues dans les signaux traités. Soit il met en évidence d'autres singularités non détectées auparavant. Afin d'apporter une réponse à ces suggestions ; on étudie la régularité α qui est l'élément caractéristique des singularités. Elle est calculée à partir des crêtes d'ondelettes (Fig. 92) données par la variation du module d'ondelette en fonction de la dilatation le long d'une ligne de maxima. Nous allons également représenter la distribution des régularités α en fonction des dates d'apparition des singularités qui leur sont associées.

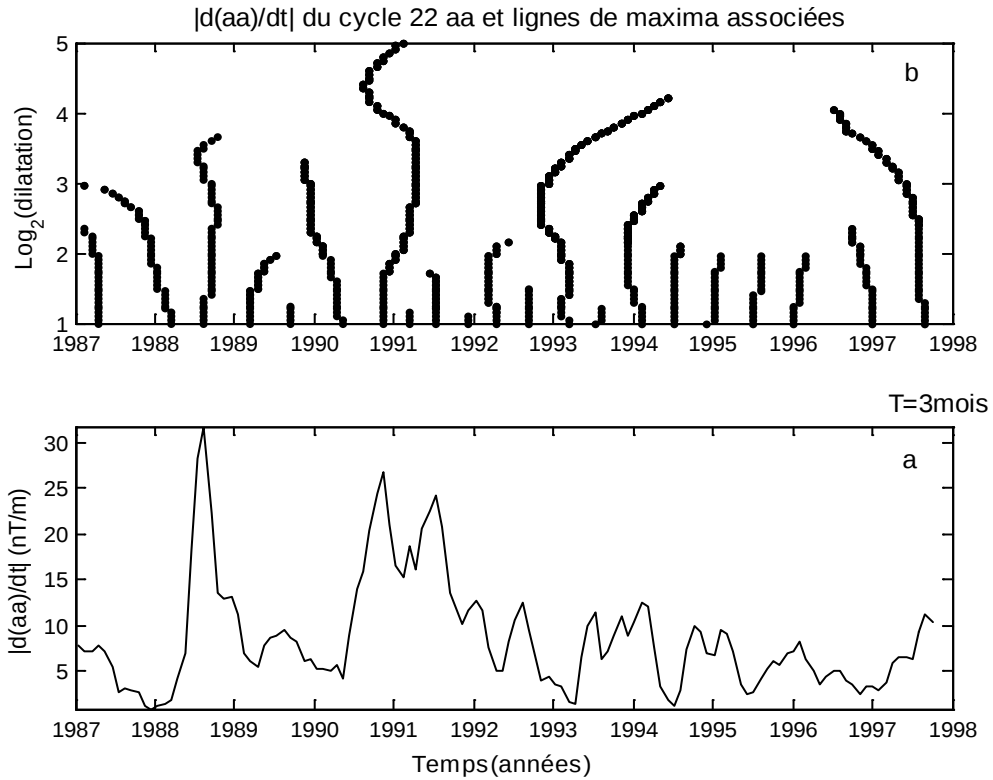


Fig. 89 : (a) Dérivée absolue moyenne du cycle 22 de **aa** ($T=3\text{mois}$) et (b) lignes de maxima associées.

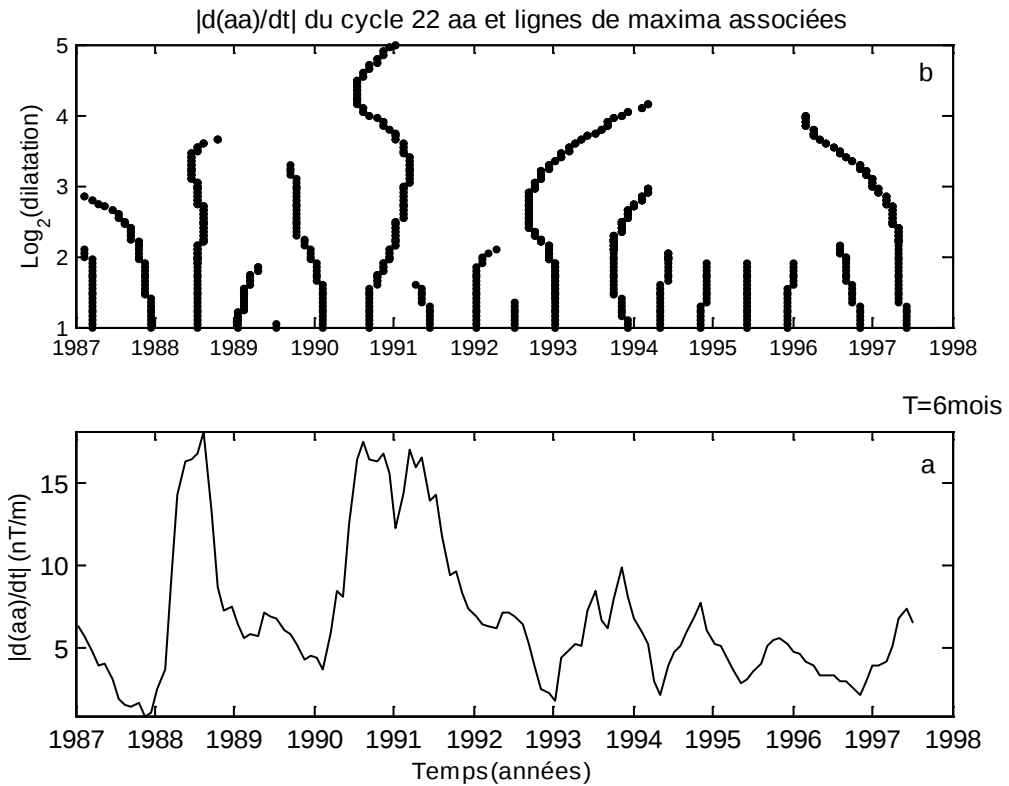


Fig. 90 : (a) Dérivée absolue moyenne du cycle 22 de **aa** ($T=6\text{mois}$) et (b) lignes de maxima associées.

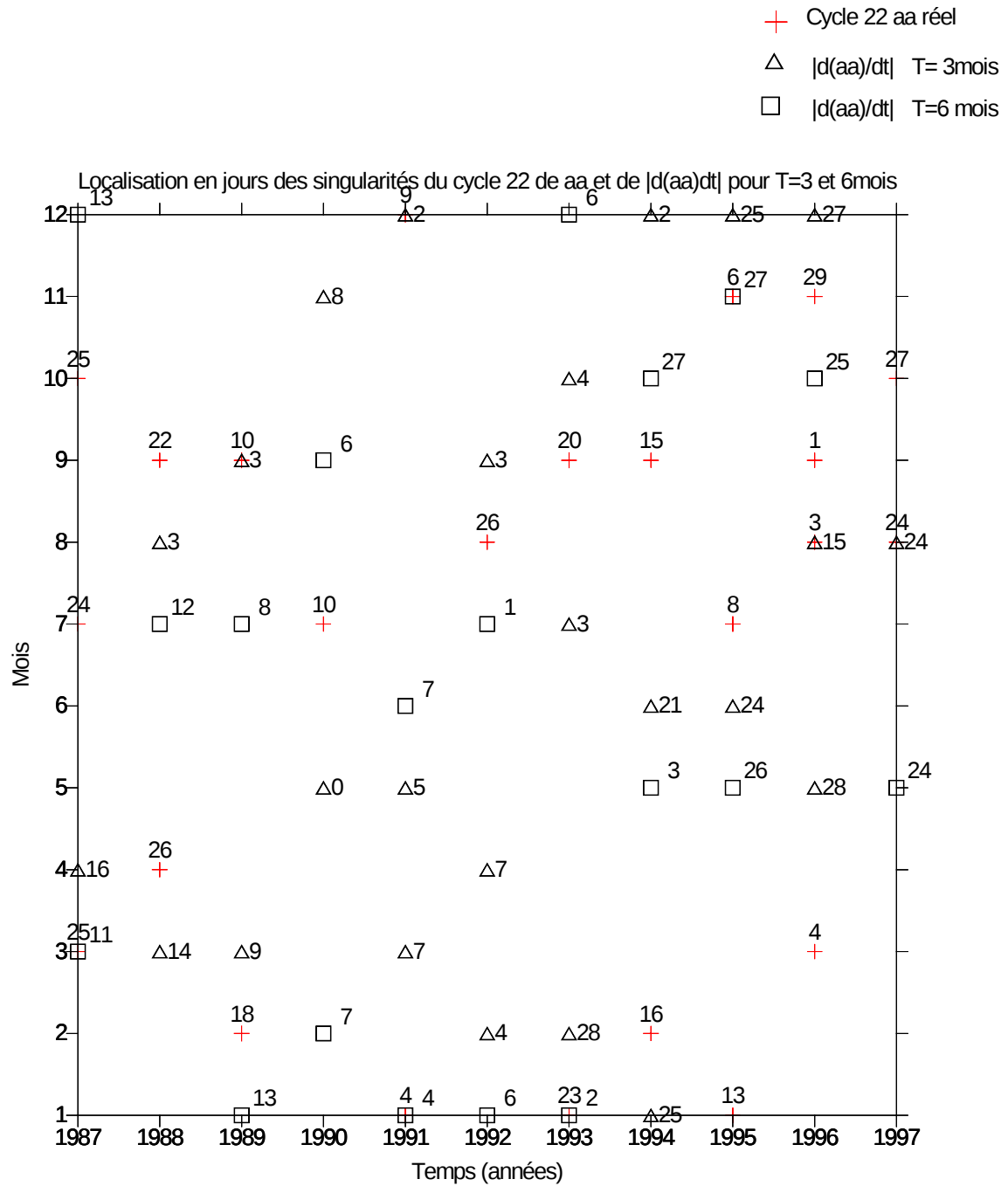


Fig. 91 : Localisation des singularités du cycle 22 de **aa** et de $|d(aa)/dt|$ pour T=3 et 6 mois.

V.5.2. Classement des crêtes d'ondelettes du cycle 22 de aa

Les crêtes d'ondelettes des singularités contenues dans les dérivées absolues moyennes du cycle 22 de l'activité géomagnétique sont respectivement représentées dans les figures 92 et 93.

On peut classer les crêtes en deux types :

Le premier décrit les crêtes à tendance linéaire positive ($\alpha > 0$). Elles sont influencées soit par les contributions harmoniques, soit par le bruit ou bien la combinaison des deux.

Le deuxième décrit les crêtes à tendance linéaire négative ($\alpha < 0$) ou celles de régularité nulle ($\alpha \approx 0$). Ainsi que les crêtes dues essentiellement aux contributions harmoniques influencées par d'autres harmoniques.

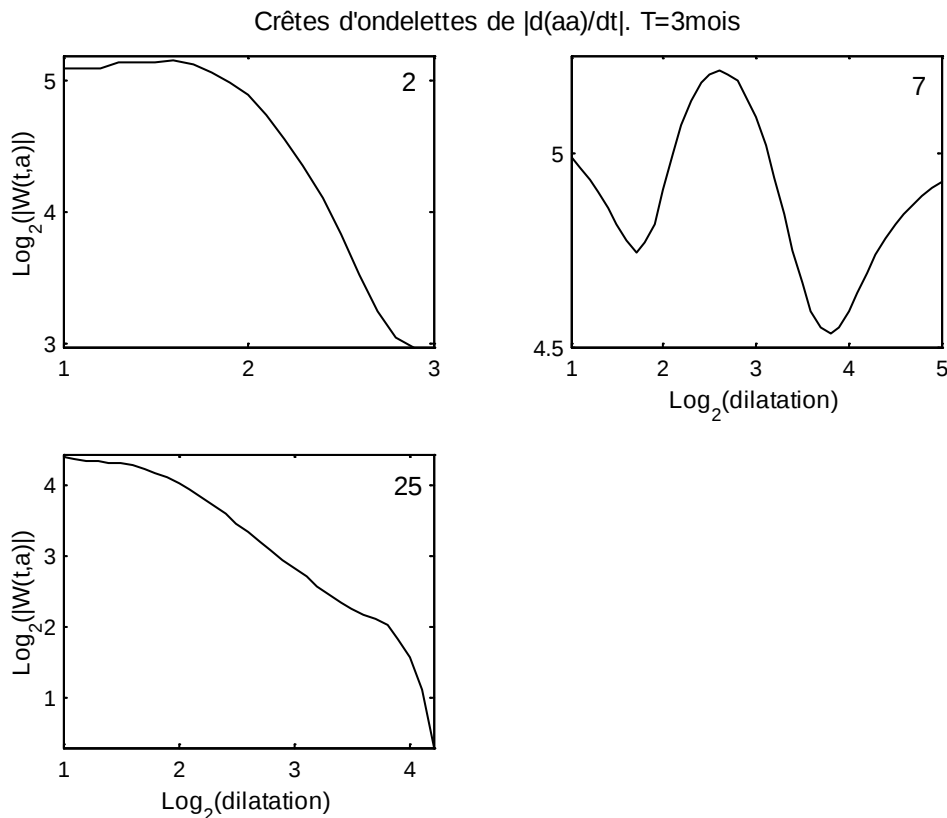


Fig. 92 : Crêtes d'ondelettes de la moyenne mobile du cycle 22 de aa. T=3mois.

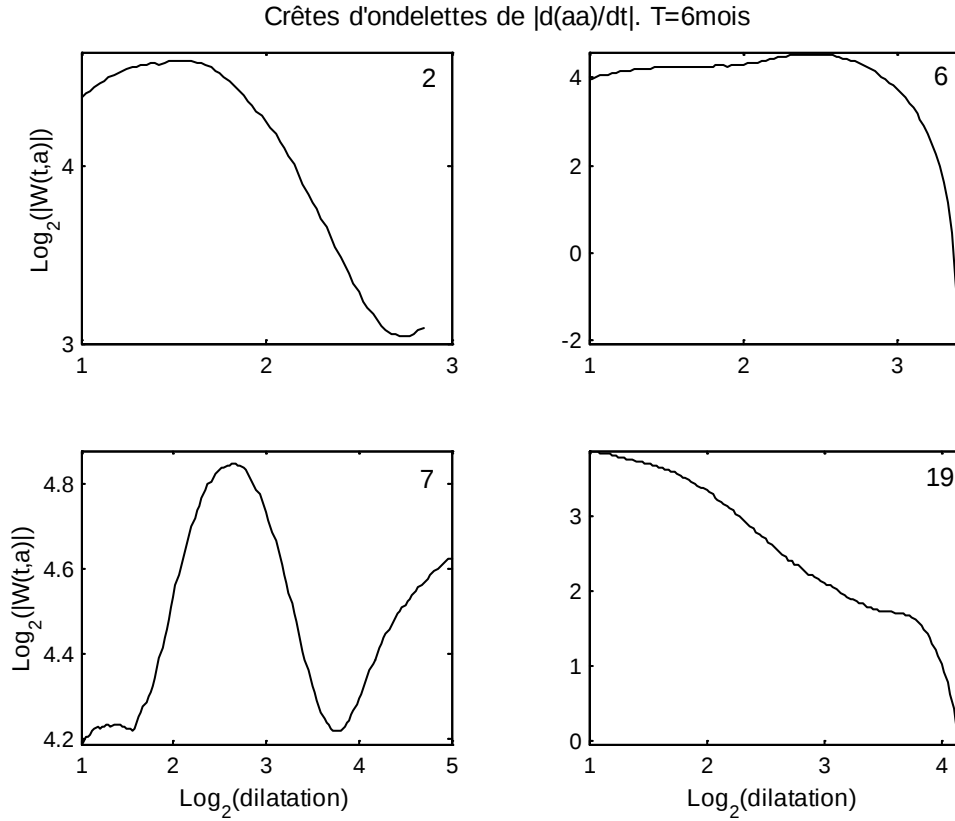


Fig. 93 : Crêtes d'ondelettes de la moyenne mobile du cycle 22 de aa. $T=6$ mois.

Pour mieux analyser la nature des singularités contenues dans le cycle réel 22 des indices **aa** et ses dérivées absolues moyennes calculées pour $T=\{3, 6\}$ mois, nous allons établir une distribution des régularités en fonction de leurs dates d'occurrence (Fig. 94). Effectivement, nous remarquons que les régularités ont une distribution aléatoire. Elles sont comprises entre -1.45 et 1 . Celles associées au cycle 22 non filtré montrent une quasi-stabilité sur deux intervalles $\{1988, 1990\}$ et $\{1994, 1996\}$. Par contre les régularités des signaux filtrés montrent une variation quasi-similaire dans l'intervalle de temps compris entre 1988 et 1994.

Nous allons vérifier si les singularités contenues dans le cycle 22 des indices aa ainsi que dans les dérivées absolues moyennes correspondent à une activité géomagnétique ou solaire particulière. Pour cela nous allons illustrer dans les figures 95 (a et b) les dates d'activité et celles des occurrences des singularités durant les années 1996 et 1997.

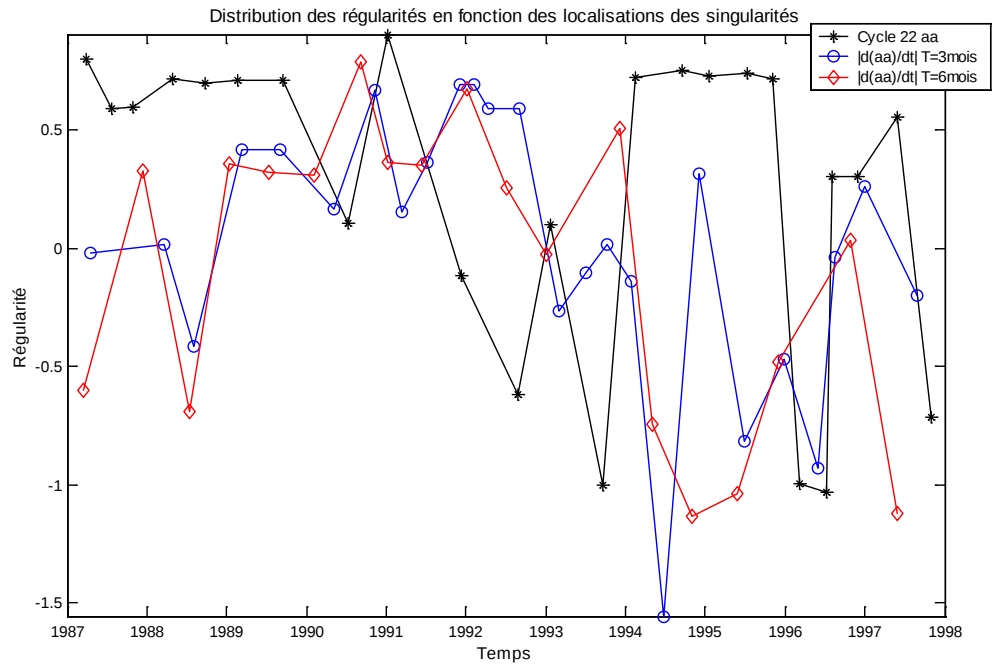


Fig. 94 : Distribution des régularités des singularités du cycle 22 de aa et des $|d(aa)/dt|$ calculées pour $T=\{3, 6\}$ mois en fonction de leurs localisations.

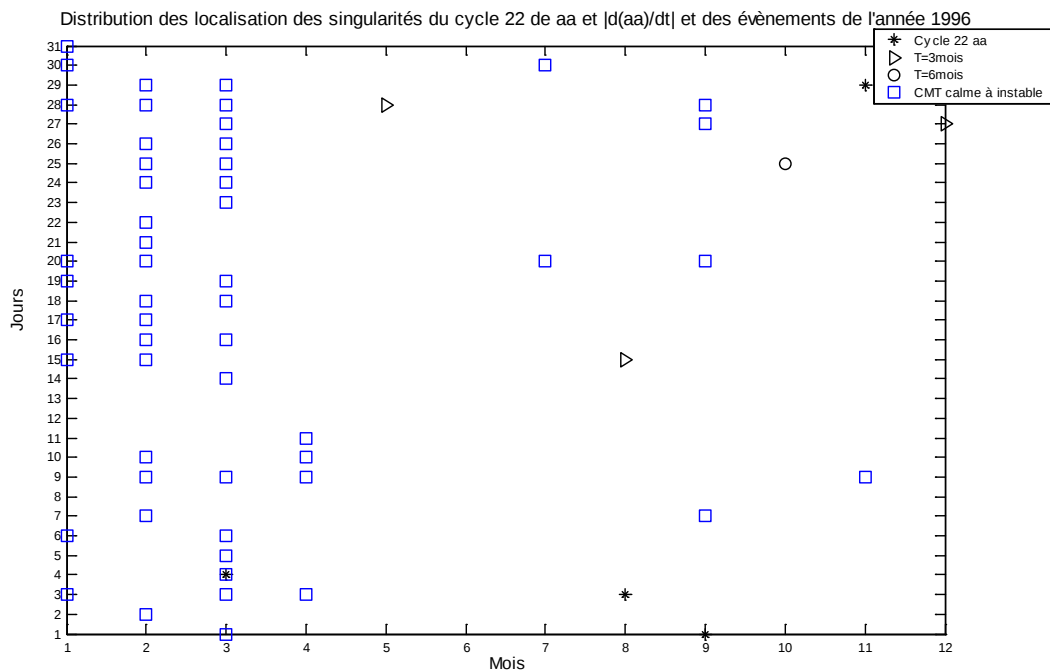


Fig. 95a : Distribution des localisations des singularités du cycle 22 de **aa**, de ses dérivées absolues moyennes et des événements enregistrés en 1996.

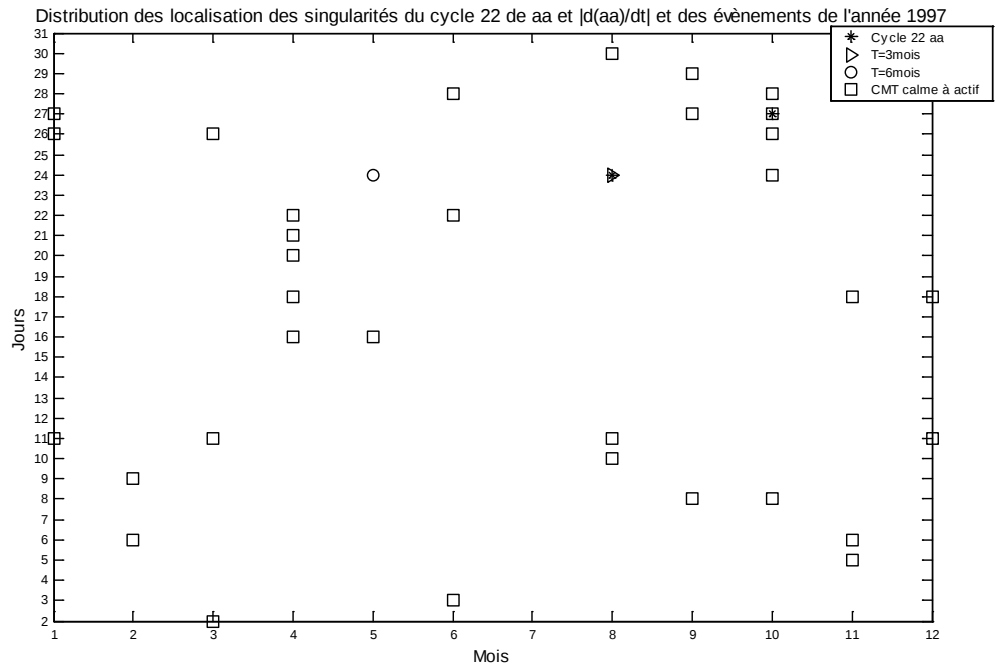


Fig. 95b : Distribution des localisations des singularités du cycle 22 de **aa**, de ses dérivées absolues moyennes et des évènements enregistrés en 1997.

D'après les figures 95a et 95b nous avons pu détecter, respectivement, un champ magnétique terrestre calme à instable le 03/04/1996 et un champ calme à actif le 27/10/1997.

Les résultats mis en évidence dans cette partie sont encourageants. Il est intéressant de faire la même étude en utilisant d'autres ondelettes analysantes d'un côté et de considérer d'autres valeurs de fenêtre de filtrage de l'autre.

Conclusion Générale

Tout au long de ce mémoire, nous nous sommes intéressés à l'étude des variations transitoires du champ magnétique terrestre. Ce sont des variations rapides, liées à l'interaction du vent solaire avec le champ magnétique terrestre. Cette interaction a pour effet d'affecter et de perturber le champ magnétique terrestre. En effet, le Soleil est le siège d'une activité permanente et manifestement violente, telles que les éruptions solaires, où nous pouvons observer sur la couronne du Soleil de spectaculaires jets de plasma. Les taches solaires sont également la manifestation de l'activité solaire, caractérisées par le cycle de 11ans. Une caractéristique observée dans la variation temporelle du champ géomagnétique à partir de la TF. Notre étude se consacre à la détection et caractérisation des singularités à partir de la TOC. Dans ce but nous avons utilisé différents ensembles et jeux de données:

- le nombre de taches solaires (**ssn**) pour l'étude de l'activité solaire,
- les indices **aa** de l'activité géomagnétique,
- les composantes X, Y et Z du champ magnétique terrestre de l'observatoire français CLF pour la période 1993-1999.

Avant d'étudier les données réelles, nous avons établi des modèles synthétiques exact et bruité décrivant les variations du cycle 22 de **ssn** et **aa** ainsi que les variations temporelles du champ géomagnétique. Pour une maîtrise de l'application de la TOC et une meilleure interprétation des résultats obtenus, nous l'avons appliquée dans un premier lieu à la détection et la caractérisation des singularités contenues dans les différents modèles synthétiques. Les résultats obtenus nous ont encouragés à pousser cette étude en utilisant les données réelles. Or les variations rapides ainsi que le bruit observés dans les différents ensembles de données, notamment les composantes géographiques du champ magnétique terrestre montrent des variations non comparables. Ainsi pour mieux exploiter la TOC nous avons appliqué à l'ensemble des données la dérivée absolue moyenne calculée pour les périodes $T=\{3, 6\}$ mois.

On a établi l'influence du bruit sur le signal utile à partir de la TOC. Celui-ci apparaît dans le décalage des dates d'apparition des singularités contenues dans le

signal étudié, ainsi que dans la modification de l'allure des crêtes d'ondelettes. Notons que le bruit ne détruit pas le modèle global des crêtes.

Les résultats obtenus à partir de l'analyse en ondelettes continues du cycle 22 de **ssn** et **aa** ainsi que de leurs dérivées absolues moyennes respectives ont révélé :

- Les singularités détectées dans l'analyse par TOC du cycle 22 de **ssn** et **aa** ainsi que de leur dérivées absolues moyennes respectives ne sont pas synchrones.
- Les régularités des singularités sont variables, leur variation en fonction de la localisation des singularités est aléatoire.
- Les singularités sont caractérisées par des régularités variant dans l'intervalle $[-0.24 \ 1.48]$ pour **ssn** et l'intervalle $[-1.45 \ 1]$ pour **aa**.
- Les crêtes d'ondelettes ont une tendance linéaire positive, tantôt influencées par le bruit, tantôt par les composantes harmoniques et parfois par les deux contributions.
- L'analyse par TOC des dérivées absolues moyennes de **ssn** et **aa** montrent un comportement quasi-similaire de la variation des régularités en fonction des dates d'apparition des singularités.

Quant à l'analyse des composantes géographiques du champ géomagnétique de l'observatoire CLF, elle a révélé des singularités avec des crêtes d'ondelettes décrivant une variation similaire par rapport à celles établies par **ssn** et **aa**. Les régularités calculées varient entre $[-0.04 \ 1.86]$. Leur variation en fonction de la localisation des singularités est également aléatoire.

La dérivée absolue moyenne a mis en relief une variation temporelle des composantes du champ comparable alors que les données non filtrées, montrent des signaux très bruités avec des variations rapides. La TOC des composantes du champ filtrées a permis de détecter des singularités contenues dans ces dernières. Notons que leur dates d'occurrence ne correspondent pas en générale. Or nous avons relevé deux hypothèses quant à l'effet du filtre sur la localisation des singularités :

- 1- La fenêtre de filtrage choisie peut décaler les dates d'apparition des singularités, ou bien ;
- 2- La TOC révèle de nouvelles singularités en éliminant d'autres en faisant varier la fenêtre de filtrage T.

Nous avons réussi à faire correspondre, à partir de la localisation temporelle, les phénomènes physiques liés aux activités géomagnétique et solaire correspondants à ces mêmes dates. Nous avons détecté par exemple « un champ magnétique calme à actif », « calme à instable », ou bien « un champ magnétique actif à orages mineurs ». Les résultats obtenus sont encourageants, une étude plus poussée dans ce sens serait intéressante et prometteuse.

Pour une meilleure exploitation de la TOC ainsi que des résultats qui sont satisfaisants et encourageants, il est recommandé d'établir une étude planétaire des contributions externes du champ magnétique terrestre. Ce genre d'étude permet une meilleure interprétation des singularités détectées à partir de la TOC du champ magnétique terrestre par rapport aux événements relatifs à l'activité solaire ou géomagnétique. Une longue série d'événements permettra une meilleure comparaison de la nature de ces derniers par rapport aux singularités détectées aux même dates. Une éventuelle prédiction à partir des régularités des singularités contenues dans le champ géomagnétique serait dans ce cas possible.

Nous recommandons également :

- Une analyse des données de champ magnétique terrestre avec un échantillonnage plus serré. L'étude pourrait révéler plus de détails quant à l'analyse en ondelettes continues.
- De considérer des fenêtres de filtrage inférieures à $T=3$ mois dans le calcul des dérivées absolues moyennes des différents signaux traités dans ce mémoire.

Liste des abréviations

- aa indices de l'activité géomagnétique.
- CLF Chambon la Forêt
- CMT Champ magnétique terrestre
- Dst Disturbed storm
- ssc storm sudden commencement (orage à début brusque)
- ssn sunspot number (nombre de taches solaires).
- TF Transformée de Fourier
- TOC Transformée en ondelettes continues

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUE

Alexandrescu M., 1996, Le champ géomagnétique et ses variations, Thèse de doctorat de l'institut de physique du globe de Paris.

Alexandrescu M., D. Gibert, G. Hulot, J.-L. Le Mouél, and G. Saracco, 1995, Detection of geomagnetic jerks using wavelet analysis, *J. Geophys. Res.*, 100, 12557-12572.

Allen J., H. Sauer, L. Frank and P. Reiff, 1989, Effects of the march 1989 solar activity, *Eos*, Vol. 70, No. 46.

Blanter E.M., M.G. Shnirman, and J.-L. Le Mouél, 2001, Solar activity and variability of geophysical time series, the synchronizing driving force, *J. Geophys. Res.*

Bilge A. H. and Y. K. Tulunay, 1997, Spectral analysis of geomagnetic data from Kandilli observatory, Istanbul, *Annali Di Geofisica*, Vol. XL, No. 6, pages 1591-1598.

Bouchereau E., 1997, Analyse d'images par transformées en ondelettes. Application aux images sismiques. Thèse de Doctorat de l'Université Joseph Fourier. Grenoble.

Campbell W. H., 1996, Geomagnetic storms, the Dst ring-current myth and lognormal distributions, *Journal Atmospheric and terrestrial physics*, Vol. 58, No. 10, pp. 1171-1187.

Cliver E.W., Y. Kamide and A.G. Ling, 2002, The semiannual variation of geomagnetic activity: phases and profiles for 130 years of aa data, *Journal of Atmospheric and Solar-terrestrial Physics*, 64, pp. 47-53.

Cohen Y., 1989, Traitement et interprétation des données spatiales en géomagnétisme: étude des variations latérales d'aimantations de la lithosphère terrestre, thèse., Université Paris7.

Courtillot V. and J. L. Le Mouél, 1988, Time variations of the Earth's magnetic field: from daily to secular, *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, No. 16, pages 389-476.

Daubechies I., 1992, Ten lectures on wavelets, Society for industrial and applied mathematics Philadelphia, Pennsylvania.

Gibert D., 1996, éléments de traitement du signal, Université de Rennes 1, UFR Structures et Propriétés de la Matière. Géosciences Rennes (Upr 4661 CNRS).

Gire C., 1985, Sur la variation séculaire du champ magnétique terrestre et les mouvements des couches externes du noyau fluide, Thèse de doctorat ès sciences physiques, Université de Paris VII.

Gonzalez W. D., J. A. Joselyn, Y. Kamide, H. W. Kroehl, G. Rostoker, B. T. Tsurutani and V. M. Vasyliunas, 1994, What is a geomagnetism storm?, *J. Geophys. Res.*, Vol. 99, No. A4, pages 5771-5792.

Gregoris D. J. and S. Yu, 1994, Introduction to the theory and applications of wavelet transform, *Spar Journal of Engineering and Technology*, Vol. 3, pp. 20-33.

Hamoudi M., 1984, Prolongement des champs de potentiel par méthodes inverses. Application aux données magnétiques MAGSAT au-dessus du continent africain, Thèse de Magister.

Hathaway D. H., R. M. Wilson, and E. J. Reichmann, 1999, A synthesis of solar prediction techniques, *J. Geophys. Res.*, Vol. 140, No. A10, pp. 22375-22388.

INTERMAGNET Technical Reference Manual V0.4, 1999.

Iyemori T. and D. R. K. Rao, 1996, Decay of the Dst field of geomagnetic disturbance after its implication to storm-substorm relation. *Ann. Geophysicae* 14, pp. 608-618.

Le Mouél J. L., 1976, Le champ géomagnétique, Traité de Géophysique interne, ed. J. Coulomb, G. Jobert, Tome 2 , pp. 9 –67, Paris Masson.

Lilensten L. et J.P. Blelly, 1999, Météo spatiale: course aux prévisions, *La Recherche*, N° 320, pp. 50-53.

Malin S.R.C. and A. M. Isikara, 1976, Annual variation of the geomagnetic field, *Geophys. J. Res. Astr. Soc.*, V. 45, pp. 445-457.

Mallat S. and W. L. Hwang, 1992, Singularity detection and processing with wavelets, *IEEE transactions on information theory*, Vol. 38, No. 2, pp. 617-643.

Mallat S., 2000, Une exploration des signaux en ondelettes, Editions de l'Ecole Polytechnique.

Mayaud P.N., 1978, Morphology of the transient irregular variations of the terrestrial magnetic field, and their main statistical laws, *Ann. Geophys.*, T. 34, fasc. 3, pp. 243-276.

Mazaudier C. et Y. Cohen, 1990, L'électrojet équatorial: composante du circuit électrique global connectant le vent solaire, la magnétosphère, l'ionosphère, l'atmosphère et la Terre, Section IV: Géomagnétisme et Aéronomie.

Moreau F., 1995, Méthodes de traitement de données géophysiques par transformée en ondelettes, Thèse de doctorat de l'Université de Rennes I, Mémoires de géosciences – Rennes, No. 69.

Mursula K. and B. Zieger, 1996, The 13.5-day periodicity in the Sun, solar wind, and geomagnetic activity: The last three solar cycles, *J. Geophys. Res.*, Vol. 101, No. A12, pp-27,077-27,990.

Mursula K. and TH. Ulich, 1998, A new method to determine the solar cycle length, *Geophys. Res. Let.*, Vol. 25, No. 11, pp. 1837-1840.

Mursula K. and B. Zieger, 1998, Solar excursion phases during the last 14 solar cycles, *Geophys. Res. Let.*, Vol. 25, No. 11, pp-1851-1854.

Mursula K. and B. Zieger, 2001, Long-term north-south asymmetry in solar wind speed inferred from geomagnetic activity: A new type of century-scale solar aoscillation?, *Geophys. Res. Let.*, 28, 95-98.

Mursula K. and B. Zieger, 2000, The 1,3-year variation in solar wind speed and geomagnetic activity, 25 (9) 1939-42.

Nesme-Ribes, E., E.N. Ferreira and P. Mein, 1993, Solar dynamics over cycle 21 using sunspots as tracers; I. Sunspot rotation. *Astron. Astrophys.*, 279, pp. 563-570.

Nevanlinna H., A. Ketola, L. Häkkinen, A. Viljanen and K. Ivory, 1993a, Geomagnetic activity during solar cycle 9 (1844 – 1856), *Geophys. Res. Let.*, Vol.20, No.8, pages 743-746.

Nevanlinna H. and A. Ketola, 1993b, Magnetic results from Helsinki magnetic meteorological observatory. Part III. Declination 1854-1880. Geomagnetic activity 1844-1880, *Geophysical Publication*, No. 33.

Nevanlinna H. and A. Ketola, 1994, Magnetic results from Helsinki magnetic meteorological observatory. Part IV. Declination 1880-1909. Summary of observations 1844-1909, *Geophysical Publication*, No. 36.

Perreault P. and S.-I. Akasofu, 1978, A study of geomagnetic storms, *Geophys. J. Res. Astr. Soc.*, 54, 547-573.

Truchetet F., 1998, Ondelettes pour le signal numérique, HERMES.

Usokin, I.G., K. Mursula, et G.A. Kovalstov, 2001, Simulation of sunspot activity during active sun and great minima using regular, random and relic fields, 199, pp. 187-199.

Ultré-Guérard P., 1996, Du paléomagnétisme au géomagnétisme spatial, analyse de quelques séquences temporelles du champ magnétique terrestre, Thèse de doctorat de l'institut de physique du globe de Paris.

Vennerstroem S., 2000, Long-term rise in geomagnetic activity – A close connection between quiet days and storms, *Geophy. Res. Let.*, Vol. 27, No. 1, pp. 69-72.

Vigouroux A., 1996, Etude de la variabilité solaire à long terme, Thèse à l'observatoire européen (observatoire de Nice).

ANNEXE A

Adresses de sites d'information du programme InterMagNet

CHAPTER 7 WORLD WIDE WEB

7.1 INTRODUCTION

The INTERMAGNET web site provides background information about INTERMAGNET, its structure and its participating organizations, countries and IMOs (INTERMAGNET Magnetic Observatories). It offers access to its various products including magnetograms and data files of Reported and Adjusted Minute Mean values from all the IMOs, the Annual CD-ROM of Definitive Data, and the Technical Reference Manual. The INTERMAGNET application form can also be obtained from the web site.

7.2 MIRROR SITES

INTERMAGNET web site address is:
www.intermagnet.org

INTERMAGNET hosts 5 mirror sites around the world. The site addresses and locations are as follows:

www.geolab.nrcan.gc.ca/intermagnet
- Ottawa, Canada (Eastern North America)

obsmag.ipgp.jussieu.fr/INTERMAGNET
- Paris France

swdcd.db.kugi.kyoto-u.ac.jp/intermagnet
- Kyoto, Japan

www.gsrg.nmh.ac.uk/intermagnet
- Edinburgh, United Kingdom

geomag.usgs.gov/intermagnetusa
- Golden Colorado (Western North America)

ANNEXE B

Figures de localisation des singularités des dérivées absolues moyennes des composantes Y et Z du champ magnétique terrestre à l'observatoire français Chambon la Forêt

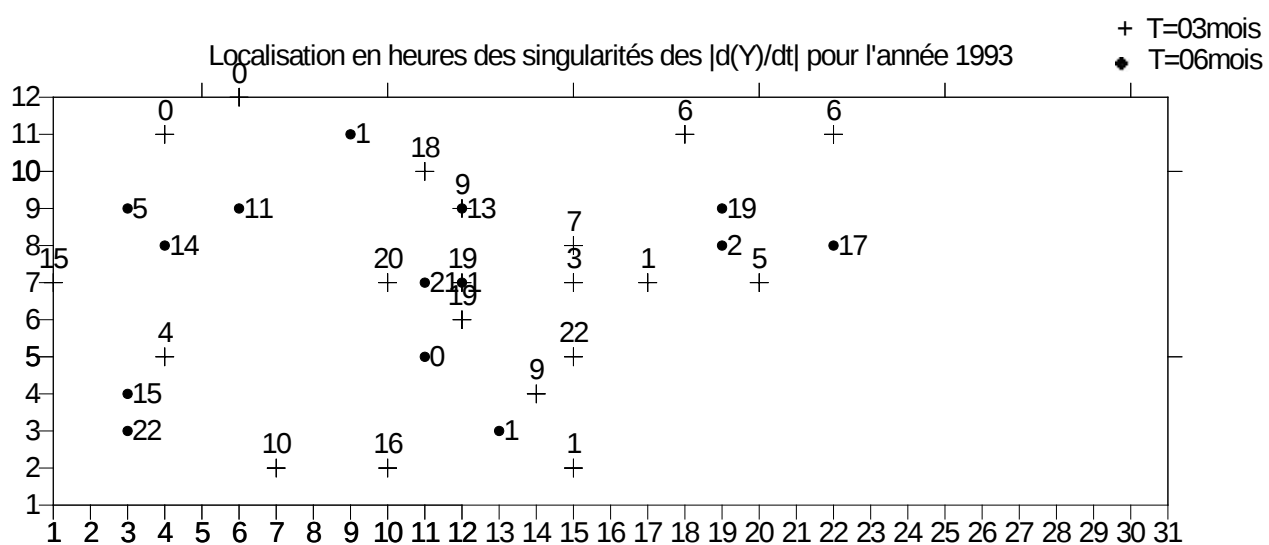


Fig. 1a: Localisation des singularités de la dérivée absolue moyenne de Y de l'observatoire CLF, pour l'année 1993.

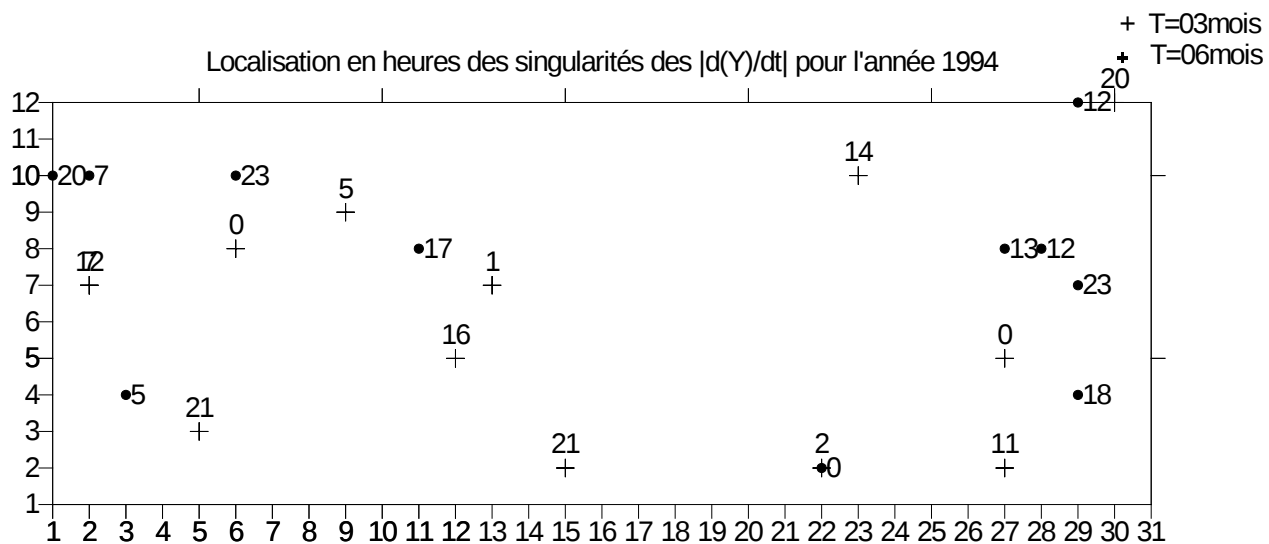


Fig. 1b: Localisation des singularités de la dérivée absolue moyenne de Y de l'observatoire CLF, pour l'année 1994.

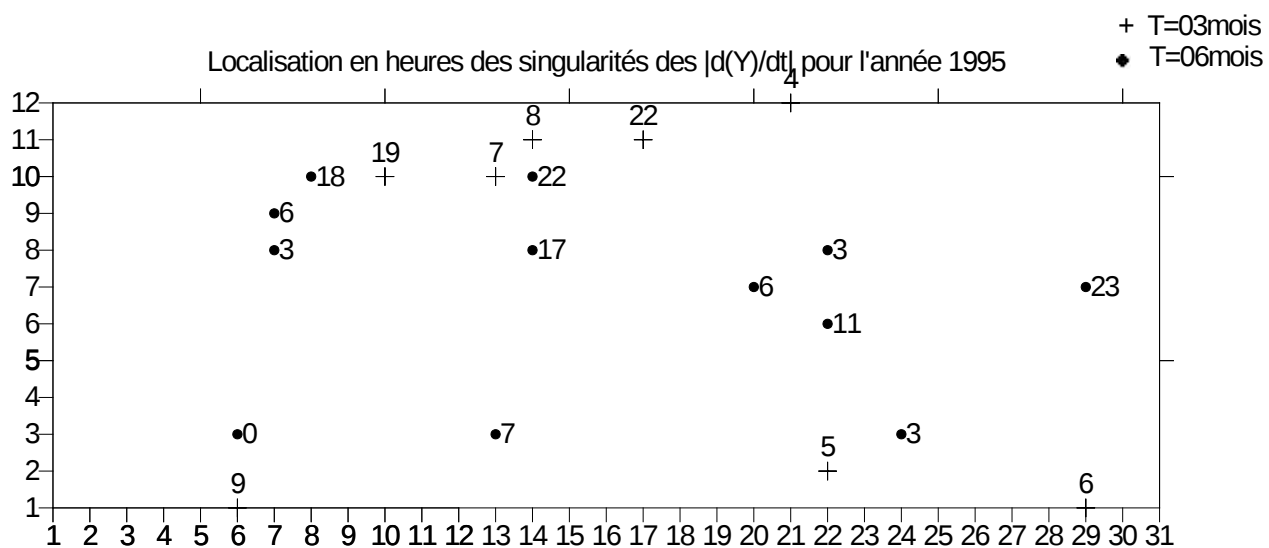
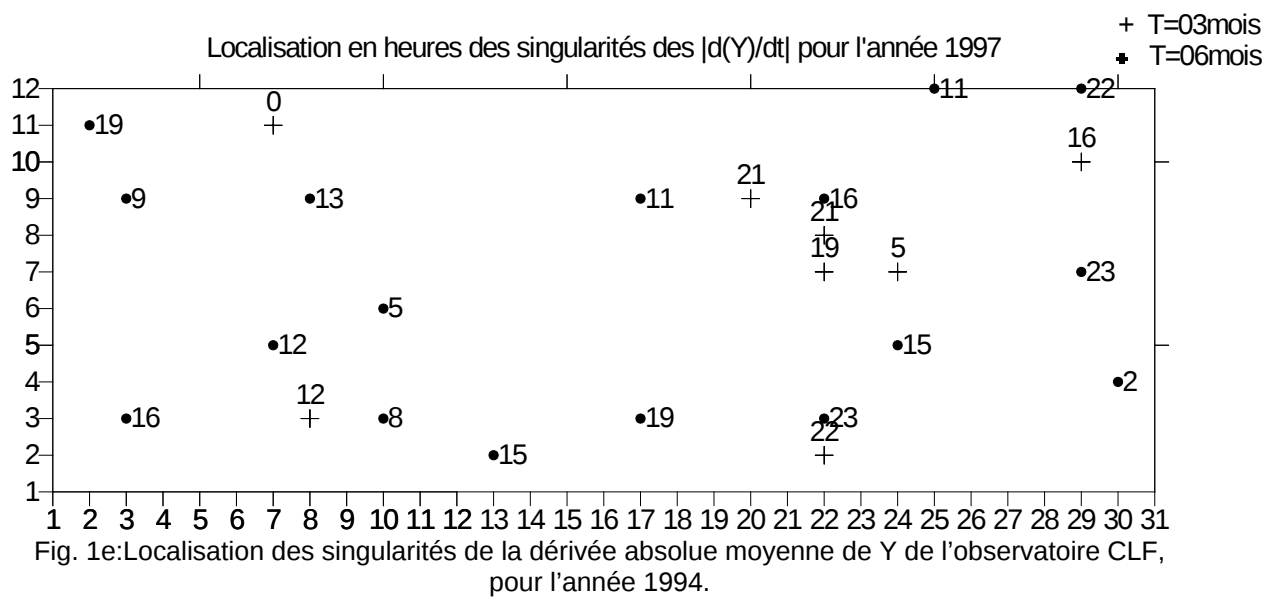
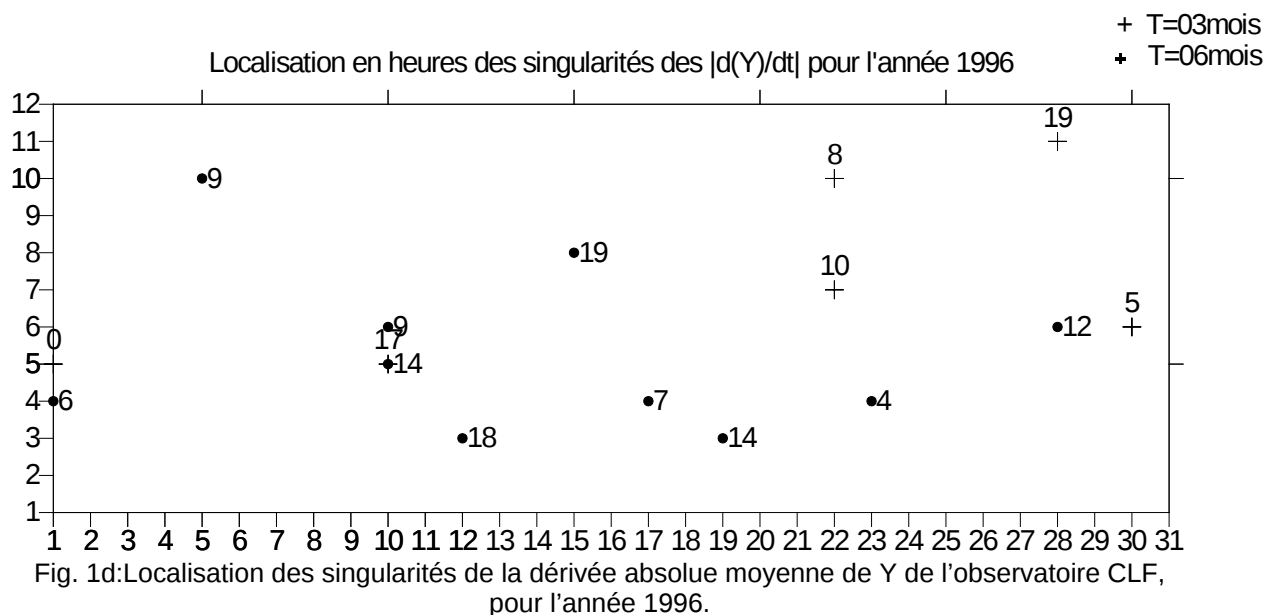
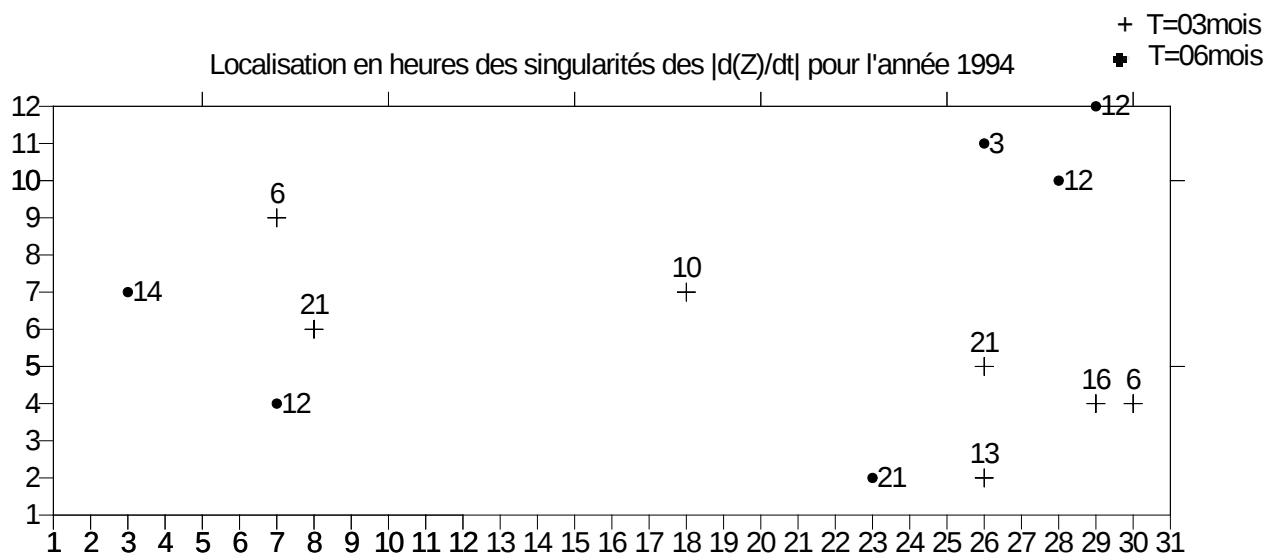
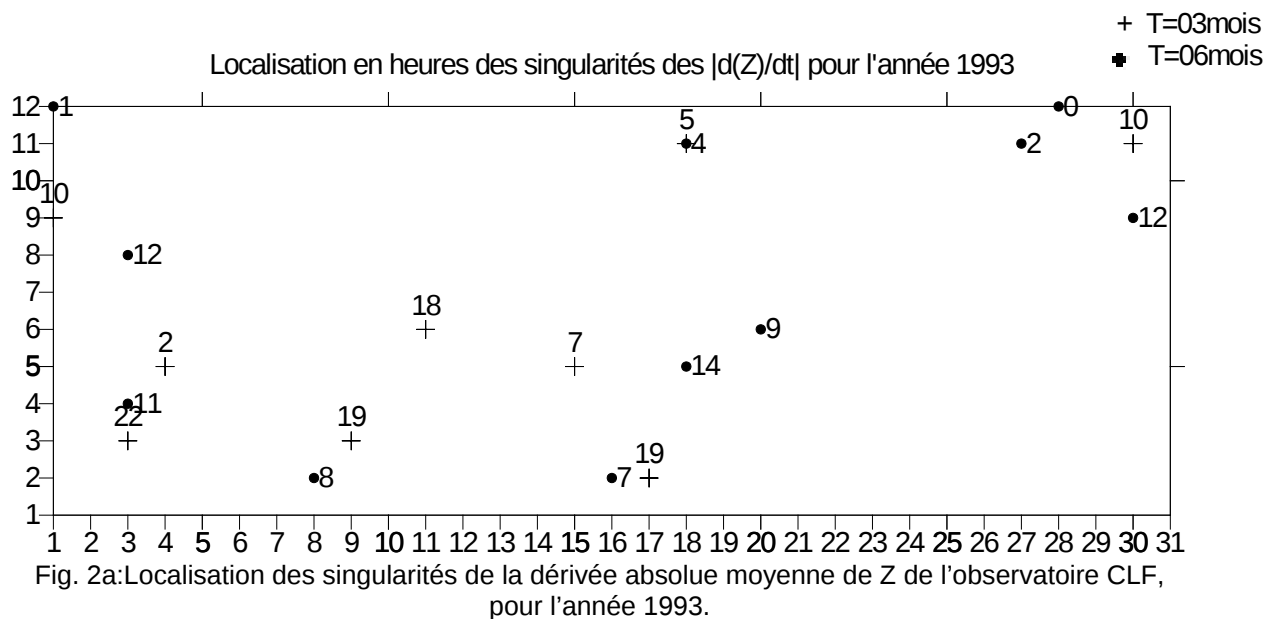
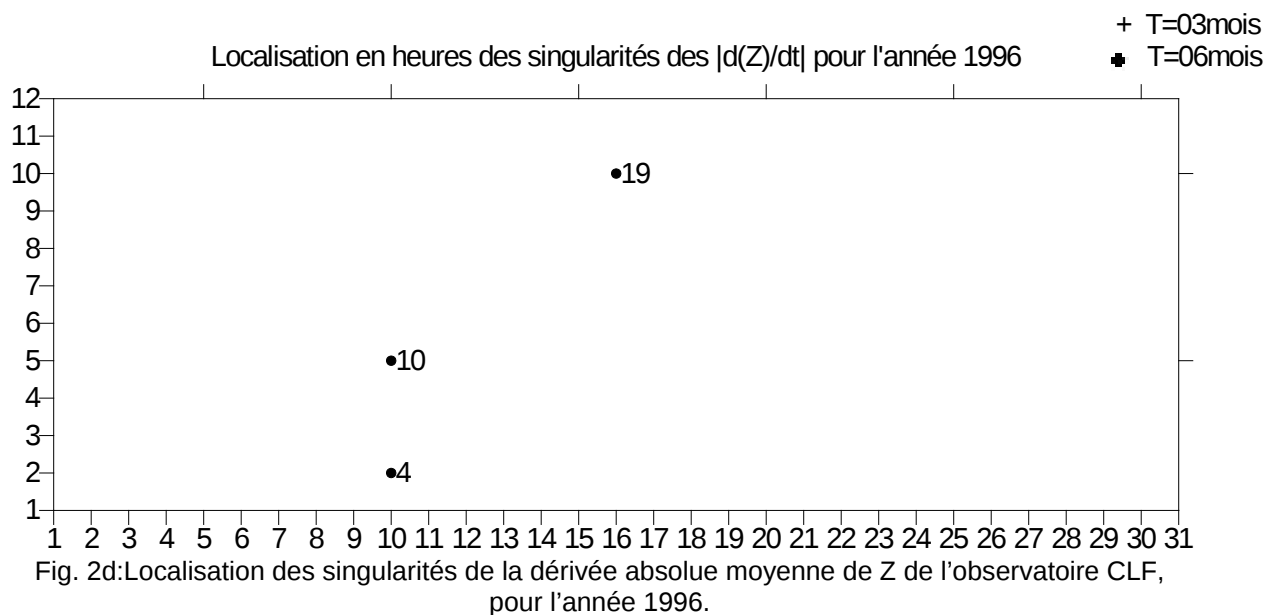
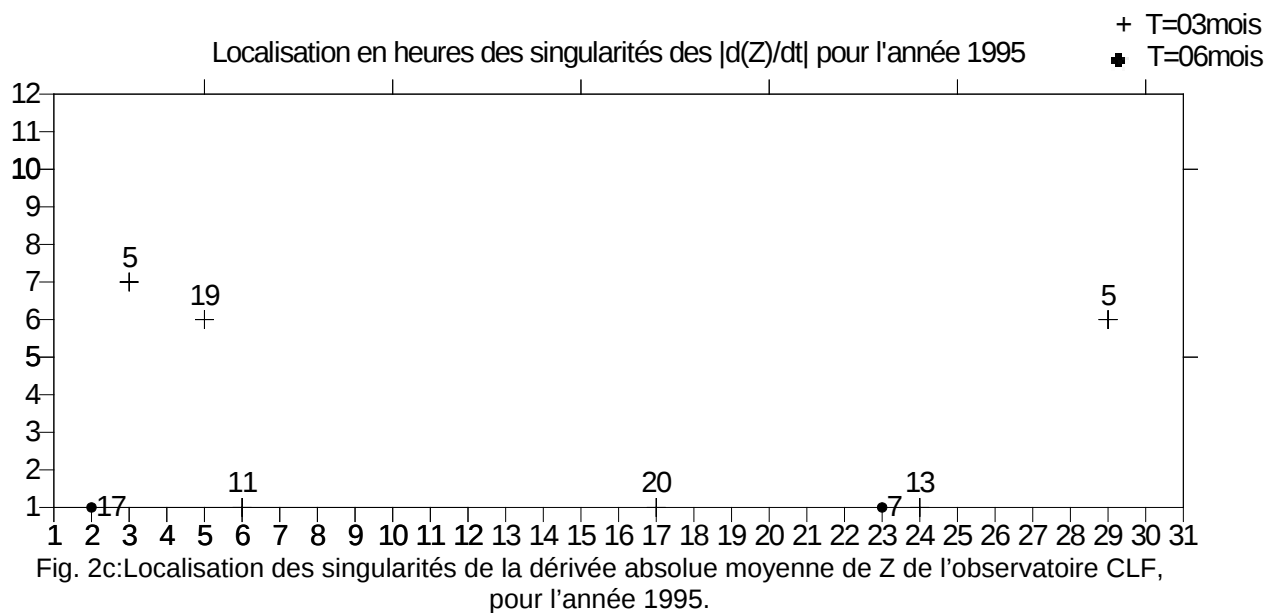


Fig. 1c: Localisation des singularités de la dérivée absolue moyenne de Y de l'observatoire CLF, pour l'année 1995.







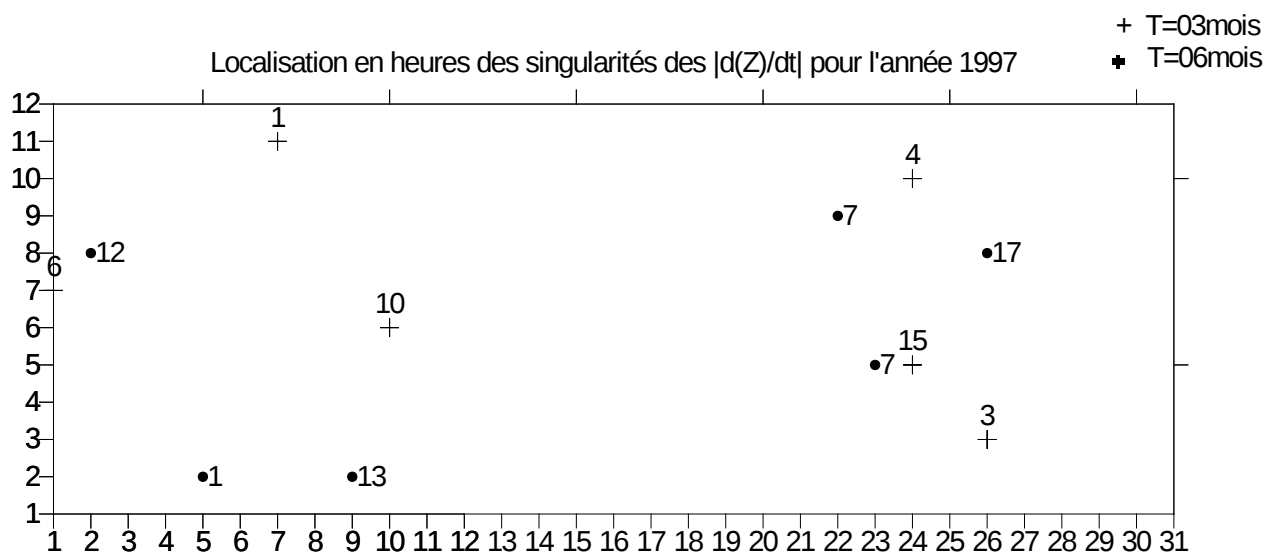


Fig. 2e: Localisation des singularités de la dérivée absolue moyenne de Z de l'observatoire CLF, pour l'année 1997.

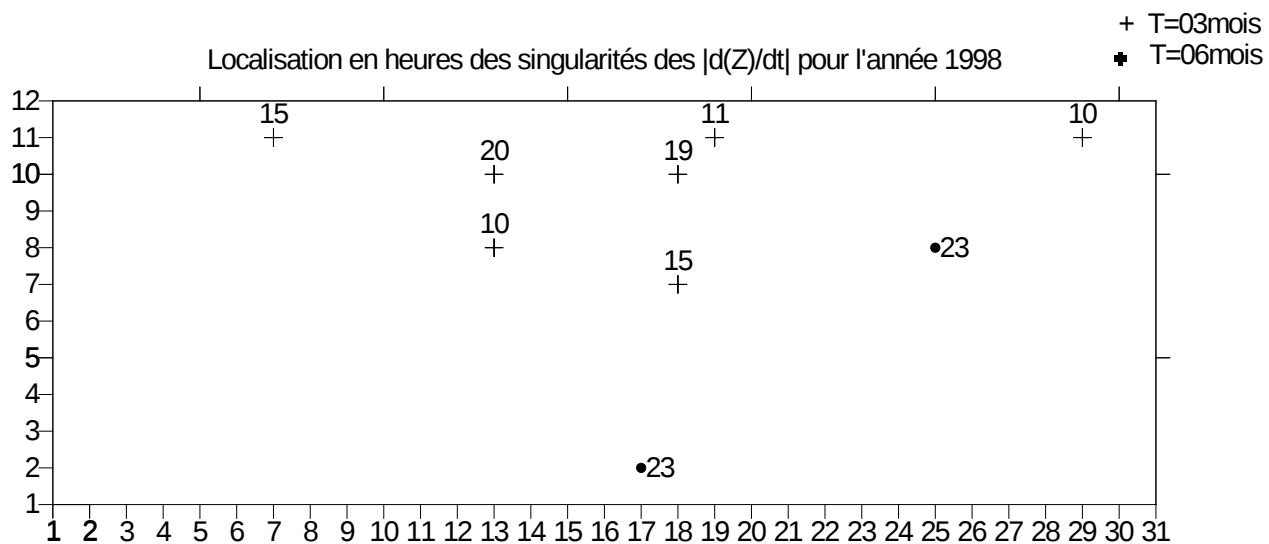


Fig. 2f: Localisation des singularités de la dérivée absolue moyenne de Z de l'observatoire CLF, pour l'année 1998.

ANNEXE C

Classement des indices tri horaires K dans la détermination du type de l'activité géomagnétique et/ou solaire observé.

Description des conditions géomagnétiques:

Probability forecast of geomagnetic conditions at middle and high latitudes-the probability of at least one 3-hour K index, at the indicated level, for each of the next 3 days. Active: K = 4 Minor storm: K = 5 Major or Severe storm: K = 6.