

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche Scientifique
Université ABDERRAHMANE MIRA – BEJAIA

Faculté des sciences exactes

Département de Physique



جامعة بجاية
Tasdawit n Bgayet
Université de Béjaïa

Mémoire de fin de cycle

En vue de l'obtention du diplôme de Master en physique

Option : Astrophysique

Thème :

Interaction Soleil-Terre

Analyse spectrale de la série chronologique des aurores polaires de basses latitudes

Réalisé par :

Melle : Abdelkader Célia

Mémoire soutenue le, 11/06/2022 devant le jury composé de :

<i>Mme OULEBSIR Nadia</i>	<i>MCA</i>	<i>Président</i>	<i>univ.de Béjaïa</i>
<i>Mr BELABBAS Abdelmoumene</i>	<i>MCA</i>	<i>Examineur</i>	<i>univ.de Béjaïa</i>
<i>Mme CHADOU Ilhem</i>	<i>MCB</i>	<i>Encadreur</i>	<i>univ.de Béjaïa</i>
<i>Mr BEKLI Mohamed Réda</i>	<i>MCA</i>	<i>Co-encadreur</i>	<i>univ.de Béjaïa</i>

Année Universitaire : 2021-2022

Dédicaces

*A mes très **chers parents** source de vie, d'amour et d'affection*

*A mes **chers frères**, source de joie et de bonheur*

*A mes deux profs Mme **CHADOU ILHEM** et Mr **BEKLI MOHAMED REDA**,
source de confiance et de force, ma deuxième famille.*

*A Mr **BELHADI ZAHIR**, source de critique constructive, d'intelligence et de
gentillesse*

*A M. **BELABBAS Abdelmoumene**, source de stabilité, de connaissances et de
motivation*

*Sans oublier les trois doctorants qui étaient avec moi Mr **ZAIDI Abdeljalil**,
Mlle **BECHEKER Katia** et Mr **Berrabah Abdlghani**.*

*A tous mes amis(e), particulièrement **tonton ilyes, Lamia, Frère Billal, Hanane**,
dada Nabil et son épouse **Nesrine**, et **Hocine**, pour leurs conseils et leurs
sacrifices.*

*Je remercie tous les membres d'Association "Sirius" des Astronomes amateurs
de Bejaia, source de motivation et de courage*

*Enfin, un grand merci à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin
à ma réussite.*

Remerciement

Au terme de mon travail de fin d'étude, je tiens à adresser mes vifs remerciements et mes sincères gratitudes à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à ma réussite.

*Je tiens tout d'abord à remercier Mme **CHADOU ILHEM** et Mr **BEKLI MOHAMED REDA**, pour avoir eu l'amabilité de m'accueillir au sein du Laboratoire de physique théorique. Ils m'ont accordé leur temps, et ils m'ont communiqué la confiance en soi et la passion de travailler et de produire. Je les remercie du fond du cœur pour leur intérêt, patience, leur disponibilité et pour tous leurs conseils prodigués.*

*A M. **BELABBAS Abdelmoumene** d'avoir accepté d'examiner mon travail*

*Je voudrais également remercier le professeur **Mr. Chelouche**, chef du département de physique, ainsi que nos honorables professeurs et membres du jury.*

Je réserve une pensée spéciale à tous mes enseignants de MASTER Astrophysique qui nous ont assuré une formation appréciable : tout au long de mon cursus

Je souhaite adresser des remerciements spéciaux à mes parents et mes frères pour leur soutien durant toute cette période.

Table des matières

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

Chapitre I : Interaction Soleil-Terre

Introduction	3
I -Soleil	3
I.1. Caractéristiques du Soleil	3
I.2. Structure du soleil :	4
I.2.1. Noyau.....	4
I.2.2. Zone radiative (zone de rayonnement)	4
I.2.3. Zone de convection (zone thermodynamique)	4
I.2.4. Tachocline	4
I.2.5. Photosphère	5
I.2.6. Chromosphère.....	5
I.2.7. Courone et trous couronaux.....	5
I.3. Magnétisme solaire	5
I.4. Manifestation de l'activité solaire.....	6
I.4.1. Taches solaires.....	6
I.4.2. Eruption solaire (tempête solaire).....	6
I.4.2.1. Type d'éruptions solaires.....	6
I.4.2.2. Classification des éruptions solaire	7
I.4.3. Protubérances solaires (filament solaire).....	7
I.4.4. Vent solaire.....	7
II. Terre.....	8
II.1. Atmosphère terrestre	8
II.1.1. Troposphère.....	9
II.1.2. Stratosphère	9
II.1.3. Mésosphère.....	9
II.1.4. Thermosphère	9
II.1.5. Exosphère	10
II.2. Magnétosphère terrestre	10
III. Interaction Soleil-Terre	11

III.1. Influence du soleil sur terre.....	11
III.1.1. Climat.....	12
III.1.2. Saisons.....	12
III.1.3. Auores polaires.....	12
III.2. Aurore boreales	12
III.2.1. Origine des auores polaires	13
III.2.2 Auores borieles de basses latittudes.....	13
III.2.2.1. Couleurs des aurores boreales.....	13
Références	16

Chapitre II: Données et méthodes d'analyses

Introduction	17
I. Série chronologique (Temporelle)	17
I.1. Composants d'une série chronologique	17
I.2. Analyse d'une série chronologique	18
II. Transformation de Fourier et spectre de puissance	18
II.1. Transformation de Fourier.....	18
II.2. Transformation de Fourier sidcrète	20
II.3. Densité spectrale de puissance	20
II.4. Périodogramm.....	21
III. Fenêtrage	21
III.1. Fenêtre rectangulaire.....	22
III.2. Fenêtre Welch.....	22
III.3. Fenêtre triangulaire	23
III.4. Fenêtre Bartlett	24
III.5. Fenêtre Hanning	24
III.6. Fenêtre Hamming	25
III.7. Fenêtre Blackman.....	26
Exemple : Fenêtre et fuite spectrale	26
IV. Coefficient de corrélation.....	28
Références	30

Chapitre II: Données et méthodes d'analyses

- Introduction31
- I. Analyse de la série chronologique globale et le cycle de Suess32
- II. Analyse par intervalle33
 - 1. Premier intervalle (1000-1300)33
 - 2. Deuxième intervalle (1300-1600)35
 - 3. Troisième intervalle (1600-1900).....38
- III. Activité solaire40
- Références42

Conclusion générale.....43

Introduction générale

Pourquoi nous nous intéressons aux aurores boréales de basses latitudes ?!

Ce n'est pas surprenant que l'Aurore boréale soit présente dans les légendes anciennes. Imaginant le mouvement des couleurs clair vert, rouge et pourpre dans le ciel! Aujourd'hui, la science permet d'expliquer ces phénomènes, mais à l'époque les hommes ont interprété de différentes manières.

En Finlande, les aurores boréales sont appelées '*Revontulets*', littéralement traduites par '*renards de feu*'. Ce nom trouve son origine dans le fabuleux mythe selon lequel les renards arctiques produisaient les aurores. Ces renards de feu courraient dans le ciel à une telle vitesse que la fourrure de leurs grandes queues, frottant les montagnes environnantes, déclenchait des étincelles illuminant la nuit. Une autre version de cette histoire racontait que les renards de feu, lancés dans leur course folle, projetaient vers le ciel, avec leur queue, la neige qui s'était déposée sur le sol. Les flocons, en tombant, reflétaient la lumière de la lune et donnaient vie aux aurores boréales. Cette version a l'avantage d'expliquer pourquoi les aurores ne sont visibles qu'en hiver, les mois d'été ne voyant aucune chute de neige.

Les aurores sont un phénomène qui se produit à des altitudes atmosphériques élevées, généralement supérieures à 100 km. Elles sont causées par l'interaction entre le vent solaire et le bouclier magnétique de la Terre. Les Aurores boréales sont observées dans les régions polaires, mais elles peuvent être aussi vues dans les régions de basse latitude pendant les périodes de forte activité solaire. Les aurores de basses latitudes sont caractérisées par une couleur rouge verbeuse produite par l'oxygène de longueur d'onde de 630 nm sans mouvement rapide est dû aux électrons de faible énergie (plus bas dans 100 eV).

Ce mémoire est partagé en trois chapitres : Le premier chapitre est consacré à la présentation de connaissances générales portant sur deux corps (le Soleil et la Terre), leurs caractéristiques, où on a précisé la relation entre eux et enfin l'interaction terre-soleil. Dans le deuxième chapitre, on s'est intéressé particulièrement aux techniques et aux méthodes d'analyse des données en présentant une nouvelle méthode d'analyse. Pour obtenir la distribution des aurores nous avons des données d'un ancien fichier auroral constitué par des observations faites en Corée (Pays située à l'Est de l'Asie). Pour cela nous avons utilisé la transformation

de Fourier rapide (FFT) et la transformation de Fourier discrète (TFD), avec une estimation de la fonction de densité de probabilité.

Dans le troisième chapitre nous avons exposé les différents résultats de nos calculs, obtenus par OriginLab, ainsi que l'analyse des données.

Introduction

Les particules chargées venant du soleil atteignent l'atmosphère à travers les deux pôles magnétiques de la terre. L'aurore boréale ainsi produite n'est rien d'autre que la conséquence de la manifestation d'éruptions solaires en interaction avec le champ magnétique de la terre. Quand les éruptions solaires sont énormes, on parle de tempête géomagnétique.

Pour cela dans ce chapitre, on s'intéresse à l'étude du soleil, de la terre, ainsi qu'à l'interaction soleil-terre.

I. Soleil

I.1. Caractéristiques du Soleil

Le soleil est l'une des milliards d'étoiles que contient notre galaxie. Il est situé dans le disque principal de la galaxie à environ 28000 années-lumière du centre de la galaxie.

Au cours des réactions nucléaires qui se produisent dans le soleil, une énorme quantité d'énergie est libérée, en retirant des particules nucléaires immédiatement. Ce flux de matière diffusé par le soleil, sous forme de petites particules, forme ce qu'on appelle le vent solaire [1].

Le tableau suivant résume les principales caractéristiques du soleil :

Nom	Soleil
Diamètre	1392000 km = 109 diamètre terrestre
Age	environ 5 milliards d'années
Masse	1.9891×10^{30} kg = 333000 masse terrestre
Volume	1.412×10^{33} cm ³ = 1.3 million de fois le volume terrestre
Densité	1.409g /cm ³
Température de la surface	5785K
Température de couronne	> 2000000K
Température au centre	15500000K
Luminosité (énergie produite)	3.846×10^{33} erg/s
Magnitude absolue	4.79
Magnitude apparente	-26.78
Durée de rotation à l'équateur	25 jours
Durée de rotation aux pôles	35 jours
Distance du centre de la Voie lactée	$2,52 \times 10^{17}$ km (8,2 kpc)
Période galactique	$2,26 \times 10^8$ années
Vitesse	217 km/s
Durée de rotation à 60° de latitude	29 jours
Durée de rotation à 83° de latitude	25.4 jours
Distance moyenne Terre-Soleil :	149.6 millions de km (8 min 20 s lumière)
L'énergie émise par le soleil	1365 W/m ²

I.2. Structure du Soleil :

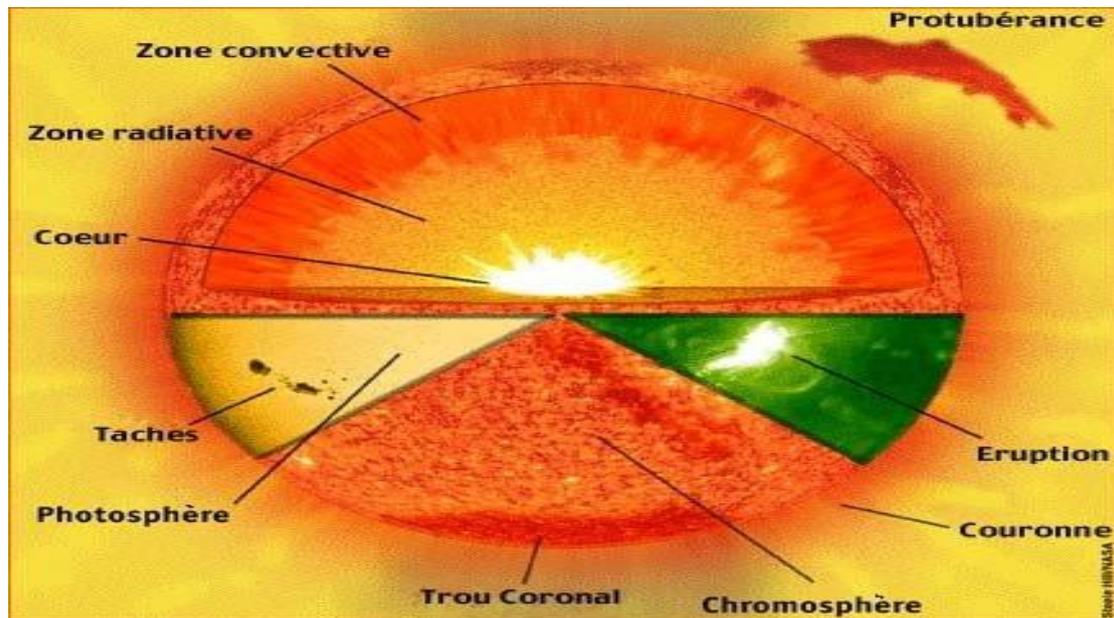


Figure 1 : Structure interne du Soleil

I.2.1. Noyau

Le noyau est le cœur du soleil (occupe 25% du soleil), avec une densité proche de 150000 kg/m^{-3} , et une température équivalente à 15 millions de kelvins. C'est la zone où se produisent des réactions nucléaires (fusion nucléaire), où l'hydrogène se transforme en hélium.

L'énergie du noyau est projetée vers l'extérieur à travers la zone radiative et la zone convective.

I.2.2. Zone radiative (zone de rayonnement)

La zone radiative est la couche qui entoure le noyau, son épaisseur varie entre 0.25 à $0.7R_s$, et sa température varie entre 200000 - $700000C^0$.

I.2.3. Zone de convection (zone thermodynamique)

La zone convective est la dernière couche de l'intérieur du soleil. Elle est instable, et s'étend de 0.7 à $1R_s$ du centre. Elle est constituée de plasma.

I.2.4. Tachocline

C'est la zone de transition entre la zone radiative et la zone convective, où des champs magnétiques très intenses sont produits. Elle a une épaisseur de $0.04R_s$, et elle est caractérisée par sa rotation de 27 jours dans l'équateur et de 35 jours au niveau des pôles [2].

I.2.5. Photosphère

La photosphère est la partie visible du soleil, d'une température d'environ 5500 K qui peut décroître à 4200 K, et d'une épaisseur près de 500 km. La photosphère absorbe tous les photons venant de l'intérieur du soleil et les dégage vers l'extérieur.

I.2.6. Chromosphère

La chromosphère se trouve au-dessus de la photosphère, mais la lumière intense de la photosphère cache la chromosphère. C'est une couche d'épaisseur variant entre 2000 et 3000 km, et d'une température allant de 4200 à 10000 K° [3]. Au-delà de la chromosphère on trouve la couronne.

I.2.7. Couronne et trous coronaux

La couronne est l'atmosphère externe du soleil qui s'étend sur des millions de kilomètres. C'est un milieu peu dense qui n'est pas brillant. La couronne est une région où les lignes de champ magnétique s'ouvrent vers l'espace.

Grâce aux groupements des taches solaires reliées aux éruptions fréquentes, ils viennent des éjections de masse coronale dans les régions actives de la surface du soleil. Ces éjections, de structure à grande échelle de la couronne solaire, sont constituées de plasma assez froid (de l'ordre de 10000 K) se déplaçant à des vitesses de plus de 1000 km /s dans l'espace.

Autour des pôles solaires, on trouve des trous coronaux plus sombres et plus froids qui agissent comme des tuyaux permettant au gaz de s'écouler hors le soleil. La densité et la température des trous coronaux sont plus faibles que dans d'autres régions de la couronne solaire. Les trous coronaux sont de forme irrégulière et peuvent apparaître à toutes les latitudes des régions équatoriales du soleil [4].

I.3. Magnétisme solaire

Le magnétisme est la force qui régit l'activité du soleil qui est composée principalement de plasma ; gaz conducteur électrique dans lequel les noyaux des atomes ont été séparés de leurs électrons. Le champ magnétique du soleil, comme celui de la terre, ressemble à un aimant rectangulaire entouré d'un champ bipolaire (deux pôles magnétiques).

Le champ magnétique du soleil change durant le cycle de 22 ans des taches solaires. Les observations des champs magnétiques de la photosphère sont réalisées en mesurant la séparation des raies d'absorption et la polarisation de la lumière ; c'est ce qu'on appelle l'effet Zeeman.

I.4. Manifestations de l'activité solaire

I.4.1. Taches solaires

Les taches solaires sont les régions sombres les plus froides de la photosphère qui apparaissent parfois sur le soleil, avec des températures variant entre 1500 jusqu'à 2000 K. On distingue deux zones :

- a) la zone d'ombre centrale (environ 4000 K).
- b) la zone de pénombre périphérique dite zone de demi-lumière (environ 4700 K).

Le plus petit diamètre de taches solaires fait d'habitude plus de deux fois le diamètre de la terre [2]. Durant l'activité solaire, il est possible d'observer les taches à l'œil nu (au coucher du soleil), avec une protection oculaire adaptée

I.4.2. Eruption solaire (tempête solaire)

Les éruptions solaires sont des manifestations de l'activité solaire ; elles sont provoquées par une accumulation d'énergie magnétique (Elle se produit à la surface de la photosphère), dans les régions où le champ magnétique est particulièrement intense. Ces événements jettent (par la chromosphère) des particules extrêmement chaudes, environ 1000 millions de centigrades dans l'espace à des millions de km/h.

Une éruption solaire d'une grande intensité au niveau du soleil peut avoir différentes conséquences sur terre. Elle peut notamment provoquer des dégâts sur les réseaux électriques.

I.4.2.1. Type d'éruptions solaires

L'éruption solaire suit trois étapes [3]:

- A) Phase créateur (étape précurseur) :** lorsque la libération d'énergie magnétique est détachée, l'émission de rayons gamma augmente régulièrement, et on peut détecter les rayons X rigides et les rayons gamma.
- B) Étape extravagant (étape impétueux):** l'accélération de protons et d'électrons à des énergies supérieures à 1 MeV. Le flux de rayons X mous est augmenté plus rapidement.
- C) Étape de la décadence :** déclin rapide de quelques minutes, le flux de rayons X durs et rayons gamma ; tandis que les rayons X mous continuent à augmenter.

I.4.2.2. Classification des éruptions solaire

Les éruptions solaires sont classifiées en différentes catégories selon l'intensité de leur flux. Les différentes classes sont nommées A, B, C, M et X. Chaque classe correspond à une éruption solaire d'une intensité dix fois plus importante que la précédente. Les scientifiques classent les éruptions solaires selon l'intensité maximale de leur flux (luminosité des rayons X).

Les premières lettres (A, B et C) indiquent des petites éruptions solaires avec un peu de conséquences notables pour la Terre

A) Eruption de classe X :

Les éruptions solaires de classe X sont à grande échelle. Elles peuvent déclencher des interruptions radio autour du monde et des orages de radiation prolongée dans la haute atmosphère de la terre, pouvant conduire à la destruction des satellites. Elles ont une intensité de 10^{-4} W/m^2

B) Eruption de classe M :

Les éruptions de type M sont de taille moyenne, libérant 10% de l'énergie par rapport à la classe X. Elles provoquent généralement des coupures radio qui affectent les régions polaires de la terre.

C) Eruption de classe C :

Libérant 10 % de l'énergie par rapport à la classe M, ces éruptions sont petites avec peu de conséquence sur la terre [4].

I.4.3. Protubérances solaires (Filament solaire)

Une protubérance solaire est une structure visible dans l'atmosphère solaire, qui caractérise l'activité du soleil. La protubérance est une masse de gaz soulevée dans la couronne solaire sous l'influence de champs magnétiques.

I.4.4. Vent solaire

Le vent solaire est un plasma (gaz ionisé) composé principalement d'électrons et de protons (et de neutron), soit près d'un million de tonnes de matière par seconde dans le milieu interplanétaire que le soleil a constamment émis. Lorsque le soleil est actif, les éruptions produisent des éjections coronaires, ces éjections produisent des vents solaires intenses qui sont la source des aurores polaires sur terre.

Il existe deux types de vent solaire :

A) Vent lent variable à des latitudes plus basses, principalement autour du plan de l'équateur solaire. Il souffle radialement tout au long de la défraction à une vitesse moyenne de 400 km/s. On dit que le vent solaire est lourd s'il y a beaucoup d'atomes ionisés ; ses variations peuvent induire des phénomènes importants dans l'environnement de la terre.

B) Vent fort régulier aux latitudes les plus élevées, la vitesse du vent solaire varie entre 750 à 800 Km/s, à cause de la fuite du plasma précisément dans les trous coronaux. Le vent solaire interagit fortement avec la magnétosphère des planètes et il aide à nettoyer l'espace interplanétaire en rejetant des gaz et de la poussière hors du système solaire. Ce chaudron produit son énergie par fusion nucléaire grâce à l'énorme pression et température qui se retrouvent dans son cœur. En cas de chauffage suffisant d'un gaz, les électrons se détachent des atomes et se déplacent librement [5].

II. Terre

Dans une position unique du système solaire on trouve le troisième corps céleste qu'est la Terre (planète bleue), où 72% de sa surface est formée d'océans. C'est la seule planète qui abrite de la vie et située à une distance d'environ 150 millions de kilomètres du Soleil.

Le tableau suivant résume les caractéristiques les plus importantes de la terre :

Rayon équatorial	6 378,137 km
Rayon polaire	6356,752 km
Rayon moyenne volumétrique	6 371,008 km
Surface	510 067 420 km ²
Volume	1,083 21×10 ¹² km ³
Masse	5,973 6 x 10 ²⁴ kg
Masse volumique	≈ 5 515 kg/m ³
Gravité	9,806 m/s ²
Période de rotation (jour sidéral)	0,997 258 jours, ou 23,93419h
Vitesse de rotation à l'équateur	1 674,38 km/h
Inclinaison de l'axe	23,45°
Température à la surface	min -89.2°C, moyenne 15°C, max 56.7°C

II.1. Atmosphère terrestre

L'atmosphère est la couverture gazeuse qui entoure la Terre, ce qui confère le rôle de protéger la vie sur Terre. Elle se compose de 78,08 % d'azote, de 20,95 % d'oxygène, de 0,93 % d'argon, de 0,038 % de dioxyde de carbone et des traces d'autres gaz. Par effet de serre l'atmosphère absorbe le

Chapitre I : Interaction soleil- terre

rayonnement solaire ultraviolet, réchauffant ainsi sa surface, et réduisant les écarts de température entre le jour et la nuit.

La limite externe de l'atmosphère est définie comme la distance supposée où les molécules de gaz atmosphérique cessent de subir l'attraction terrestre et les effets de son champ magnétique. Elle varie en fonction de la latitude et du champ magnétique terrestre, et elle est continuellement déformée par le vent solaire. La limite où les effets atmosphériques deviennent notables durant la rentrée atmosphérique d'un objet est située à une altitude de 120 km.

Les différentes couches atmosphériques de la Terre sont :

II.1.1 Troposphère

La troposphère est la couche de l'atmosphère terrestre comprise entre la surface du globe et la stratosphère. La limite supérieure de la troposphère se situe à une altitude d'environ 8 à 15 kilomètres selon la latitude. La température diminue avec l'altitude, à peu près de 6,4 °C tous les 1 000 mètres. La troposphère est la couche où se produisent les phénomènes météorologiques (nuages, pluies, convection thermique, vents). Elle est plus épaisse à l'équateur qu'aux pôles ; de 13 à 16 km à l'équateur, et entre 0 et 7 à 8 km aux pôles, et elle contient 80 à 90 % de la masse totale de l'air et la quasi-totalité de la vapeur d'eau.

II.1.2 Stratosphère

La stratosphère est située entre 6 à 16 kilomètres d'altitude pour sa limite inférieure (troposphère) et à 50 kilomètres d'altitude pour sa limite supérieure (stratopause) par rapport à la surface de la Terre. La stratosphère est une zone où se situe une bonne partie de la couche d'ozone.

II.1.3 Mésosphère

La mésosphère est la couche de l'atmosphère terrestre comprise entre la stratosphère et la thermosphère, elle se situe à une altitude entre 50 km et 80 km. C'est une zone de transition entre la terre et l'espace. La température décroît jusqu'à -100 °C.

II.1.4 Thermosphère

La thermosphère est la couche de l'atmosphère terrestre comprise entre la mésosphère et l'exosphère. La mésopause (la limite inférieure) se situe à une altitude d'environ 95 km et la thermosphère (la limite supérieure) se situe entre 500 et 1 000 km. Dans cette couche la pression est faible, mais la température augmente avec l'altitude où elle peut atteindre plus de 1000°C.

II.1.5. Exosphère

L'exosphère est la couche la plus externe et la plus haute de l'atmosphère terrestre. Elle se situe au-dessus de la thermosphère, au-delà de 600 kilomètres à 5 000 km d'altitude. Sa densité est de l'ordre de 10^6 particules par centimètre cube ; la densité des particules est suffisamment faible pour que l'effet des collisions entre particules soit négligeable par rapport à l'effet de leur cinétique.

II.2. Magnétosphère terrestre

C'est l'espace entourant la terre au-delà des couches de l'atmosphère, entre 700 et 65 000 km de la surface. La pression du vent solaire comprime la partie de la magnétosphère terrestre est face au soleil, et étire la région de la magnétosphère située à l'arrière, à l'opposé du soleil

Cette zone appelée ceinture de Van Allen où se trouve le champ magnétique terrestre qui est constitué de deux parties de caractéristiques différentes :

- La première, la plus proche de la terre, est située entre 700 et 10 000 km d'altitude, elle est constituée principalement de protons à haute énergie.
- La seconde, constituée d'électrons à haute énergie, est située entre 13 000 et 65 000 km.

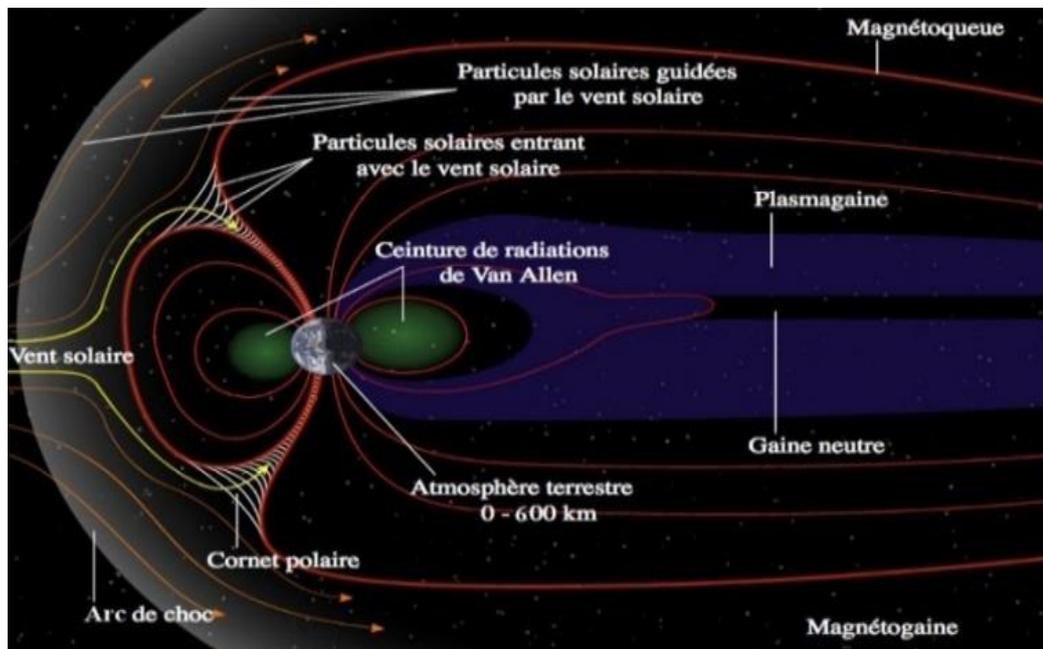


Figure 2 : Représentation schématique simplifiée de la magnétosphère terrestre

Le champ géomagnétique de la terre est probablement généré par des interactions entre le noyau interne et externe, riches en fer, qui créent une dynamo géante. Sans magnétosphère la planète serait directement touchée par des particules énergétiques solaires qui peuvent provoquer des aurores fortes dans des vastes régions autour des pôles magnétiques de la terre.

S'il y a un endroit mal protégé sur terre où le champ magnétique est considérablement réduit, dans cette zone polaire, le champ magnétique s'est inversé et le rayonnement solaire pénètre plus profondément dans la haute atmosphère.

La dernière inversion a eu lieu il y a 750 000 ans, de nombreux scientifiques pensent qu'on assiste actuellement à une nouvelle et brusque inversion qui aura des conséquences considérables sur la vie dans la terre. On verra de plus en plus d'aurores polaires dans des endroits où il n'y en avait pas avant.

III. Interaction Soleil-Terre

Les interactions entre le soleil et la terre sont divisées en trois types :

1) Interaction gravitationnelle

Le mouvement de la terre dans l'espace est régi par la masse du soleil, le flux de rayonnement reçu par la terre est perturbé par la présence des autres planètes du système solaire.

2) Interaction électromagnétique

Le rayonnement du soleil est la source quasi unique de toutes les chaînes énergétiques de l'atmosphère.

3) Interaction magnétique

Le champ magnétique du soleil interagit fortement avec celui de la terre, et s'étend loin dans le système solaire

III.1. Influence du soleil sur terre

Le soleil a une grande influence sur la terre ; le climat, les saisons, les aurores,...sont tous vient de la relation entre la terre et l'activité solaire.

III.1.1. Climat

L'activité solaire et l'effet de serre sont les principales causes des fluctuations du réchauffement planétaire, le soleil fournit de l'énergie qui pénètre dans l'environnement terrestre. Le climat est entièrement tributaire du soleil, dont une infime variation suffirait à le bouleverser.

Le rayonnement du soleil réchauffe la terre et engendre une circulation atmosphérique à grande échelle qui génère les systèmes météorologiques. Lorsque le soleil est au maximum de son activité, son champ magnétique augmente, ce qui a pour conséquence de détourner plus de rayons cosmiques. Ainsi, moins de particules pénètrent, depuis l'espace, dans l'atmosphère terrestre.

III.1.2. Saisons

La trajectoire de la terre autour du soleil et l'inclinaison de son axe de rotation sont la cause de l'évolution des saisons. Plus les rayons du soleil tombent perpendiculairement à la surface, plus il fait chaud, et plus les rayons tombent obliquement, plus il fait froid.

III.1.3. Aurores Polaires

Le soleil émet en permanence un vent de particules chargées électriquement (vent solaire), qui peut perturber le champ magnétique de la terre et provoquer des orages géomagnétiques qui se manifestent par des aurores polaires. La plupart des particules du vent solaire sont déviées par le champ magnétique et contournent la magnétosphère. Ces particules chargées entrent en collision avec des molécules existantes (excitent ou ionisent des atomes) lorsqu'elles traversent la haute atmosphère (l'ionosphère), puis les atomes de cette dernière (oxygène, azote) émettent des photons dans le visible et dans l'ultra-violet ce qui donne naissance aux aurores polaires [6].

III.2. Aurores boréales

C'est l'un des spectacles les plus agréables de la planète. Les aurores boréales ne se produisent que dans les endroits où les degrés de latitude sont les plus approchés, elles apparaissent dans la couche la plus élevée de l'atmosphère terrestre à environ 100 km d'altitude. Ce sont des particules chargées qui entrent en contact avec les électrons atmosphériques. L'aurore boréale se forme aussi durant la journée, contrairement au fait qu'ils ne pourraient l'être que la nuit, car la lumière diffusée par la corrélation entre les particules chargées et l'atmosphère est très faible.

III.2.1 Origine des aurores polaires

Les flamboiements solaires émettent des particules chargées en contact avec l'atmosphère de la terre. Ces particules chargées sont guidées par le champ magnétique du soleil se déplace avec une grande vitesse vers la terre. Les trajectoires de ces particules d'expulsion traversent la magnétosphère sans atteindre la surface terrestre, et atteignent le pôle Nord ou le pôle Sud selon leur charge électrique où le champ géomagnétique est plus faible, ce qui correspond à une zone appelée zone annulaire, entre 65 et 75° de degré magnétique de latitude.

Le nord géographique ne correspond pas au nord magnétique ; il n'est pas fixe puisque il bouge de quarantaines de kilomètres chaque année [7].

III.2.2. Aurores boréales de basses latitudes

III.2.2.1 Couleurs des aurores boréales en fonction des atomes et des altitudes :

Les aurores polaires sont dues à de nombreux photons (lumière) émis dans la même période. Leurs couleurs varient en fonction de l'altitude à laquelle la collision entre le vent solaire et les particules de l'atmosphère a eu lieu. Ils diffèrent également selon la nature des particules, lorsque les particules du vent solaire entrent en contact avec des molécules de diazote (N_2) ou d'oxygène.

A) Vert

Est dû à l'oxygène nucléaire de la raie d'émission à 557 nm situé à une altitude entre 100 et 300 kms. C'est la couleur prépondérante de la majorité des aurores boréales, parce que l'œil humain est plus sensible au vert.

B) Rouge

C'est la deuxième couleur la plus visible dans la plupart des aurores, en raison de la raie d'émission à 630 nm de l'oxygène atomique. Les aubes rouges s'ensuivent la plupart du temps des électrons de faible énergie réagissant avec l'oxygène nucléaire à la haute altitude (Au-dessus de 300Km), ce qui peut se produire dans les degrés plus bas (de latitude inférieure à 50°). Quand le rouge est visible à basse altitude, c'est dû à l'émission des bandes de l'azote moléculaire N_2 . Pendant les tempêtes géomagnétiques extrêmement puissantes. Les électrons auroraux qui entrent dans l'atmosphère de degrés bas de latitude n'ont pas en général assez d'énergie pour atteindre l'azote moléculaire, c'est pour cela que les aubes de degrés bas de latitude sont presque rouges toujours.

C) Pourpre (violet / rose)

C'est la couleur prépondérante à l'altitude très basse moins de 80 kms. Une aube relativement puissante est nécessaire pour que les électrons réussissent à descendre dans les basses altitudes. Cette couleur est due aux bandes trouvées dans le rouge et surtout le pourpre d'azote ionisé moléculaire N_2^+ .

D) Bleu

L'aube bleue peut être observée à basse altitude au-dessous de 100 km, elle est due à des bandes d'émission relativement faibles d'azote moléculaire N_2 .



Figure 3: Différentes couleurs visibles dans les aurores polaires.

III.2.3 Formes des aurores polaires

Il existe différents types d'aurores boréales ; chacun a une façon unique de forme.

1. Rideau

Les aurores boréales sont lumineuses et apparaissent à la verticale ; ils forment des spirales comportes de lumière.



2. Arc :

L'aurore boréale est constituée d'un ou plusieurs arcs, qui s'étendent d'un bout à l'autre de l'horizon.

L'aube aura souvent cette forme avant minuit.



3. Tache

Leur zone de diffusion est relativement petite, après un sous-orage ces aurores peuvent se déplacer et changer de luminosité.



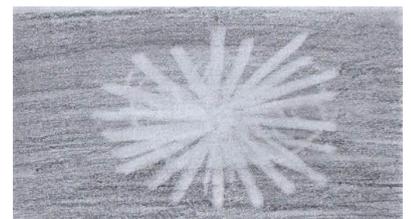
4. Bande

Les bandes ressemblent à des fragments d'arcs qui peuvent être soit calmes, en mouvement, ou actives. C'est la phase active de l'aurore boréale.



5. La couronne

La lumière semble être projetée en faisceaux dans toutes les directions, lorsqu'il est vu directement en bas.



Référence

- [1] Lavraud Binoit, "Ejections de masse coronales : propagation et interaction avec la magnétosphère terrestre". These Doctorat, Université de Toulouse (UPS), paris; 2013
- [2] ROUDAUT François, STOFFEL Jean-François, BLAY, Michel, et al., "Le Soleil à la Renaissance et à l'âge classique". Revue des Questions Scientifiques, 189, no 4, 369-370, 2018.
- [3] BOND Peter, "L'exploration du système solaire", De Boeck Supérieur, Paris, 2014.
- [4] CANOU, Aurélien. *Caractérisation de l'Environnement Magnétique de la Couronne Solaire*, Thèse de Doctorat, Ecole Polytechnique France, 2011.
- [5] Boumelit.Z.L., "activité solaire,vent solaire et géomagnétisme durant les cycles solaires". thèse doctorat , faculté des sciences de la terre, Géographie et Aménagement du territoire, paris, 2015.
- [6] Jean Claude Merlin, "Comment va la terre, Climat et réchauffement", Société des écrivains, Paris, 2013
- [7] Regno, David Del, "Phénomène naturel spectaculaire, Les aurores polaires", la vallée heureuse toulouse ,2022.

Introduction

Ce chapitre comprend des rappels sur la notion de transformée de Fourier (FT), de la transformation de Fourier discrète et rapide (DFT et FFT), des séries chronologiques, de la densité spectrale de puissance, du fenêtrage, et du coefficient de corrélation de Pearson.

Toutes ces notions et techniques seront utilisées dans le dernier chapitre pour analyser les enregistrements auroraux, et qui sont présentés sous forme de séries chronologiques.

I. Série chronologique (Temporelle)

La série chronologique est une suite d'observation d'une quantité physique ayant été faite à un intervalle de temps constant (jours, mois, années). Mathématiquement, la série chronologique est un ensemble de valeurs numériques représentée par une fonction $y = f(t)$.

Dans le cadre de notre travail on s'intéresse à l'observation des aurores boréales au cours du temps, dans les zones de basse l'attitude, plus précisément en Corée, dans le but d'expliquer et analyser ce phénomène naturel et éventuellement le prévoir dans le futur.

I.1. Composants d'une série chronologique [1]

La série chronologique est divisée en cinq composantes suivantes :

- 1- Tendance (trend) **T**: Représente le comportement moyen de la série ; l'allure de l'ensemble des observations. C'est l'évolution à long terme de la série étudiée, c.-à-d. que c'est une composante de longue durée (années).
- 2- Composante saisonnière **S** : de courte durée, correspond au phénomène qui se répète régulièrement (aux fluctuations annuelles).
- 3- Composante cyclique **C** : intermédiaire entre les deux composantes précédentes. Il s'agit d'un phénomène se répétant sur des durées qui ne sont pas fixes et plus longues.
- 4- Composante accidentelle (aléatoire) **A** : accidentelle souvent imprévisible elle est due à des conditions qui peuvent notamment intervenir.
- 5- Composante résiduelle : correspond à des fluctuations irrégulières de faible intensité mais de nature aléatoire.

Les principales étapes de traitement d'une série chronologique sont les suivantes :

1. Correction des données : il est important de traiter les données brutes.
2. Observation de la série : c'est de tracer la courbe des données après une vérification détaillée. Elle permet la modélisation de la série chronologique et de déterminer la tendance.
3. Modélisation (avec un nombre fini de paramètres)
4. Analyse de la série à partir de ses composantes
5. Diagnostic du modèle (ajustement du modèle)
6. Prédiction (prévision)

I.2. Analyse d'une série chronologique

L'analyse d'une série chronologique nécessite des étapes spécifiques permettant de désaisonnaliser sa représentation graphique. La méthode est comme suit :

- 1- Déterminer le trend
- 2- Etablir, à la même date, un rapport de chacune des valeurs observées de la série initiale et de la valeur calculée à partir du trend.
- 3- Calculer la moyenne arithmétique ou la médiane des coefficients saisonniers utilisés pour éliminer les variations saisonnières de la série initiale.

II. Transformation de Fourier et Spectre de puissance

II.1. Transformation de Fourier

La transformée de Fourier est une transformation d'un espace d'entrée (espace-temps) à un autre espace (espace fréquentiel).

$$TF[x(t)] = X(v) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-i2\pi vt} dt \quad (1)$$

La transformée de Fourier rapide (FFT, DFT) est calculée selon un algorithme afin de réduire le nombre d'opérations, et en particulier le nombre de multiplications à effectuer.

Il y a beaucoup d'algorithmes de FFT, le plus connu est probablement celui de Cooley-Tukey [2]. Il existe deux versions de l'algorithme :

- 1- FFT avec entrelacement temporel
- 2- FFT avec entrelacement fréquentiel

Exemple : Spectre d'une fonction sinusoïdale

$$x(t) = \cos(2\pi v_0 t) \quad (2)$$

Formule d'Euler :

$$e^{iy} = \cos(y) + i \sin(y) \quad (3)$$

En utilisant la formule d'Euler

$$x(t) = \frac{e^{i2\pi v_0 t} + e^{-i2\pi v_0 t}}{2} \quad (4)$$

Transformation de Fourier

$$x(v) = \int_{-\infty}^{+\infty} \cos(2\pi v_0 t) e^{-i2\pi vt} dt \quad (5)$$

$$x(v) = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-i2\pi t(v_0 - v)} dt + \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-i2\pi t(v_0 + v)} dt \quad (6)$$

En utilisant les deux propriétés suivantes de la fonction delta :

$$\delta(x) = \frac{1}{2\pi} \int e^{-ikx} dk \quad (7)$$

$$\delta(ax) = \frac{1}{a} \delta(x) \quad (8)$$

alors,

$$x(v) = \frac{1}{2} \left(2\pi \delta(2\pi(v_0 - v)) + 2\pi \delta(2\pi(v_0 + v)) \right) \quad (9)$$

$$x(v) = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2\pi} (2\pi\delta(v_0 - v) + 2\pi\delta(v_0 + v)) \right) \quad (10)$$

donc,

$$x(v) = \frac{1}{2} [\delta(v_0 - v) + \delta(v_0 + v)] \quad (11)$$

En résumé, on voit bien qu'avec la transformation de Fourier on retrouve la fréquence v_0 de notre signal initial.

II.2. Transformée de Fourier discrète (DFT)

Pour un signal $x(n)$ discret de N échantillon et de durée finie

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-\frac{i2\pi nk}{N}} \quad (12)$$

La transformée de Fourier Rapide (FFT) est un algorithmique qui permet de calculer la DFT [2].

II.3. Densité spectrale de puissance

Soit $x(t)$ un signal et X sa transformée de Fourier

$$X(v) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-i2\pi vt} dt \quad (13)$$

On définit la densité spectrale de puissance (DSP) comme étant le carré du module de la transformée de Fourier (FT) divisée par le temps d'intégration T .

La densité spectrale de puissance représente la répartition de la puissance d'un signal suivant les fréquences, et elle donnée par la formule

$$P_x = \frac{|X|^2}{T} \quad (14)$$

On voit bien que la densité spectrale est estimée par le module de la FT du signal à analyser.

II.4. Périodogramme

Pour un signal discret $x(n)$ et N nombre de données, une estimation simple de densité spectrale est basée sur le périodogramme.

$$S(v) = \frac{1}{N} \left| \sum_{n=0}^{N-1} s(x) e^{-i2\pi v n} \right|^2 = \frac{1}{N} |X(v)|^2 \quad (15)$$

Tel que v la fréquence du signal.

Le périodogramme est un estimateur de la densité spectrale de puissance basé sur la Transformée de Fourier Discrète (DFT).

III. Fenêtrage [3]

Lorsqu'un signal est constitué d'un nombre entier de période qui couvre entièrement l'intervalle de temps, la FFT s'avère efficace. Cependant, dans le cas où le signal n'est pas constitué d'un nombre entier de périodes (signal tronqué), cela induit des erreurs dans les coefficients de fourrier calculés. La FFT produit dans ce cas des fréquences autres que celles contenues dans le signal ; on appelle cet effet "fuite spectrale" (leakage). On peut minimiser cet effet avec la technique de fenêtrage.

Le théorème de Wiener–Khinchine énonce que la densité spectrale de puissance est analogue à la transformée de Fourier de la fonction d'auto-corrélation correspondante. Il est donc possible d'estimer la densité de puissance spectrale par la relation

$$S_{xx}(v) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} r_{xx} e^{-i2\pi v n} \quad (16)$$

Ici, r_{xx} représente la fonction d'auto-corrélation.

L'estimateur non-biaisé de la fonction d'auto-corrélation est donnée par l'expression

$$r_{xx}(n) = \frac{1}{N - |n|} \sum_{m=0}^{N-|n|-1} x(m)x(m + n) \quad (17)$$

En introduisant une fonction fenêtre $w(n)$, la densité spectrale s'écrit

$$S_{xx}(v) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} r_{xx}(n)w(n)e^{-i2\pi vn} \quad (18)$$

Les fenêtres sont utilisées pour réduire les fuites spectrales. Cependant, il existe plusieurs types de fenêtres.

III.1. Fenêtre rectangulaire

Une simple forme d'une boîte conduit généralement à des fuites dues à des discontinuités ; la fenêtre rectangulaire est la fenêtre la plus simple équivalente au remplacement de toutes les valeurs sauf N d'une séquence de données par des zéros, ce qui donne :

$$W(n) = 1 \text{ pour } 0 \leq n \leq N - 1 \text{ et zéro ailleurs}$$

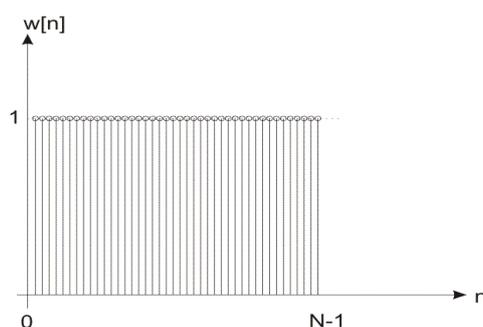


Figure 1. Exemple d'une fenêtre rectangulaire

III.2. Fenêtre Welch

La fenêtre Welch est une fenêtre polynomiale constituée d'une seule section parabolique ; la définition du polynôme quadratique attribue une valeur de zéro aux échantillons situés juste à l'extérieur de l'étendue de la fenêtre

$$W[n] = 1 - \left(\frac{n - \frac{N}{2}}{\frac{N}{2}} \right)^2, \quad 0 \leq n \leq N \quad (19)$$

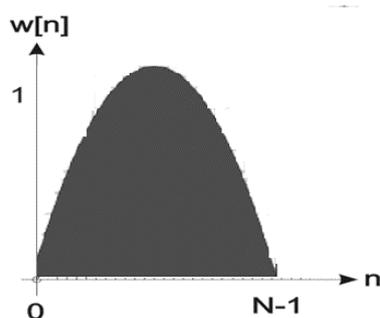


Figure 2. Exemple d'une fenêtre de Welch

III.3. Fenêtre triangulaire

La fenêtre triangulaire est la fenêtre de 2^{ème} ordre, la forme peut être vue comme la convolution (opération mathématique qui prend deux signaux en entrée (u1 et u2) et qui renvoie un nouveau signal s) de deux fenêtres rectangulaires de largeur $L/2$. La transformée de Fourier du résultat est le carré des valeurs de la transformation de fenêtre rectangulaire demi-largeur :

$$W(n) = 1 - \left| \frac{n - \frac{N}{2}}{\frac{L}{2}} \right| \quad (20)$$

Les coefficients de fenêtre triangulaire peuvent également être exprimés :

$$W(n) = \begin{cases} \frac{2n}{N-1} & 0 \leq n \leq \frac{N-1}{2} \\ 2 - \frac{2n}{N-1} & \frac{N+1}{2} \leq n \leq N-1 \end{cases} \quad (21)$$

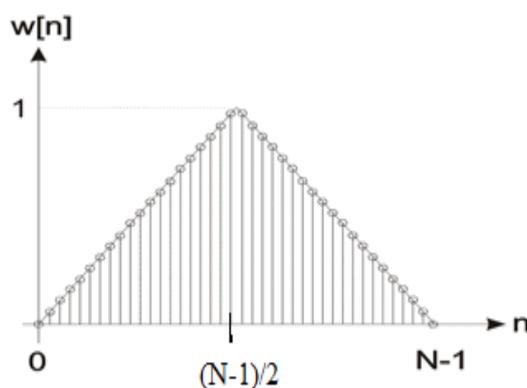


Figure 3. Exemple d'une fenêtre triangulaire

III.4. Fenêtre Bartlett

La fenêtre Bartlett est une simple fenêtre triangulaire, avec un lobe principal étroit et des lobes latéraux hauts

$$w(n) = \frac{2}{N-1} \left(\frac{N-1}{2} - \left| n - \frac{N-1}{2} \right| \right), 0 \leq n \leq N-1 \quad (22)$$

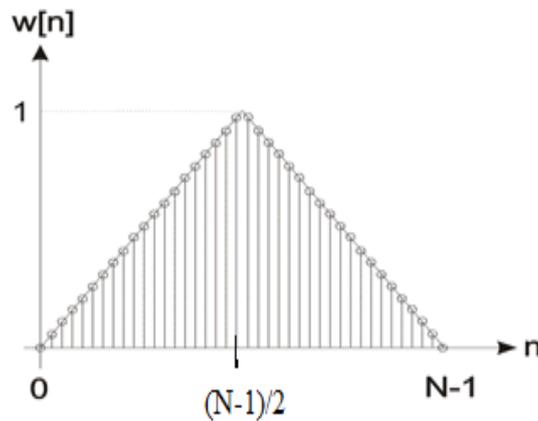


Figure 4. Exemple d'une fenêtre de Bartlett

III.5. Fenêtre Hanning

La fenêtre Hanning est la fonction de fenêtre qui fournit une sélection pondérée d'une partie d'une forme d'onde temporelle pour l'analyse FFT.

Avec une équation

$$w(n) = \frac{1}{2} \left(1 - \cos \left(\frac{2\pi n}{N-1} \right) \right), 0 \leq n \leq N-1 \quad (23)$$

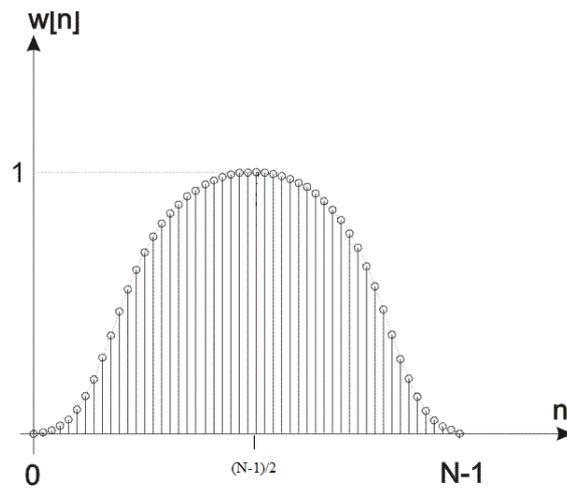


Figure 5. Exemple d'une fenêtre de Hann

III.6. Fenêtre Hamming

La fenêtre Hamming est l'une des fenêtres les plus populaires et les plus utilisées ; la fenêtre de Hamming appartient à une classe de fonctions cosinus généralisées

$$w(n) = 0.54 - 0.46 \left(1 - \cos \left(\frac{2\pi n}{(N-1)} \right) \right); 0 \leq n \leq N - 1 \quad (24)$$

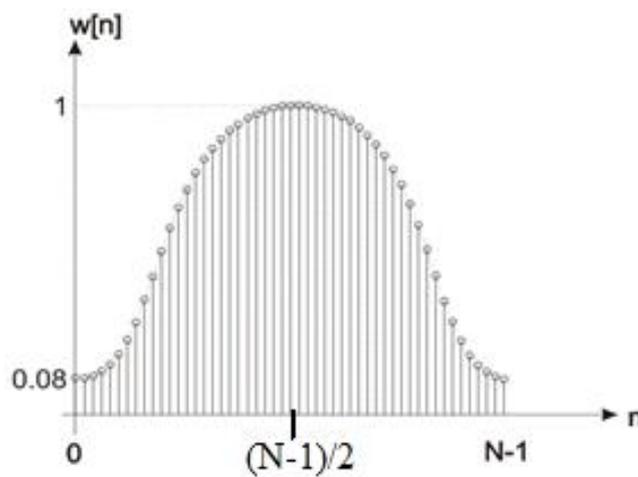


Figure 6. Exemple d'une fenêtre de Hamming

III.7. Fenêtre Blackman

La fenêtre Blackman est considérée comme la fenêtre la plus couramment utilisée et la plus populaire. L'atténuation relativement élevée rend cette fenêtre très pratique pour presque toutes les applications.

Les coefficients de la fenêtre de Blackman sont exprimés comme suit :

$$w(n) = 0.42 - 0.5 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right) + 0.08 \cos\left(\frac{4\pi n}{N-1}\right), 0 \leq n \leq N-1 \quad (25)$$

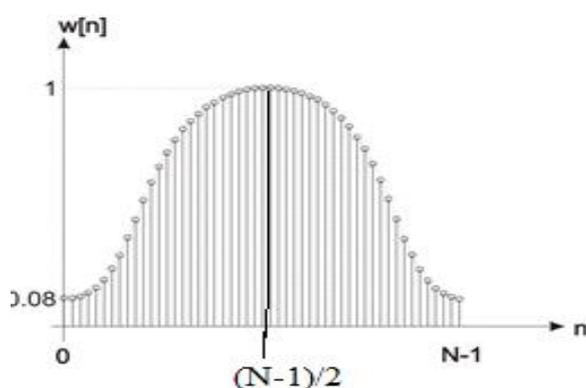
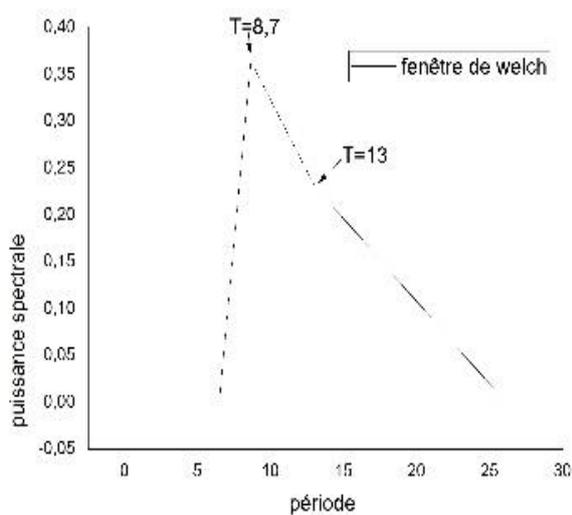


Figure 7. Exemple d'une fenêtre de Blackman

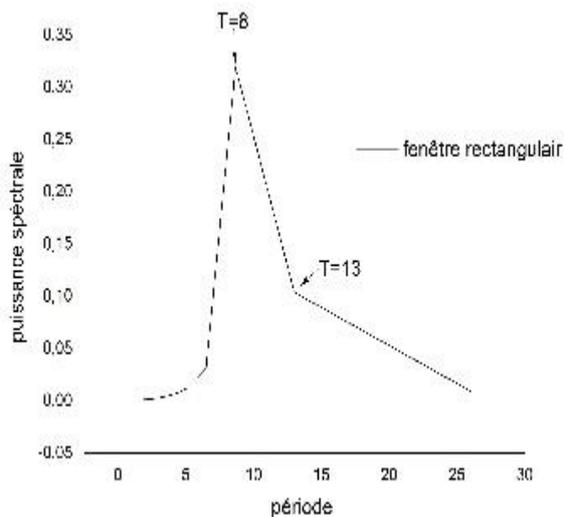
Exemple : Fenêtrage et fuite spectrale

Pour voir l'effet du fenêtrage sur le spectre d'un signal, considérons la fonction $x(t) = \cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right)$ de période $T=10$, avec t allant de 0 à $2.6T$. La Figure 8 montre les spectres de puissance obtenus avec différentes fenêtres. On voit bien que la fenêtre rectangulaire donne le résultat le plus éloigné de la valeur réelle. Il est donc clair que le fenêtrage réduit l'effet de la fuite spectrale.

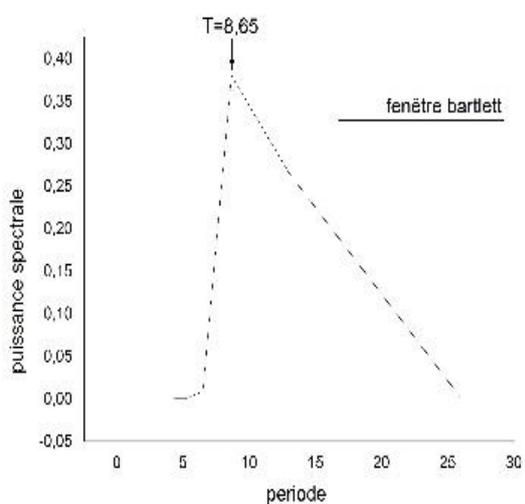
Chapitre II : Données et méthodes d'analyses



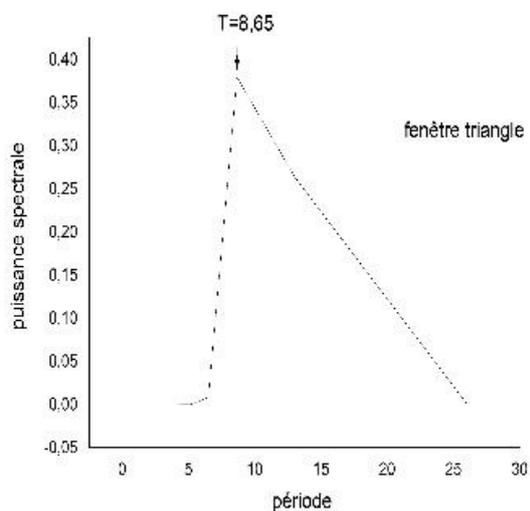
Fenêtre Welch



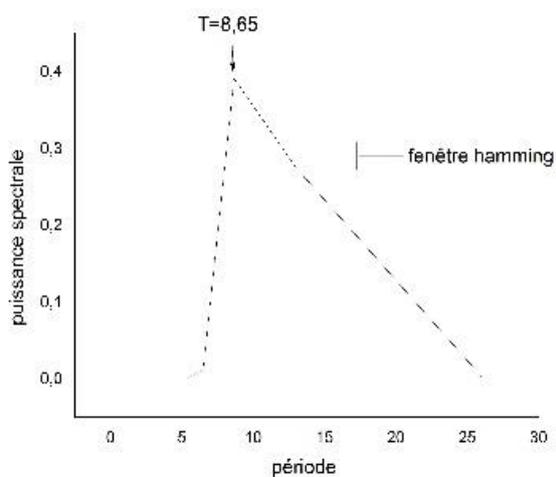
Fenêtre Rectangulaire



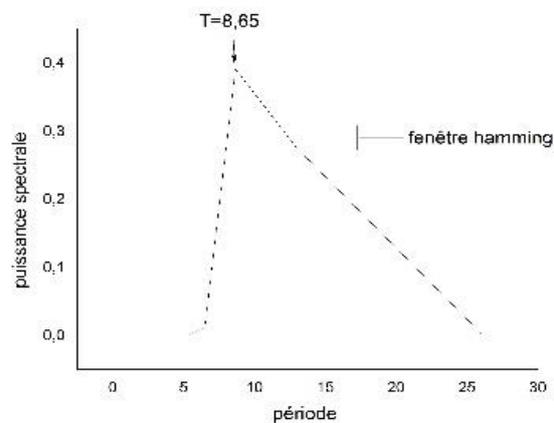
Fenêtre Bartlett



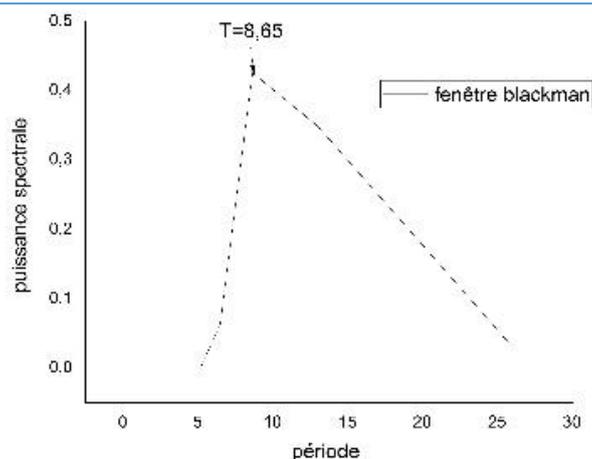
Fenêtre Triangulaire



Fenêtre Hamming



Fenêtre Hanning



Fenêtre Blackman

Figure 8. Spectres de puissance obtenus avec différentes fenêtres

IV. Coefficient de corrélation

Le coefficient de corrélation est une mesure qui permet de quantifier l'intensité de la relation linéaire entre deux variables. Le coefficient est noté r , et sa valeur est comprise entre -1 et $+1$. Pour deux variables (X, Y) , la formule estime la distance de chaque point de données à partir de la moyenne de la variable et l'utilise pour indiquer la mesure dans laquelle la relation entre les variables suit une ligne imaginaire tracée à travers les données.

Pour deux variables aléatoires données, le coefficient de corrélation de Pearson est défini par la covariance des deux variables divisée par le produit de leurs écarts types :

$$r_{x,y} = \frac{cov(x,y)}{\sigma_x \sigma_y} \quad (26)$$

Où,

Cov : covariance

σ_x : écarte-type de X

σ_y : écarte-type de Y

Sachant que la covariance peut être exprimée en utilisant l'espérance, comme suit :

$$Cov(X, Y) = E [(x - u_x)(x - u_y)] \quad (27)$$

La formule de $r_{x,y}$ devient :

$$r_{x,y} = \frac{E[(x-u_x)(x-u_y)]}{\sigma_x \sigma_y} \quad (28)$$

u_x et u_y sont les moyennes de X et Y.

E : est l'espérance

Une estimation du coefficient de corrélation est donnée par l'expression :

$$r_{x,y} = \frac{\sum_{i=0}^{i=N} [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=0}^{i=N} (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=0}^{i=N} (y_i - \bar{y})^2}} \quad (29)$$

où,

\sum : une sommation

x_i : nombre des valeur x.

y_i : nombre des valeur y.

\bar{x} : Valeur moyenne de x.

\bar{y} : valeur moyenne de y.

Enfin, il est important d noter que la corrélation ne s'effectue que sur deux variables et ne donne aucune information sur les relations possibles avec d'autres données. De plus, ce type d'analyse ne permet pas de repérer les valeurs aberrantes dans les données et ne peut pas trouver les relations non-linéaires [4].

Références

- [1] DODGE Yadolah, "Statistique : Dictionnaire encyclopédique, 'Série chronologique'", Springer, p. 471-474, 2007
- [2] GODEMENT Roger, "Analyse mathématique : Calcul différentiel et intégral, séries de Fourier, fonctions holomorphes", Springer, 2003.
- [3] Mallat Stéphan , "une exploration des signaux en ondelettes" , école polytechnique, paris, 2001.
- [4] Garren, Steven T, "Estimation de vraisemblance maximale du coefficient de corrélation dans un modèle normal bivarié, avec des données manquantes", Statistiques et lettres de probabilité, 15 juin 1998, vol 38, no 3,p. 281–288.

Introduction

Durant un cycle de 11.2 ans, en moyenne, le soleil connaît une activité maximale et minimale, cette variation n'est pas sans influence sur notre atmosphère. Pour suivre l'évolution de cette activité à long terme, c'est-à-dire à l'échelle des siècles, on étudie la variation de certains indices direct ou indirect [1]. Voici la liste de ces principaux indices :

- L'abondance des radio-isotopes cosmogéniques ^{10}Be et ^{14}C . Cette variation est due à la modulation de l'intensité des rayons cosmiques au cours du cycle de 11 ans.
- La variation du nombre de taches solaires est un indice direct de l'activité solaire, et joue, par conséquent, un rôle central. D'ailleurs, l'indice relatif des taches est disponible depuis 1700 en valeurs annuelles, depuis 1750 en valeurs mensuelles et depuis 1849 en valeurs quotidiennes, sans interruption.

Enfin, on peut rajouter un dernier indice, celui qui nous intéresse le plus dans cet article ; Il s'agit de la variation de la moyenne annuelle d'aurores boréales de moyennes et des basses latitudes observées.

Ainsi, l'historique de l'observation des aurores boréales, notamment celles observées à de basses latitudes, devrait nous permettre de suivre l'évolution de l'activité solaire. Cependant, ce genre d'informations est très rare, et on ne peut les retrouver que dans les anciennes chroniques.

Le qualificatif « basse latitude » demeure toujours ambigu. Toutefois, dans ce mémoire, nous considérons les aurores qui sont apparues à des latitudes inférieures à 45° . C'est le cas, notamment, des aurores observées en Corée.

Dans le présent chapitre, nous avons effectué une analyse spectrale sur l'archive aurorale de la Corée ancienne (de 1000 à 1800 J.C), présentée sous forme de série chronologique (voir Figures 1, 2, et 3), et publiées récemment par Wang et al. en 2021 [2]. L'objectif est de déceler les différentes oscillations en utilisant différents types de fenêtres [3].

I. Analyse de la série chronologique globale et le cycle de Suess

La série chronologique de l'ensemble des observations est représentée par la courbe de la Figure 1, et sous forme d'histogramme sur la Figure (2, 3). Le spectre de puissance montre deux périodes importantes, l'une de moyen terme à 58 ans, et l'autre de long terme à 205 ans qui correspond probablement au cycle de Suess [4,5] (Voir Fig.4). Ce dernier apparait dans les enregistrements des radio-isotopes cosmogoniques ^{14}C et ^{10}Be [6].

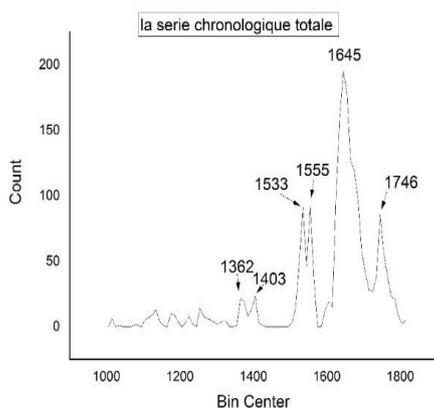


Figure 1 : Variation de la série chronologique de 1015 à 1814.

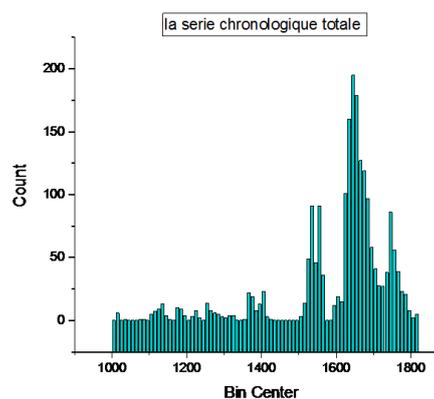


Figure 2 : Série chronologique sous forme d'histogramme.

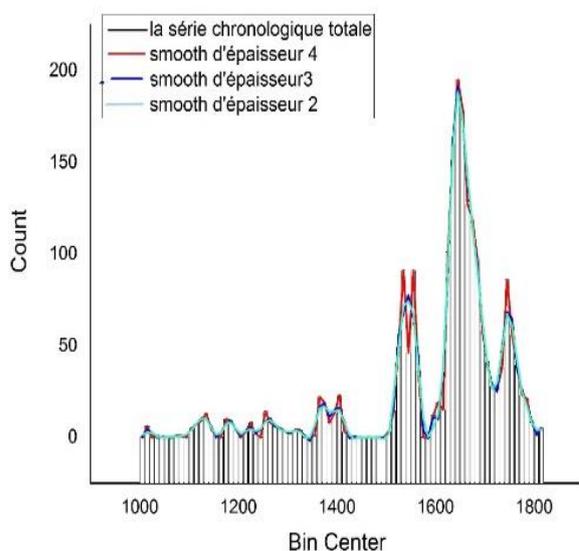


Figure 3 : Série chronologique totale lissée.

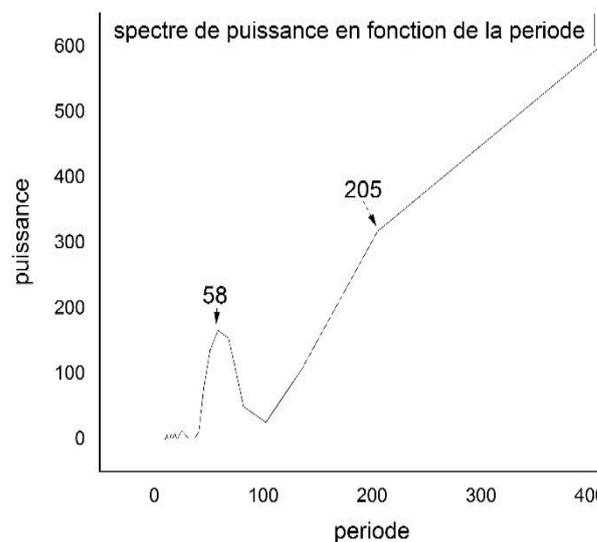


Figure 4 : Spectre de puissance pour la série chronologique totale.

II. Analyse par intervalle

La série Chronologique est partagée en trois différentes périodes : Premier intervalle allant de 1000 à 1300 J-C, deuxième intervalle de 1300 à 1600, et le troisième intervalle de 1300 à 1900.

1- Premier intervalle (1000-1300)

La série chronologique des observations effectuées entre 1000 à 1300 est représentée dans les figures (5, 6, 7). Les spectres de cette série, en utilisant différents types de fenêtres, sont représentées dans la Figure 8. Cela nous a permis de déceler plusieurs oscillations :

- Une période de 22.5 ± 1.5 ans, qui correspond probablement au cycle magnétique solaire de Hale [7]. En effet, la polarité du champ magnétique solaire s'inverse tout les 11 ans, et de ce fait, un cycle magnétique complet s'effectue tout les 22 ans. Cette période n'apparaît pas avec la fenêtre de Blackman.
- Une période de 32.5 ± 0.5 ans, dont l'origine n'est pas encore clair et qui n'apparaît pas dans les indicateurs de l'activité solaire, pourrait être d'origine climatique. En effet, les observations à l'œil nu, réalisées en Corée, sont modulées par les conditions météorologiques. Cette période n'apparaît pas avec les fenêtres rectangulaire et de Blackman.
- La fenêtre Blackman fait apparaître deux périodes différentes des autres, de 45 et de 57 ans, et qui n'apparaissent pas dans les indicateurs de l'activité solaire.
- La fenêtre rectangulaire fait apparaître deux périodes supplémentaires de 37 et 75 ans. Cette dernière est de même ordre que le cycle de Gleissberg [8], qui apparaît dans la variation en amplitude des cycle de taches solaires.

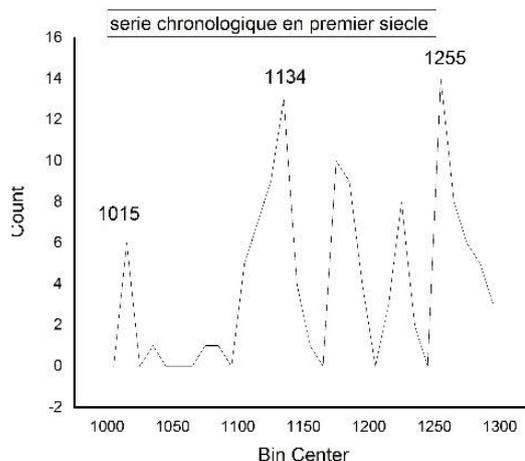


Figure 5 Variation des observations de 1000 à 1300

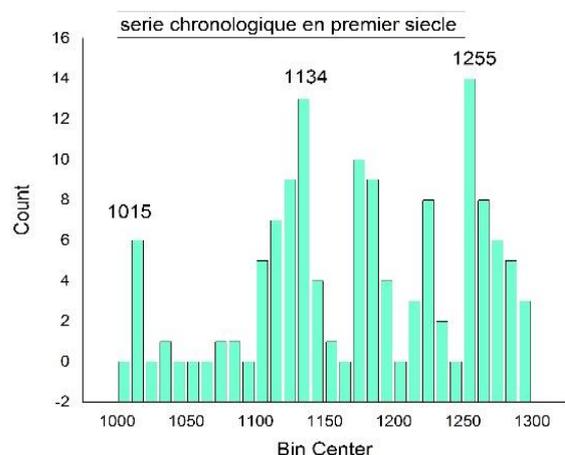


Figure 6 Série chronologique sous forme histogramme

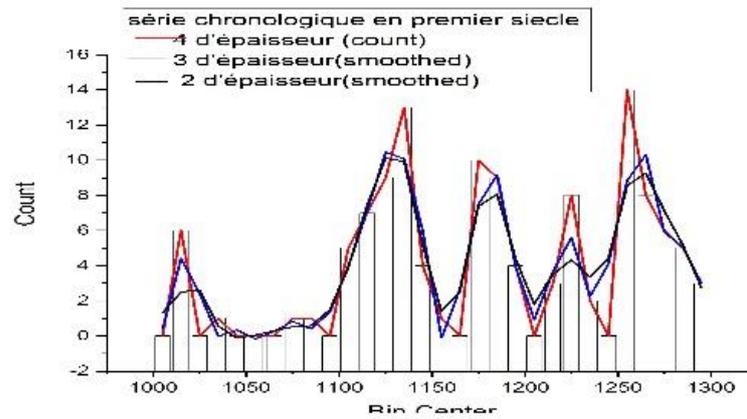
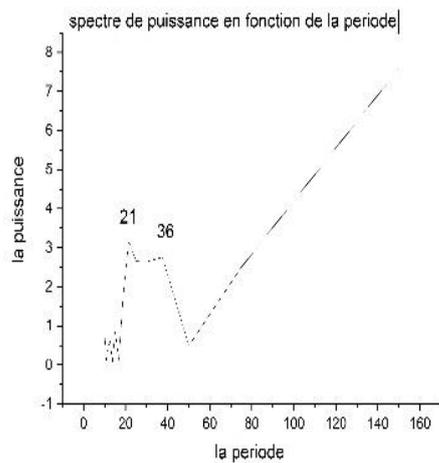
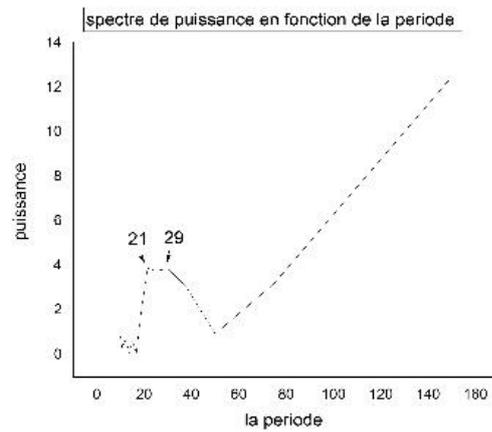


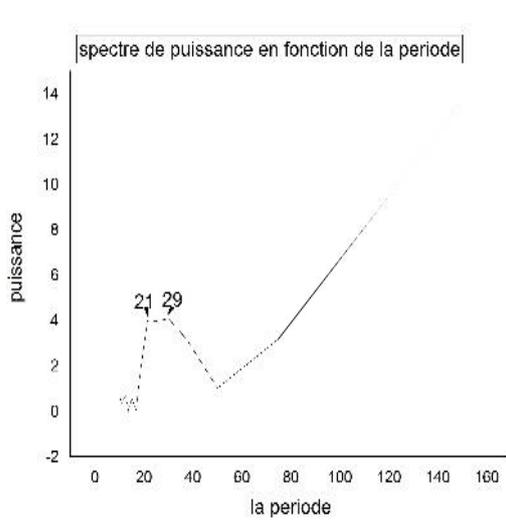
Figure 7 Variation lissée des observations



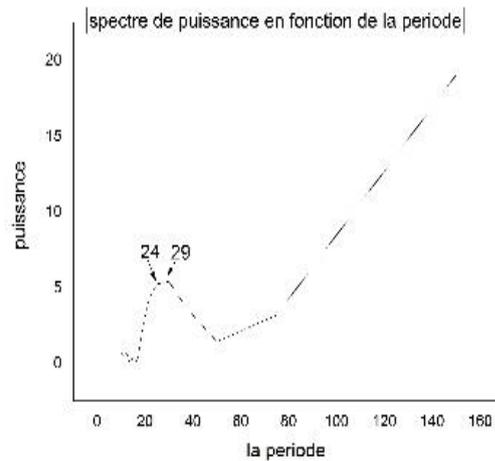
(a) Fenêtre welch



(b) Fenêtre triangle



(c) Fenêtre Bartlett



(d) Fenêtre Hanning

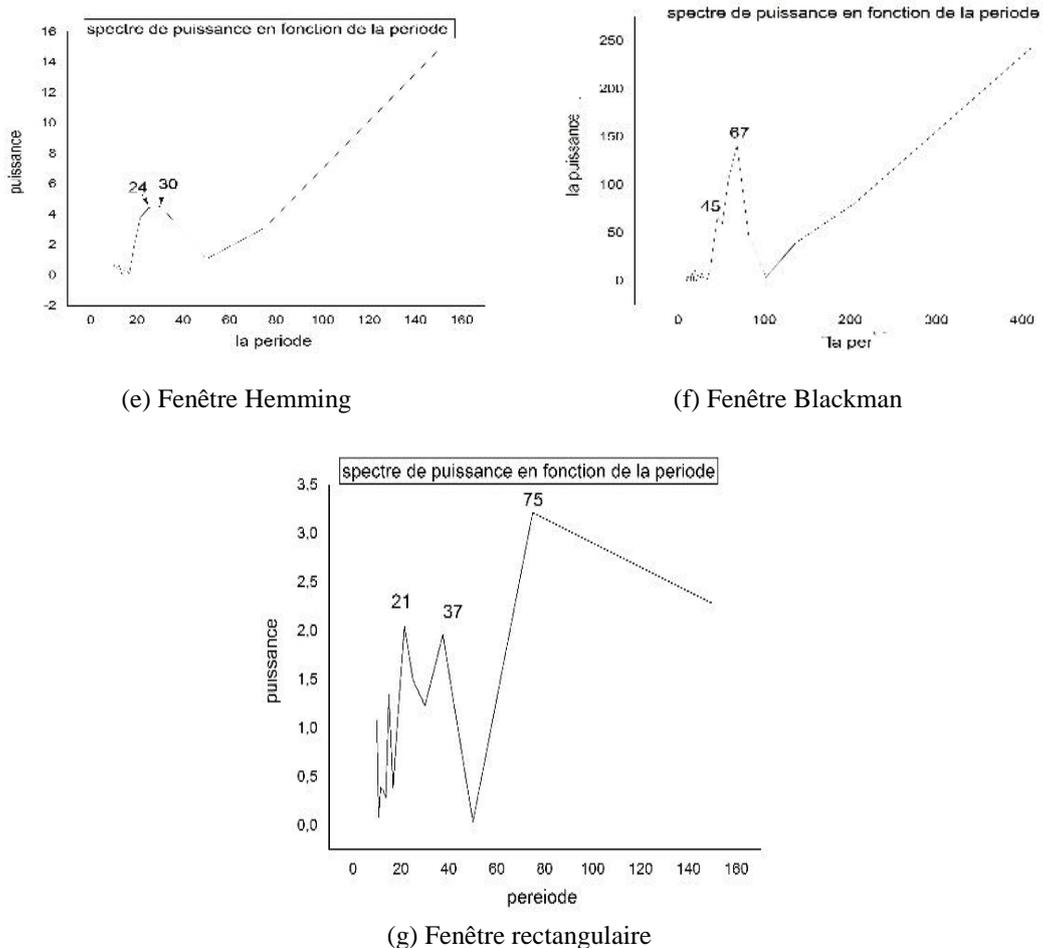


Figure 8 Spectre de la serie chronologique allant de 1000 à 1300 en utilisant differents types de fenêtres.

2- Deuxième intervalle (1300-1600)

La série chronologique des observations effectuées entre 1300 à 1600 est représentée dans les figures (9, 10, 11), les spectres sont représentés dans la Figure 12. Cela nous a permis de remarquer deux périodes importantes :

- Une période 38.5 ± 0.5 ans, qui n'apparaît pas dans les autres indicateurs de l'activité solaire. Son origine est probablement climatique.
- Une période de 77 ans qui apparaît avec la même valeur pour toutes les fenêtres. Celle-ci correspond probablement au fameux cycle de Gleissberg [8].

Chapitre III : Aurores boréales de basses latitudes observées en Corée

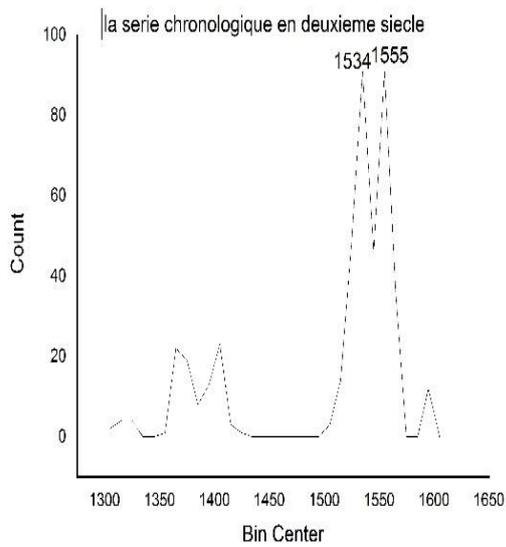


Figure 9 Variations des observations de 1300 à 1600

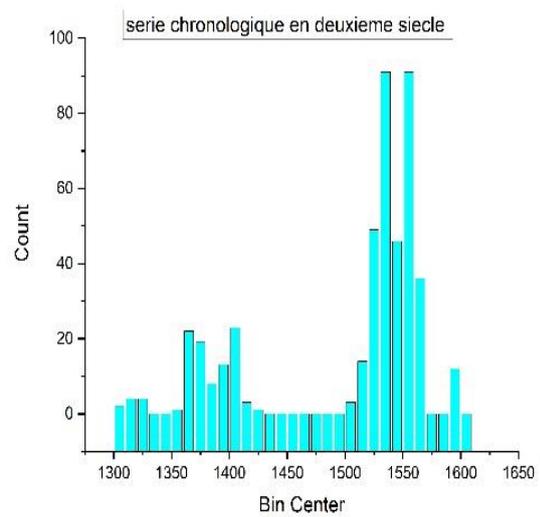


Figure 10 Séries chronologiques sous forme histogramme

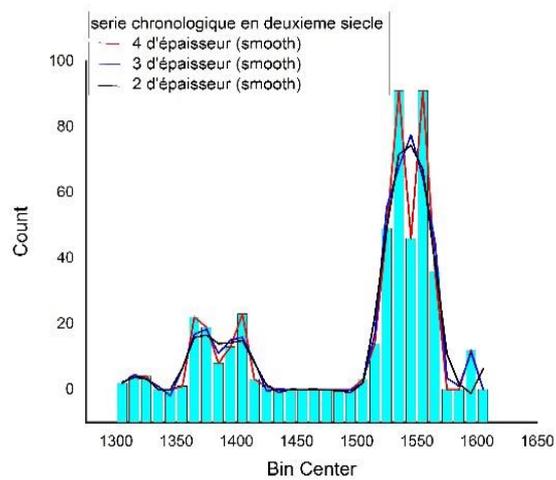
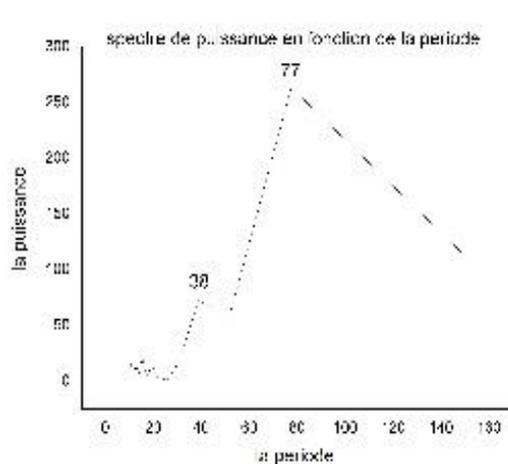
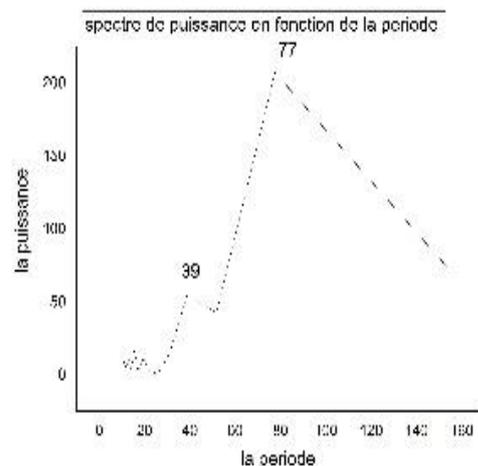


Figure 11 Variations lissées des observations



(a) Fenêtre welch



(b) Fenêtre triangle

Chapitre III : Aurores boréales de basses latitudes observées en Corée

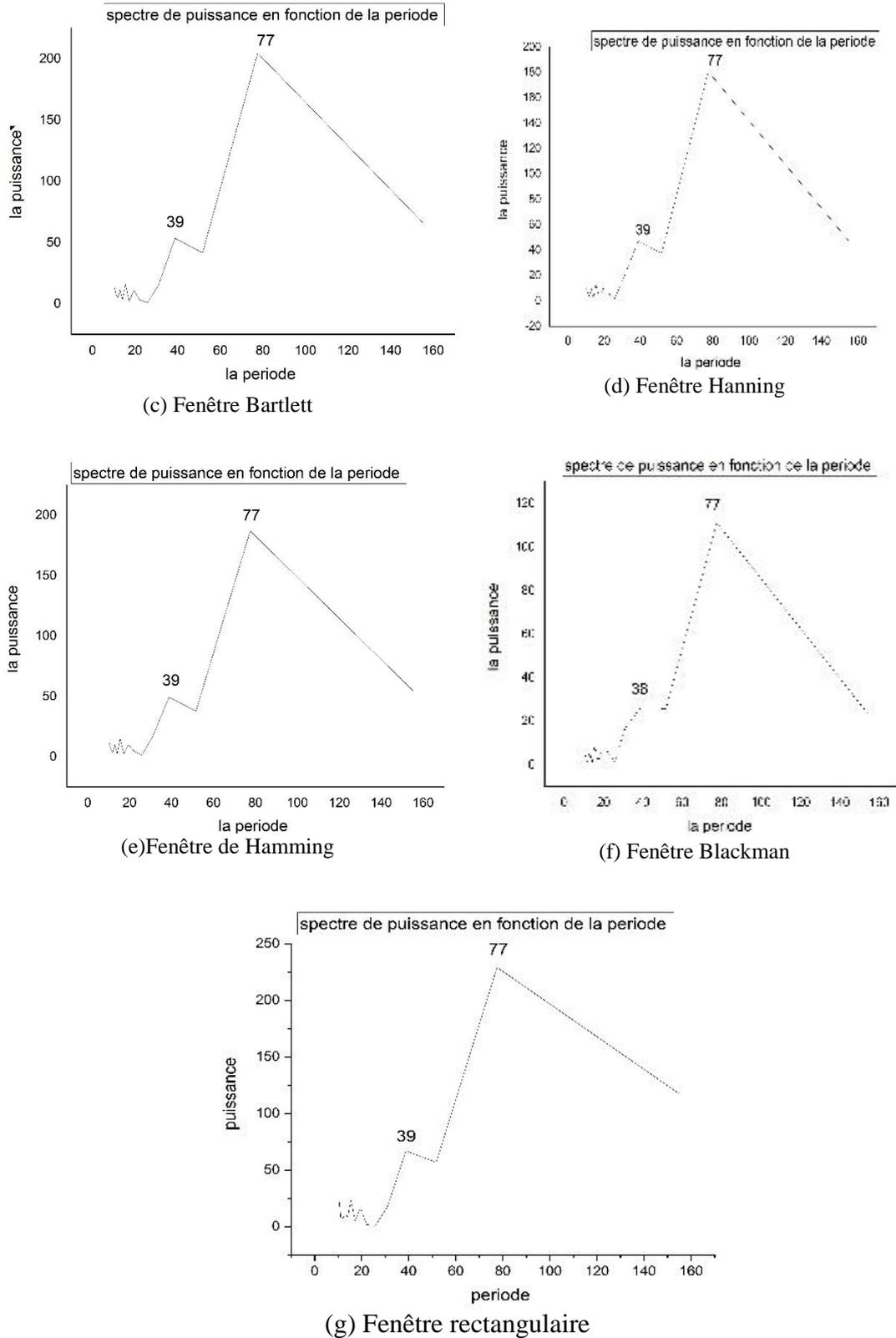


Figure 12 Spectre de la serie chronologique allant de 1300 à 1600 en utilisant differents types de fenêtres.

3- Troisième intervalle (1600-1900)

La série chronologique des observations effectuées entre 1600 à 1900 est représentée dans les figures (13, 14, 15), les spectres de cette serie sont représentées par la Figure 16. Cela nous a permis de déduire :

- Une période de 28 ans, qui correspond approximativement au cycle magnétique de Hale.
- Une période de 38 ans apparaît avec les fenêtres de Bartlett et de Welch. Celle-ci ne correspond pas à une oscillation connue dans les autres indicateurs de l'activité solaire.
- Une période de 57.5 ± 1.5 ans, qui correspond au cycle de 60 ans qui apparaît dans les anciens enregistrements auroraux et des taches solaires observables à l'œil nu [9].
- Une période de 68 ans qui apparaît avec la fenêtre de Bartlett. Celle-ci est proche au précédent cycle de 60 ans [10].

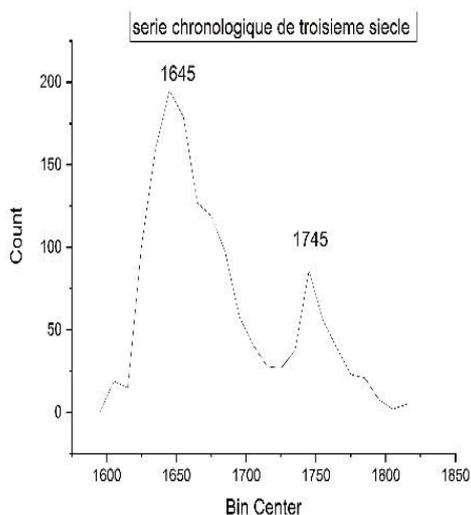


Figure 13 Variation des observations de 1600 à 1900

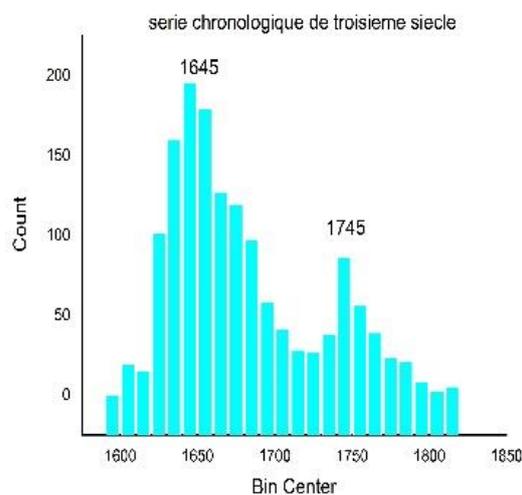


Figure 14 Série chronologique sous forme histogramme

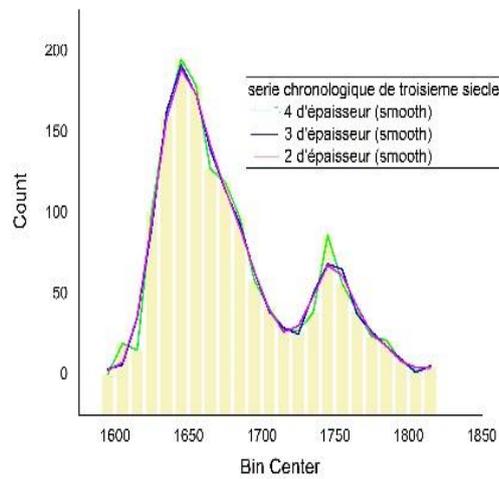
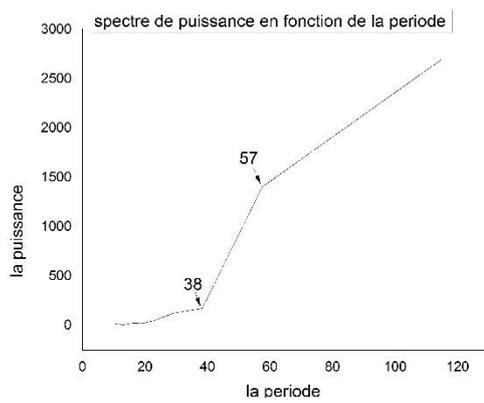
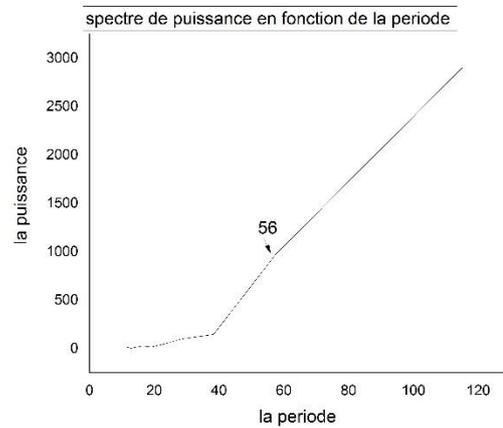


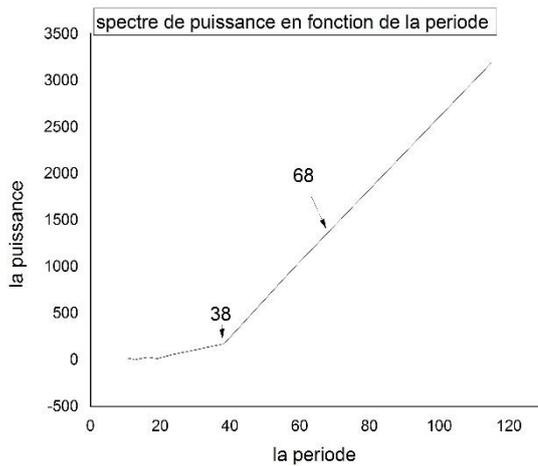
Figure 15 Variation lissée des observations



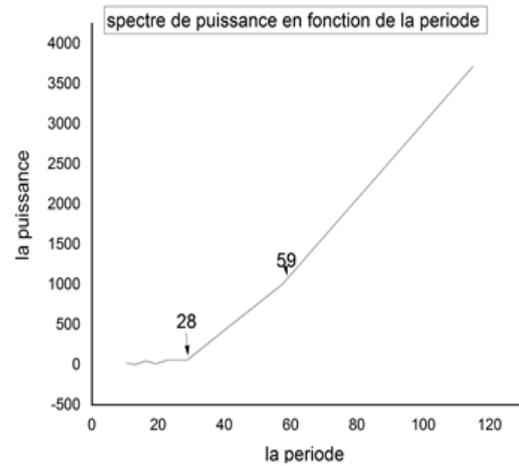
(a) Fenêtre Welch



(b) Fenêtre triangle



(c) Fenêtre Bartlett



(d) Fenêtre Hanning

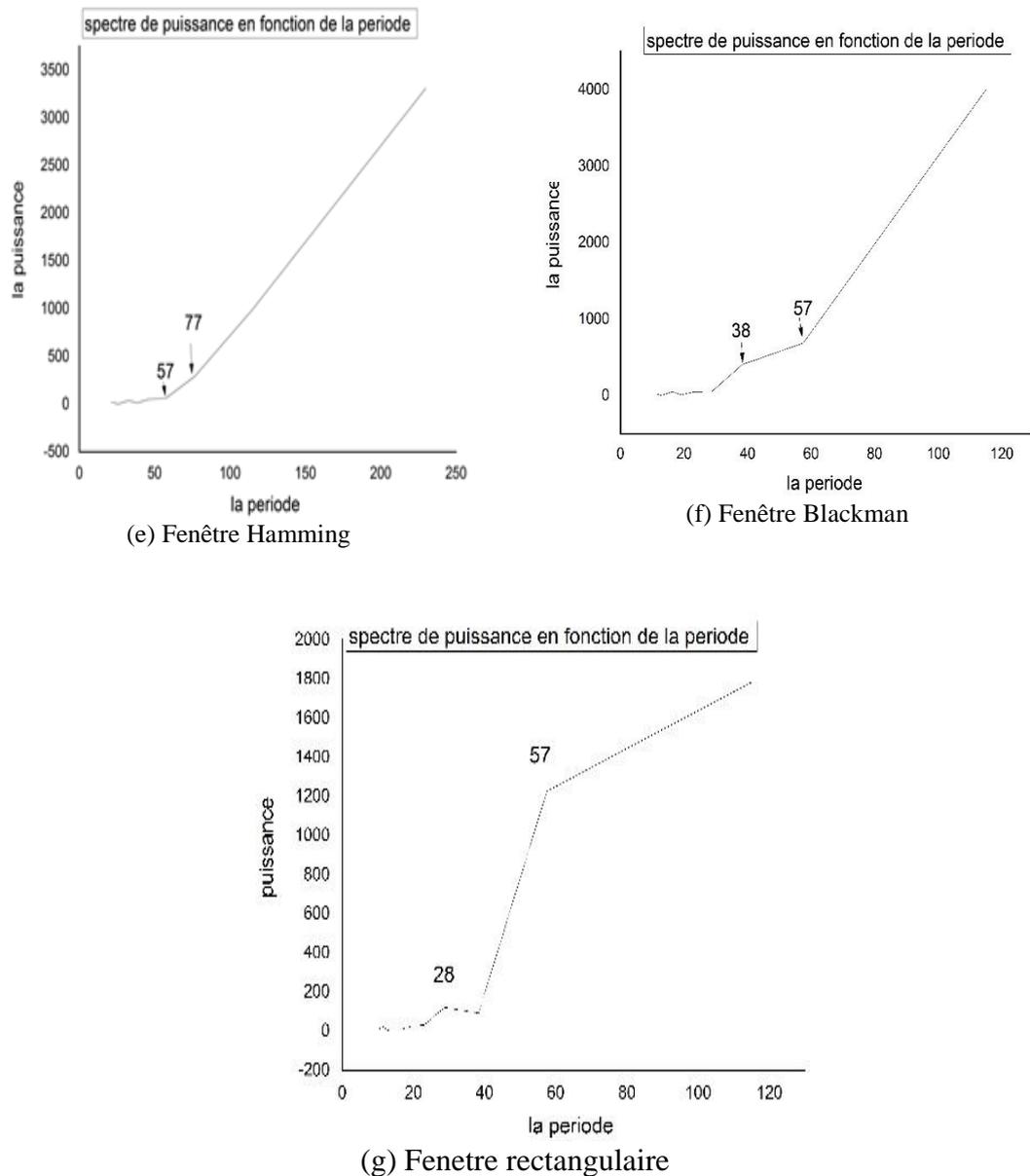


Figure 16 Spectre de la serie chronologique allant de 1600 à 1900 en utilisant differents types de fenêtrés.

III. Activité solaire

L'aurore polaire tire son origine de l'intersection du soleil avec le bouclier magnétique terrestre. Ainsi, lorsque les particules du vent solaire (un flux de plasma extrêmement chaud composé d'électrons et de protons) pénètrent dans l'atmosphère, à travers les pôles géomagnétiques, et entrent en interactions avec les atomes de l'atmosphère, par un mécanisme très compliqué, elles produisent l'émission de rayonnements lumineux.

Événements d'une extrême rareté, les aurores boréales observées à de basses latitudes sont habituellement associées à une activité solaire intense, et, à un degré moindre, à la variation de la latitude géomagnétique. Morphologiquement, elles apparaissent avec une couleur rouge (produite par la raie rouge de l'oxygène à 630 nm émise à plus de 150 Km), diffuses et sans aucun mouvement rapide [11]. Cette émission en couleur rouge est due à des électrons de basse énergie (moins de 100 eV).

Pour analyser l'effet de l'activité solaire sur les enregistrements auroraux, nous avons calculé le coefficient de corrélation entre nos données et les groupes de taches solaires (GSN) disponibles depuis 1610 (voir Figure 17). A notre grande surprise nous avons trouvé une faible corrélation négative, avec les GSN (Groupe Sunspot Numbers) : $r = -0.20504$. Il est possible que cette faible corrélation est due aux conditions d'observations, notamment météorologique, comme cela a été remarqué par Willis [12,13].

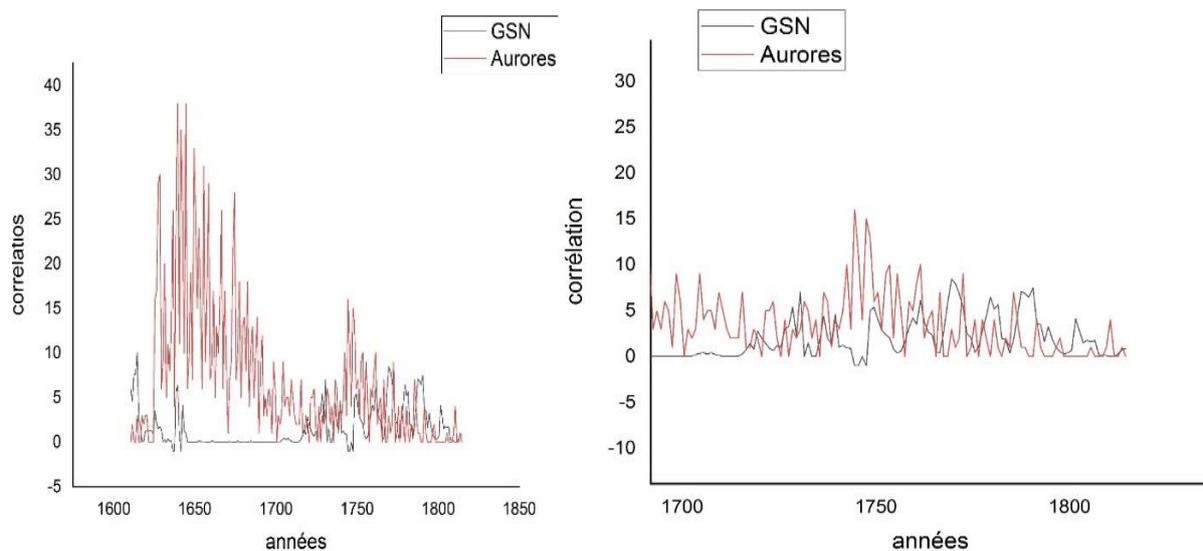


Figure 17 Courbes représentant les variations de la GSN et du nombre d'aurores.

References

- [1] USOSKIN, I. G. et KOVALTSOV, G. A., "Long-term solar activity: direct and indirect study", *Solar Physics*, 224, no 1, p. 37-47, 2004.
- [2] Wang, Y., Chen, S., Xu, K., Yan, L., Yue, X., He, F., et Wei, Y. (2021). "Ancient auroral records compiled from Korean historical books", *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 126(1), e2020JA028763.
- [3] Hataway David H. "The solar cycle", *Living reviews in solar physics*, 12, no 1, 1-87, 2015.
- [4] Suess Hans E. , "the radiocarbon record in tree rings of the last 8000 years". *Radiocarbon*, 22, p.200-209, 1980.
- [5] Ludkcke, H.-J. e, "Forçage paléoclimat par le cycle solaire De Vries/Suess". *climat des discussions passés(1)*, p. 279-305, 2015.
- [6] VONMOOS Maura Beer Jürg et MUSCHELER Raimund, "large variation in Holocene solar activity". *journal of geophysical Research Space Physics*, 111 (A06), 2006
- [7] KOPECKÝ, M. "Cycle de 22 ans de l'activité solaire". *Bulletin of the Astronomical Institutes of Czechoslovakia*, 2, 14, 1950.
- [8] Gleissberg.M.N, "Along-periodic Fluctuation of the Sun-spot Numbers". *observatory*, 62, p. 158-159, 1939.
- [9] Bekli.M.R., et Chadou I. , "Records of Auroras in Arabic Historical Sources: Additional Liste and Preliminary Analysis", *Solar Physics*, 295, p. 1-11, 2020
- [10] Bekli M. R., Zougab.N., Belabbas.A., et , Chadou.I., "Non-parametric Data Analysis of Low-latitude Auroras and Naked-eye Sunspots in the Medieval Epoch", *Solar Physics*, 292(4), p. 1-20, 2017.
- [11] VÁZQUEZ, Alexei, OLIVEIRA, Joao Gama, DEZSÖ, Zoltán, et al. Modeling bursts and heavy tails in human dynamics. *Physical Review E*, 73, no 3, 036127, 2006.
- [12] Willis, D.M., Easterbrook, M.G., Stephenson, F.R., Seasonal variation of oriental sunspot sightings. *Nature* 287, 617, 1980.
- [13] Willis, D.M., Doidge, C.M., Hapgood, M.A., Yau, K.K.C., Stephenson, F.R., Seasonal and secular variations of the oriental sunspot sightings. In: Stephenson, F.R., Wolfendale, A.W. (eds.) *Secular Solar and Geomagnetic Variations in the Last 10,000 Years*, Kluwer Academic, Dordrecht 187, 1988.

CONCLUSION GENERALE

L'objectif de notre travail est d'étudier l'interaction Soleil-Terre, et plus précisément, l'analyse spectrale des séries chronologiques des aurores polaires de basses latitudes. Pour cela, nous avons commencé par effectuer une recherche bibliographique. Nous avons ainsi choisi d'analyser les anciens enregistrements auroraux de la Corée, allant du 11^{ème} siècle au 19^{ème} siècle.

Comme la durée totale analysée est trop large, nous avons décidé de la partager en trois périodes distinctes : premier intervalle pour la période allant de 1000 à 1300 apr. J.-C., le deuxième intervalle pour la période allant de 1300 à 1600 apr. J.-C., et enfin le troisième intervalle pour la période allant de 1600 à 1900 apr. J.-C.

L'analyse spectrale est effectuée en utilisant 6 différentes fenêtres : Rectangulaire, Triangulaire, Welch, Hanning, Hanning, Bartlett, Blackmann. Nous avons ainsi décelé plusieurs périodes, dont certaines sont associées aux cycles de Gleissberg, de Hale, Suess.

Les oscillations les plus significatives sont :

- Premier intervalle : $T_1^1 = 22.5 \pm 1.5ans$, $T_2^1 = 32.5 \pm 3.5ans$.
- Deuxième intervalle : $T_1^2 = 38.5 \pm 0.5ans$, $T_2^2 = 77ans$
- Troisième intervalle : $T_1^3 = 33 \pm 10ans$

Concernant l'effet du fenêtrage, nous avons remarqué que les valeurs les plus éloignées des autres sont obtenues avec les fenêtres de Bartlett et de Blackmann. Le choix de fenêtres dans l'analyse des enregistrements auroraux est par conséquent crucial.

Pour estimer l'effet de l'activité solaire sur nos données, nous avons réalisé une analyse de corrélation avec les groupes de taches solaire (GSN). Les résultats montrent une corrélation faible et négative. Nous pensons que cette faible corrélation est due aux conditions d'observations, notamment météorologique.