

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 d'obtention du diplôme de **Master** en physique*

Option : Astrophysique

Thème :

Reconstitution des variations de l'irradiance solaire totale

Réalisé par :

Mr : Messaoudi Billel

Melle : Ayadi Hanane

Encadré par :

Mr : BEKLI Mohamed Réda

Mémoire soutenu publiquement le 03/07/2022, devant le jury composé de :

M^{me}. OULEBSIR Nadia	MCA	Univ.de Béjaïa	Présidente
Mr. BELHADI Zahir	MCA	Univ.de Béjaïa	Examineur
Mr. BEKLI Mohamed Réda	MCA	Univ.de Béjaïa	Encadreur

Année Universitaire : 2021-2022

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

REMERCIEMENT

En préambule de ce mémoire, on tient à remercier le bon Dieu Tout Puissant pour toutes ces grâces dont il ne cesse de nous combler tous les jours.

*On tient à exprimer nos profondes gratitude et respectueuses reconnaissances à notre encadreur monsieur **BEKLI MOHAMED REDA** pour sa bonne volonté d'accepter de nous encadrer, pour tout le temps qui nous a accordé, pour tous les conseils qui nous a prodigués.*

*Mes vifs remerciements vont également aux membres du jury madame **OULEBSIR NADIA** et monsieur **BELHADI ZAHIR** pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail en acceptant de l'examiner.*

*On tient également à remercier nos enseignants de département de physique, nos camarades : **LYAS, CELIA, LAMIA, ZOUBIR** et **MADJID**, et enfin tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

Dédicaces

*Premièrement **DIEU** merci.*

Je dédie ce modeste travail à :

*Mon binôme **AYADI HANANE***

*A la mémoire de mes chers oncles **KHOUDIR** et **AYACHI** , aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours pour eux.*

*Mes très chers parents **NOUREDDINE** et **NORIA** qui m'ont toujours soutenu et accompagné dans mes études, qui ont attendu et espéré ma réussite, qui m'ont aidé pour être à la hauteur. Que dieu les protège pour leur sacrifices, amour, tendresse.*

*A ma sœur **MERIEM** et mes deux frères **NABIL** et **MINOU**.*

*Je dédie ce travail à mon cher grand père **MESSAOUDI HAMID**, ma grand-mère **BAYA** et ma tante **HASSIBA**.*

*A monsieur **HARFI NABIL** mon encadreur de stage d'enseignement qui m'a vraiment bien aidé dans ma première expérience d'enseignement.*

*A mes oncles **MOUSSA**, **ABDENNOUR**, **NADIR** et **KHALED**.*

A nos enseignants :

***BEKLI MOHAMED REDA**, **Gharbi Abdelhakim**, **Aoudia Sofiane**,
Belhadi Zahir, **Nadia Oulebsir**, **Kassa Adel**, **Kasri Yazid**, **Yala Hakim**, **Belabass Abdelmoumen**.*

MESSAOUDI BILLEL

Dédicaces

Je remercie mon Dieu tout puissant de m'avoir donné la foi qui m'a permis d'en arriver là.

Je dédie ce modeste travail à :

*A mon binôme **MESSAOUDI BILLEL***

*A mes très chers parents **RABEH** et **NOURA**, qui m'ont toujours soutenue et accompagné dans mes études, qui ont attendu et espéré ma réussite. Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, et le respect que j'ai toujours pour vous, que Dieu vous protège.*

*A mes très chères sœurs **IMANE, CHAIMA, RAHMA, HOUDA.***

« Je vous aime »

*A la mémoire de mes très chers grands parents **MOHEND** et **HOURIA***

*A mes très chers grands parents **AMER** et **MERIEM** que Dieu leur offre une bonne santé nchalh.*

A tous mes oncles et tantes et leurs enfants

*A ma très chère tante **REBIHA.***

*A toute la famille **AYADI** et **YAHIAOUI.***

Je vous dis Merci.

AYADI Hanane

Table des matières

	Introduction générale	i
	Chapitre I : Activité solaire	1
1.	Introduction	1
2.	Structure et caractéristiques du soleil	1
2.1.	Le soleil	1
2.2.	Structure du soleil	2
2.2.1.	Le noyau	2
2.2.2.	Zone radiative	5
2.2.3.	Zone convective	5
2.2.4.	Photosphère	5
2.2.5.	L'atmosphère solaire	6
a)	La chromosphère	6
b)	La transition chromosphère-couronne	7
c)	La couronne solaire	7
3.	Activité solaire	8
3.1.	Le cycle solaire	9
3.2.	Champ magnétique	10
3.3.	Les éruptions solaires	11
3.4.	Vent solaire	12
3.5.	Les éjections de masse coronale (CME)	12
4.	Indicateurs de l'activité solaire	12
4.1.	Indices directs	13
4.1.1	Tache solaires	13
4.1.2.	Nombre de tache solaire : WSN et ISN	13
4.1.3.	Série de groupe de taches solaires (Group sunspot number, GSN)	15
4.1.4.	Autres indices	15
4.2.	Indices indirect	16
4.2.1.	Radio-isotope ^{14}C	17
4.2.2.	Isotope cosmogénique ^{10}Be	17
5.	Irradiance solaire	17
5.1.	Irradiance solaire total(TSI)	18
6.	Irradiance solaire totale et nombre de taches solaires	19
	Chapitre II : Technique d'analyses et bases de données	21
1.	Introduction	21
2.	Série chronologique	21
2.1.	Un peu d'histoire	21
2.2.	Définition d'une série chronologique	22
2.3.	Objectifs d'étudier les séries chronologiques	22
3.	Corrélation entre deux series chronologique	22

3.1.	Stationnarité.....	22
3.2.	Coefficient de corrélation de Pearson.....	23
3.3.	Coefficient de corrélation empirique.....	24
4.	Méthode des moindres carrées.....	25
5.	Régression linéaire simple.....	25
6.	Logiciel de traitement de données OriginLab.....	26
7.	Bases de données.....	26
7.1.	SILSO (Sunspot Index and Long-term Solar Observations).....	26
7.2.	NOAA (SWPC).....	27
7.3.	PMOD (WRC).....	28
7.4.	SOHO (Solar & Heliospheric Observatory).....	30
7.5.	ACRIMSAT (Active Cavity Radiometer Irradiance Monitor).....	31
	Chapitre III : Reconstitution et prédiction de la TSI.....	34
1.	Introduction	34
2.	Reconstitution et prédiction de la TSI en utilisant les SN.....	34
2.1.	Reconstitution et prédiction avec PMOD.....	36
2.2.	Reconstitution et prédiction avec ACRIM.....	38
3.	Reconstitution de la TSI en utilisant les GSN.....	40
3.1.	Reconstitution avec PMOD.....	40
3.2.	Reconstitution avec ACRIM.....	42
4.	Discussion des résultats.....	43
5.	Conclusion.....	45
	Conclusion générale.....	47
	ABSTRACT.....	48
	Résumé.....	49
	Annexe I.....	50
	Annexe II.....	51
	Bibliographie.....	55

Introduction générale

Le concept du Soleil parfait et immuable, postulé par Aristote, était une croyance forte pendant des siècles. Cependant, comme les gens l'ont noté avant l'époque d'Aristote, certains changements subtils du Soleil peuvent être observés même à l'œil nu. Bien que les scientifiques connaissent l'existence de taches « imparfaites » sur le Soleil depuis le début du XVII^e siècle, ce n'est qu'au XIX^e siècle que la communauté scientifique s'est rendue compte que l'activité solaire varie sur un cycle solaire de 11 ans. De nombreuses manifestations différentes de la variabilité solaire ont été trouvées plus tard, y compris le fait que la « constante solaire », ou l'irradiance solaire totale (TSI), n'est pas une invariante.

Le Soleil apparaît plus complexe, avec une grande variété de processus énergétiques non stationnaires. De tels processus transitoires non stationnaires (souvent éruptifs) peuvent être considérés comme manifestation de l'activité solaire : les taches solaires, les proéminences, les éruptions, les éjections de masse coronale (CME), etc.

Le fait que l'activité solaire existe pose un problème à la physique solaire, conduisant au développement des modèles sophistiqués pour la modéliser. Le Soleil est la seule étoile qui peut être étudiée en détail et peut donc être considérée comme un modèle pour les autres étoiles de même taille. L'étude et la modélisation de l'activité solaire peuvent améliorer notre compréhension de la nature.

D'autre part, l'étude de l'activité solaire variable n'a pas un intérêt purement académique, car elle affecte directement l'environnement terrestre. Bien que les changements du Soleil soient à peine visibles sans instruments scientifiques précis, ces changements ont un impact significatif sur de nombreux aspects de notre vie. En particulier, la magnétosphère est principalement contrôlée par le champ magnétique solaire.

De tels processus peuvent modifier l'environnement radiatif sur la terre et doivent être pris en compte pour la planification et la maintenance des missions spatiales. De plus, l'activité solaire peut provoquer de fortes tempêtes géomagnétiques dans la magnétosphère et l'ionosphère, qui peuvent perturber la propagation des ondes radio et la stabilité des systèmes de navigation, ou provoquer des courants parasites dangereux dans les lignes électriques. Un autre aspect important est la corrélation entre les variations de l'activité solaire et le climat terrestre, mais qu'on ne compte pas aborder ici dans notre mémoire.

Il est important d'étudier la variabilité de l'irradiance solaire totale à différentes échelles de temps, en analysant les données d'observation (ou reconstruites). L'activité du Soleil est systématiquement explorée de diverses manières, avec des expériences terrestres et spatiales au cours des dernières décennies, couvrant ainsi 3 à 4 cycles solaires. Cependant, il convient de noter que l'ère moderne a été caractérisée, jusqu'à la première décennie du XXI^e siècle, par une forte activité solaire dominée par un cycle de 11 ans, et il n'est pas aisé d'extrapoler les connaissances actuelles à une échelle de temps plus longue. Le cycle actuel 24 indique un retour à un niveau d'activité solaire normal. En revanche, contrairement à certaines attentes, l'activité minimale n'a pas été atteinte.

La connaissance de la variation de l'activité solaire dans le passé est d'une grande importance pour plusieurs raisons. Par exemple, elle permet une meilleure compréhension du comportement de la dynamo solaire, qui génère un champ magnétique solaire changeant périodiquement, ce qui permet d'estimer les fractions de temps passées par le Soleil dans des états de très faible activité, appelés grands minimums. De telles études nécessitent une longue série chronologique de données sur l'activité solaire. La plus longue série directe d'activité solaire est la série de taches solaires vieille de 400 ans, qui illustre le contraste dramatique entre le minimum et la période récente d'activité élevée.

L'irradiance solaire totale change d'environ 0,1 % entre le maximum et le minimum d'activité solaire. Des mesures précises de cette quantité ne sont disponibles que depuis 1978 (environ 3-4 cycles) et ne fournissent pas d'informations sur les tendances séculaires à long terme. Afin d'évaluer de manière fiable le rôle du Soleil dans le changement climatique mondial récent, des séries temporelles plus longues sont cependant nécessaires. Ils ne peuvent être évalués qu'à l'aide de modèles appropriés. Pour cela, nous nous représentons dans ce travail une reconstitution et prédiction de l'irradiance solaire totale.

Une description du concept d'activité solaire et des indices sont présentées dans le chapitre I. L'outil mathématique, logiciels, bases de données et traitements de données sont décrits en détails dans le chapitre II. Enfin, le modèle utilisé, les résultats de la reconstruction et la prédiction de la TSI, font l'objet du chapitre III.

Chapitre I : Activité solaire

"The point of living is to study the Sun"

-Anaxagoras (499-428 BC)

1. Introduction

Depuis la nuit des temps et l'homme est fasciné par le disque jaune qui se profile à l'horizon, notre étoile, le Soleil. Le Soleil est une étoile importante pour la vie sur terre car elle fournit à notre planète assez de chaleur et de lumière pour que les êtres vivants puissent prospérer.

On sait actuellement que les variations de l'irradiance solaire affectent le climat de la Terre, en particulier le bilan énergétique. Mais, comment exactement et dans quelle mesure cela se produit n'est pas encore clair. Pour cette raison, des modèles d'irradiance solaire couvrant des périodes aussi longues que possibles sont nécessaires pour étudier l'évolution du climat.

Le présent chapitre est consacré au Soleil (structure, propriétés...), ainsi qu'à l'activité solaire et ses différents indicateurs.

2. Structure et caractéristiques du Soleil

2.1. Le Soleil

Le Soleil est une étoile ordinaire parmi les 200 milliards que compte la voie lactée, et elle est du type spectral G2. Son diamètre apparent dans le ciel est d'un demi-degré, ce qui permet de l'étudier en détail. Comme toutes les étoiles, le Soleil peut être considéré comme une sphère de gaz chaud et de plasma qui rayonne. Son diamètre est de 1400000 km et sa masse est de

2.10^{30} kg. Concernant sa composition, il est constitué de 90% d'hydrogène et de 10% d'hélium. Les autres éléments ne représentent qu'un faible pourcentage de sa masse.

Au centre du Soleil (Figure. 1), les réactions de fusion thermique convertissent l'hydrogène en hélium, produisant ainsi de l'énergie et du rayonnement. Ces réactions se produisent dans un milieu où la densité est extrême et la température extrêmement élevée, de l'ordre de 15.10^6 K. L'énergie produite traverse difficilement le Soleil à travers la zone radiative puis convective, avant d'atteindre les couches superficielles. Elle est ensuite émise sous forme de lumière au niveau de la photosphère, à une température de l'ordre de 5800 K (Malherbe, 2012). Il ne faut à la lumière que 8 minutes et 19 secondes pour atteindre la Terre (Bely, et al., 2008).

Le Soleil est apparu il y a environ 4,57 milliards d'années (Bely, et al., 2008) et on s'attend à ce qu'il continue d'émettre de la lumière pendant encore 4 à 5 milliards d'années.

L'**annexe I** présente un certain nombre de paramètres solaires essentiels. Le Soleil est une étoile typique d'âge moyen, et il occupe une place particulière dans la science moderne, car c'est l'unique étoile que nous pouvons observer du près. Cela dit, on ne peut comprendre entièrement la physique du Soleil qu'en étudiant d'autres étoiles ayant des propriétés différentes, que ce soit en âge, en masse ou en moment cinétique (Thomas & Weiss, 2008).

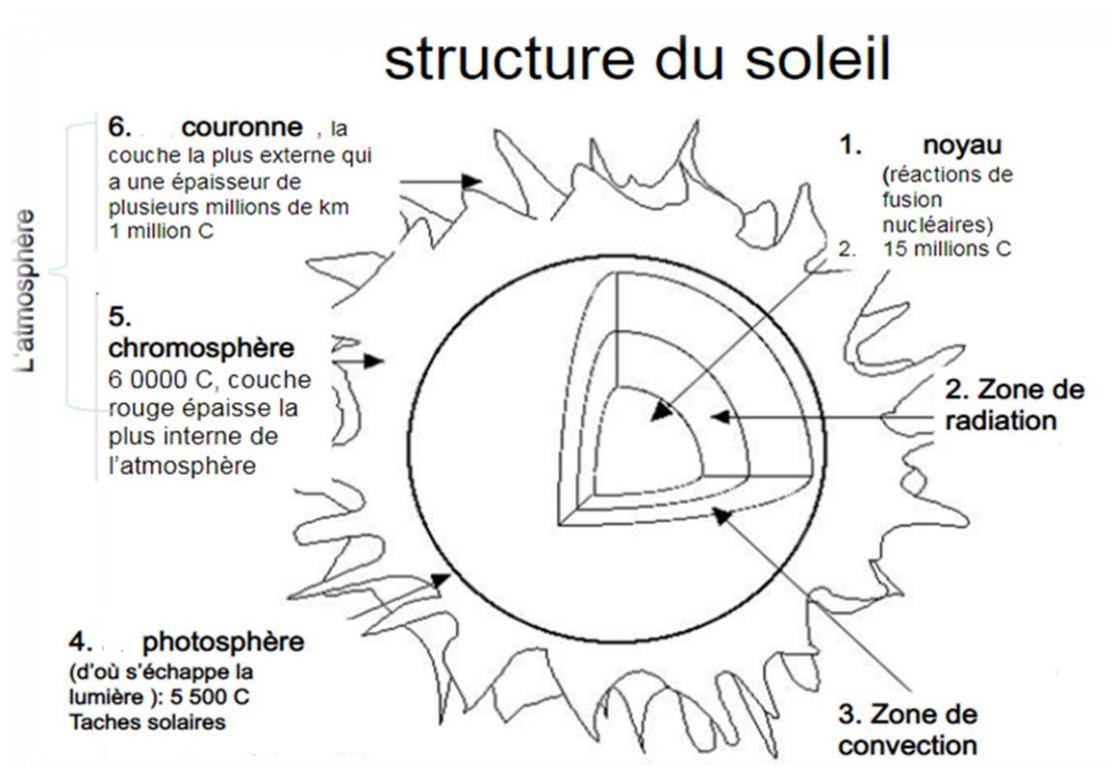


Figure 1 structure en coupe du Soleil.

2.2 Structure du Soleil

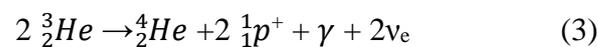
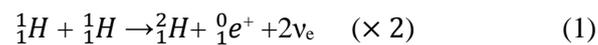
2.2.1 Le noyau

C'est dans une sphère de rayon 2×10^5 km, moins d'un quart du rayon solaire, que 50 à 70 % de la masse totale du Soleil est concentrée. Dans cette zone, l'hydrogène se transforme en hélium par fusion nucléaire, et cela suivant deux cycles de réactions : la chaîne *proton-proton* et le cycle *CNO*. Ces réactions s'accompagnent d'une perte de masse qui se traduit par une émission d'énergie, selon la formule $E = m \cdot c^2$.

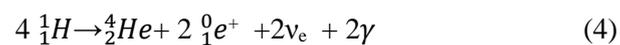
Sachant que la combustion nucléaire a débuté il y a 4,6 milliards d'années, on peut dire que le centre a utilisé tout l'hydrogène qui le constitue. Ainsi par estimation, la source actuelle d'hydrogène se trouve à 0,1 rayon solaire du centre (Lilensten & Blelly, 2021).

La chaîne *proton-proton* :

Dans le Soleil, 4 noyaux d'hydrogène se transforment en 1 noyau d'hélium, 2 positrons, 2 neutrinos et 2 photons gamma comme suit :



Tout cela revient à :



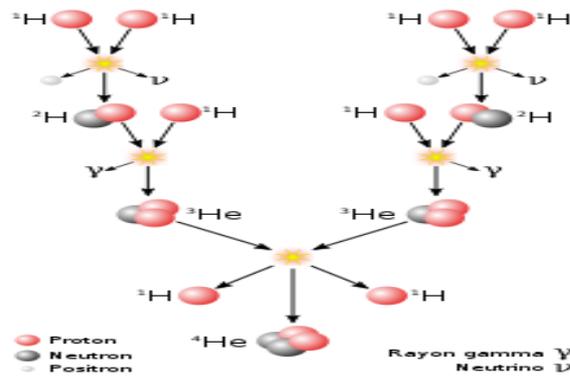


Figure 2 La chaîne proton-proton.

Le cycle CNO :

Pour des températures supérieures à 15×10^6 K, l'hydrogène peut se transformer en hélium suivant un cycle de réactions utilisant des atomes de carbone présents dans le noyau. ($\approx 10\%$ de l'énergie du Soleil)

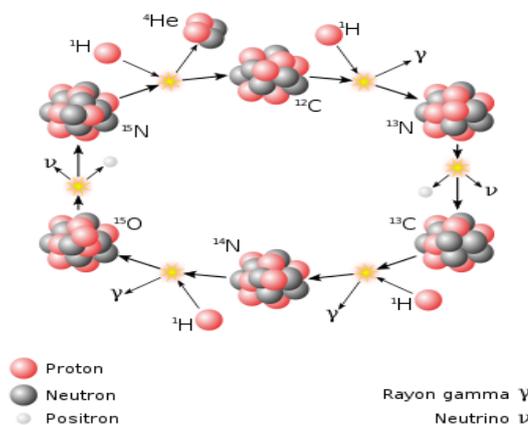
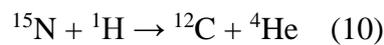
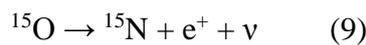
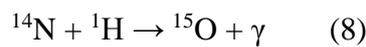
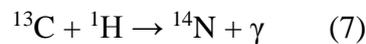
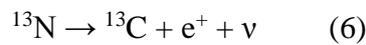
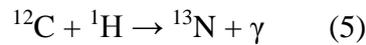


Figure 3 Le cycle CNO

2.2.2 La zone radiative

C'est la zone qui va de 0,3 à 0,8 R_{\odot} , et la première région que l'énergie doit traverser pour s'échapper du Soleil. Cette zone contient entre 1/2 et 1/3 M_{\odot} avec une décroissance de la pression et de la température allant du centre vers l'extérieur. Il est intéressant de savoir que les neutrinos traversent cette couche en 2 secondes, alors que les photons prennent des millions d'années pour s'échapper, au cours desquelles ils subissent un étalement spectral suite aux collisions avec la matière solaire, si bien que le rayonnement solaire émis en surface est une lumière blanche accompagnée par des rayonnements UV (Lilensten & Blelly, 2021). En effet ces photons sont absorbés, puis émis, puis à nouveau absorbés puis réémis énormément de fois (Boumelit, 2015).

2.2.3 La zone convective

Dès que les photons traversent la zone radiative, ils arrivent à la zone convective, une zone agitée en rotation différentielle suivant les latitudes et dans laquelle les protons et électrons tourbillonnent en formant des cellules. Ces dernières sont appelées granulations et qui sont observables depuis la terre.

La convection correspond à un mouvement de matière ou du gaz chaud monte, se refroidit en cédant son énergie au niveau des couches superficielles de l'atmosphère solaire avant de redescendre. Ce processus intervient lorsque le rayonnement ne transporte pas assez efficacement l'énergie vers l'extérieur du Soleil, car il développe un gradient de température important qui déclenche l'instabilité convective (Lilensten & Blelly, 2021).

2.2.4 La photosphère : source de rayonnement solaire

La photosphère est la surface visible du Soleil, où les photons sont éjectés dans l'espace. Elle est la source de 99% du rayonnement total, et son épaisseur est de 500 km. C'est une zone dans laquelle la température décroît de 5700 à environ 4200 K. La surface de la photosphère n'est pas au repos. En effet, dans la zone convective, la matière ionisée en mouvement est émergée, accompagnée d'un fort champ magnétique.

C'est dans la photosphère que l'hydrogène neutre se propage, les taches solaires se forment aussi (Lilensten & Blelly, 2021).

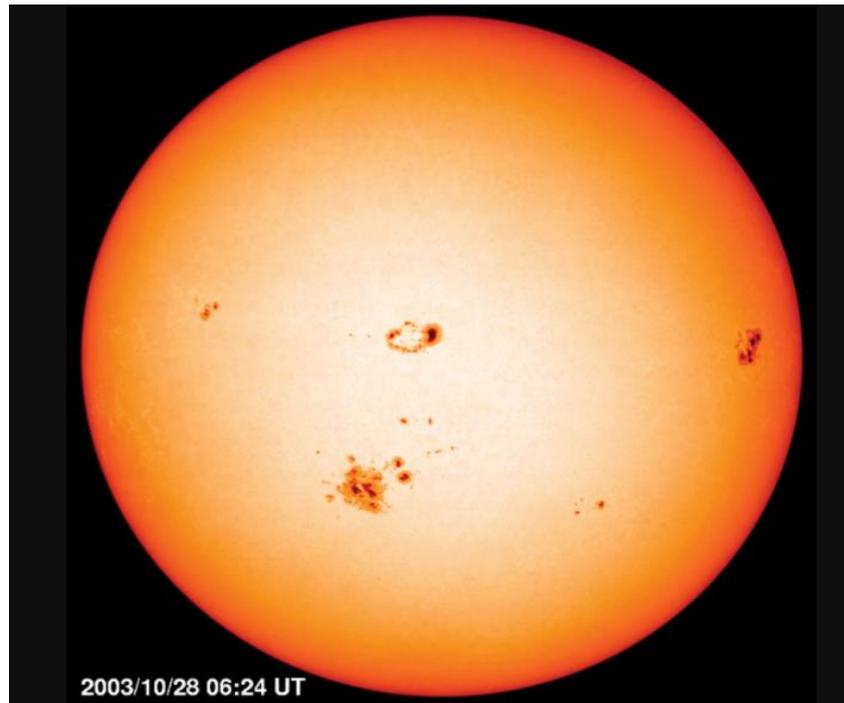


Figure 4 Photosphère du Soleil, image prise par le satellite *Solar and Heliospheric Observatory (SOHO)*, le 29 octobre 2003.

2.2.5 L'atmosphère solaire

L'atmosphère solaire est toute la zone située au-dessus de la photosphère. La portion de l'espace soumise à son influence s'appelle l'héliosphère. Celle-ci s'étend au-delà de l'orbite de Pluton (40UA¹), au-delà même du nuage d'Oort (50 000 à 100 000 UA), jusqu'à la frontière au-delà de laquelle le vent stellaire des autres étoiles de la galaxie s'oppose au vent solaire. Cette zone est constituée de plasma (environ 10^5 m^{-3}), et un champ magnétique, infiniment négligeable à de telles distances du Soleil.

L'atmosphère solaire peut être divisée en trois parties (Lilensten & Bletty, 2021):

a) La chromosphère

C'est la zone qui se trouve au-delà de la photosphère, et qui s'étend de 500 à 2000 km, les électrons y ont une température qui peut atteindre 10 000 k dans sa partie supérieure.

¹ UA : Symbole de l'Unité Astronomique, définie comme la distance moyenne de la Terre au Soleil, c'est à dire $1,495\,978\,71\,10^{11}$ m.

Une partie du rayonnement visible photosphérique est absorbée, excitant ainsi le milieu chromosphérique, qui rayonne à son tour par désexcitation (Lilensten & Blelly, 2021).

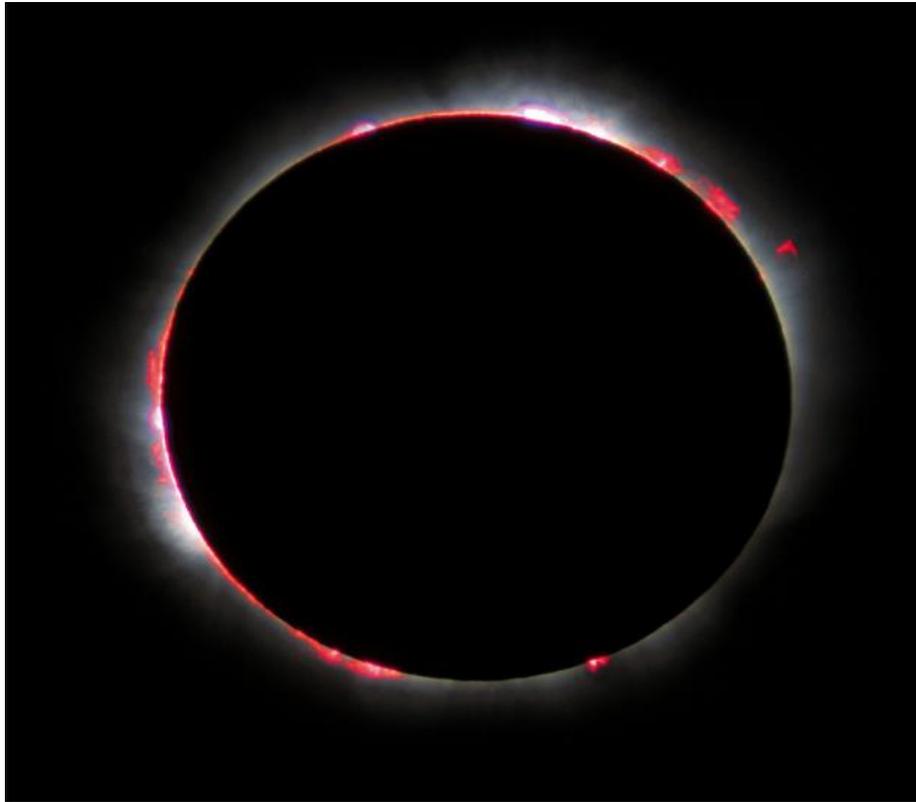


Figure 5 Chromosphère solaire visible en France lors de l'éclipse totale de 1999(en rose).

b) La transition chromosphère-couronne

C'est une région qui se situe entre 2000 et 15000 km de la photosphère. À la base de cette zone, la température est d'environ 10^5 K, et elle continue à croître pour atteindre plus d'un million de degrés kelvin.

Le fer est un bon traceur de cette zone parce qu'il s'ionise davantage quand la température augmente (Lilensten & Blelly, 2021).

c) La couronne solaire

C'est la couche externe du Soleil. Elle est séparée de la photosphère d'au moins 15000 km et s'étend sur quelques rayons solaires. Les premières observations de la couronne solaire ont

été faites lors des éclipses de la Lune. D'ailleurs, les chercheurs profitent des éclipses pour bien étudier cette région. Actuellement, grâce aux observations de YOHKOH et SOHO, il est bien établi qu'elle se trouve dans un état dynamique permanent (Lilensten & Blevy, 2021).



Figure 6 La couronne solaire observée lors d'une éclipse.

3. L'activité solaire

Le concept d'activité solaire, largement utilisé aujourd'hui, n'est pas clairement défini et renvoie à un certain nombre de phénomènes : la variabilité magnétique de la surface solaire, les phénomènes d'éruption, l'activité coronale, le rayonnement du Soleil en tant qu'étoile ou encore les perturbations géomagnétiques qui peuvent être liées au phénomène de l'activité solaire.

Un certain nombre d'indices (directs et indirects) quantifiant l'activité solaire est proposé. La majorité de ces indices sont corrélés les uns aux autres en raison du cycle dominant de 11 ans, cependant ils peuvent différer dans les détails et les tendances à long terme.

En plus des indices solaires directs, des indicateurs indirects sont souvent utilisés pour quantifier l'activité solaire à travers son influence sur la magnétosphère ou l'héliosphère (Usoskin, 2017).

3.1 Le cycle solaire :

Un cycle solaire est une période durant laquelle l'activité solaire reproduit pratiquement le même comportement qu'au cours de la période précédente.

La principale caractéristique de l'activité magnétique solaire est sa quasi-périodicité d'environ 11 ans, avec une succession d'inversion du champ magnétique solaire.

Cette dernière se produit suivant un cycle de 22 ans, connue sous le nom de cycle de Schwab (Figure.7). Cependant, le cycle varie à la fois en amplitude et en durée.

Le cycle de 11 ans est maintenant reconnu comme une oscillation fondamentale de l'activité solaire expliquée par la théorie de la dynamo solaire. Cette périodicité est observée dans plusieurs autres domaines, notamment solaire, héliosphérique, géomagnétique, météo spatiale, climatique et autres (Figure.7).

Occasionnellement, l'évolution temporelle de l'activité solaire est interrompue par des périodes d'activité extrêmement réduites appelées grands minima.

Le dernier grand minima, (et le seul couvert par des observations solaires directes), est le fameux minimum de Maunder qui s'est produit de 1645 à 1715(Figure.8). D'autres grands minima du passé sont connus grâce aux enregistrements des isotopes cosmogéniques, comme le minimum de Spörer vers 1450-1550 et le minimum de Wolf vers le XIVème siècle.

Le minimum de Dalton (vers 1790–1820) est également considéré comme un grand minima, même si l'activité des taches n'a pas disparu complètement et le cycle de Schwab durant ce minimum est observé. Comme suggéré par Schüssler (1997), cela peut être considéré comme une tentative infructueuse du Soleil pour passer à l'état grand minima (Usoskin, 2017).

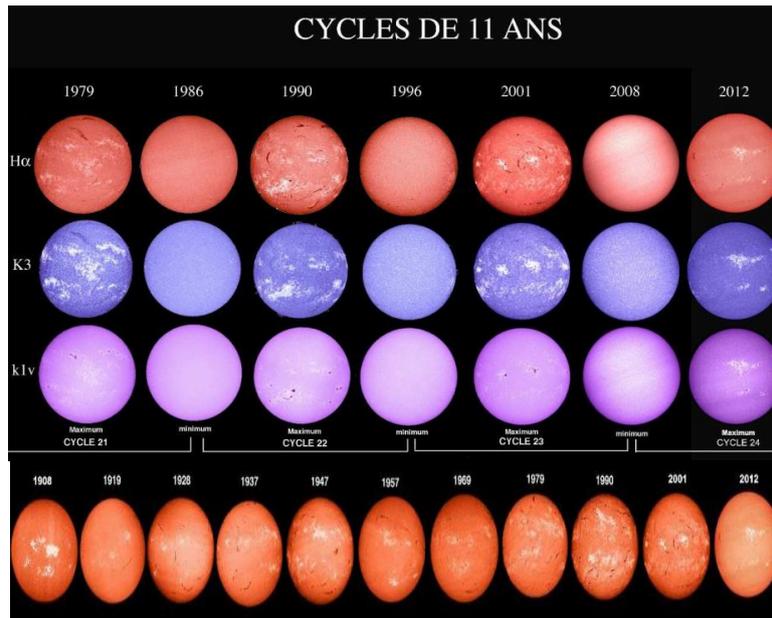


Figure 7 Spectrohéliogrammes montrant la variation de l'activité solaire durant un cycle de 11 ans (Malherbe, 2012).

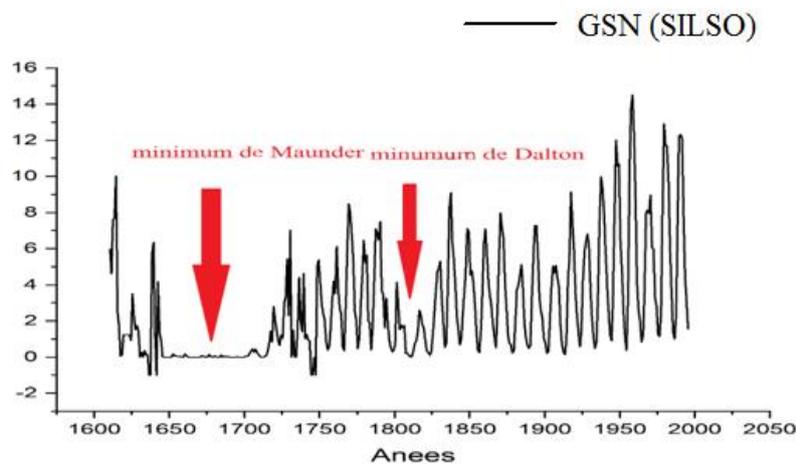


Figure 8 Les minimum de Maunder et de Dalton

3.2 Champ magnétique

L'activité du Soleil se traduit par l'évolution du champ magnétique qui est généré à l'intérieur du Soleil par des courants électriques circulant dans le plasma conformément à la loi d'Ampère :

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu I \quad (8)$$

où, I le courant et μ la perméabilité.

Le champ magnétique est généré par une dynamo hydromagnétique au niveau de l'interface séparant la zone de convection du noyau radiatif, et qu'on appelle la tachocline.

Le champ produit émerge sur la surface solaire par flottaison, formant des régions bipolaires de haute intensité à différentes échelles spatiales et temporelles. Les plus grandes de ces régions sont appelées régions actives et sont composées de taches solaires entourées de facules brillantes et de gammes chromosphériques qui les recouvrent (Balmaceda, 2007).

3.3 Les éruptions solaires

L'éruption est un phénomène complexe qui correspond à la libération brusque (en quelques minutes) d'une énergie importante (jusqu'à 1025 joules). Cette évacuation brutale de l'énergie provoque l'échauffement du plasma et l'accélération des particules (électrons, protons et ions). Cette émission est détectée dans tout le domaine spectral, à partir des rayons X jusqu'aux ondes radioélectriques. Certaines grandes éruptions émettent également des rayons gamma.

Le comptage de l'activité solaire constitue un indicateur éventuel de l'activité solaire.

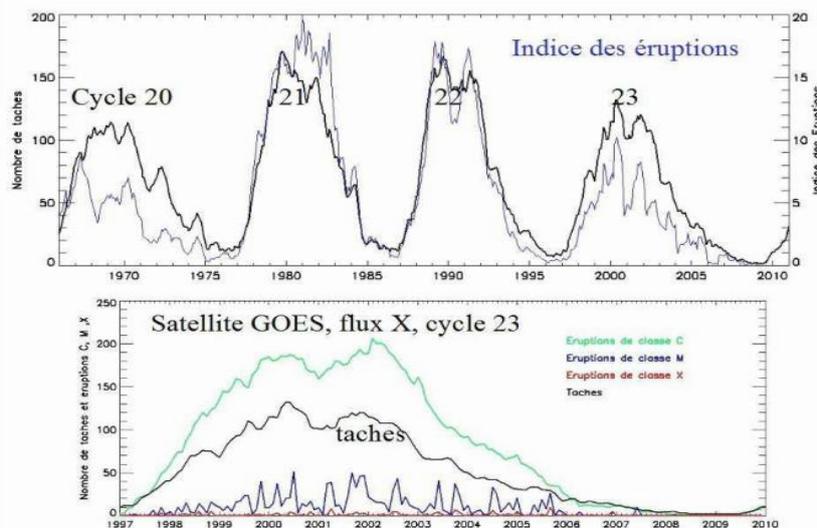


Figure 9 indices des éruptions solaires et flux en rayons X (GOES).

3.4 Vent solaire

Le vent solaire comme déduction des observations cométaires est connu depuis environ 70 ans. Comme une évolution théorique, grâce à Parker, depuis environ 67 ans, et comme objet d'observations directes par satellites pendant environ 60 ans (Axford., 1985).

Certains chercheurs ont suggéré l'idée que la matière s'échappe du Soleil en forme de nuages ionisés au début du siècle dernier. Chapman et Ferraro en 1931 sont arrivés à une théorie décrivant l'expansion de la couronne solaire et ont suggérés qu'un nuage de plasma, éjecté du Soleil, ne pouvait pas pénétrer et s'enrouler autour du champ géomagnétique. Parker (1958, 1959) a présenté les premières théories de l'expansion solaire, démontrant que la couronne solaire n'est pas en équilibre hydrostatique, mais est dans un état d'expansion permanent et libère de la matière dans l'espace, et ce à des vitesses supersoniques. Cette expansion représente le vent solaire (Xavier, 2002).

3.5 Les éjections de masse coronale (CME)

Les éjections de masse coronale (CME) sont de grandes structures contenant du plasma et des champs magnétiques qui sont expulsés du Soleil vers l'héliosphère (Webb & Howard, 2012).

Les CEM revêtent une grande importance pour la caractérisation de l'activité solaire. Tous les CME ne sont pas dirigés vers la Terre, mais ceux qui réussissent génèrent des tempêtes magnétiques. Il faut noter que les CEM sont corrélés avec le cycle de taches solaires (Louis. Zerbo, 2012).

4. Indicateurs de l'activité solaire

Les indices solaires peuvent être divisés en indices physiques et synthétiques selon la manière dont ils sont obtenus/calculés. Les indices physiques quantifient les valeurs directement mesurables d'une observation physique réelle, comme par exemple : le flux radioactif. Les indices synthétiques (le plus courant étant le nombre de taches solaires) sont calculés (ou synthétisés) à l'aide d'un algorithme spécial fondée sur des observations (souvent non mesurées en unités physiques). De plus, les indices d'activité solaire peuvent être directs

(c'est-à-dire directement liés au Soleil) ou indirects (relatifs aux effets indirects causés par l'activité solaire), comme indiqué dans les sections suivantes (Usoskin, 2017).

4.1 Indices directs

4.1.1 Tache solaires

L'indice d'activité solaire le plus couramment utilisé est basé sur le nombre de taches solaires (Sun spot). Les taches solaires constituent des zones sombres sur le disque solaire (allant jusqu'à des dizaines de milliers de kilomètres et à six mois de durée de vie) caractérisées par un fort champ magnétique, ce qui conduit à une température plus basse (environ 4000 K contre 5800 K dans la photosphère) (Usoskin, 2017).

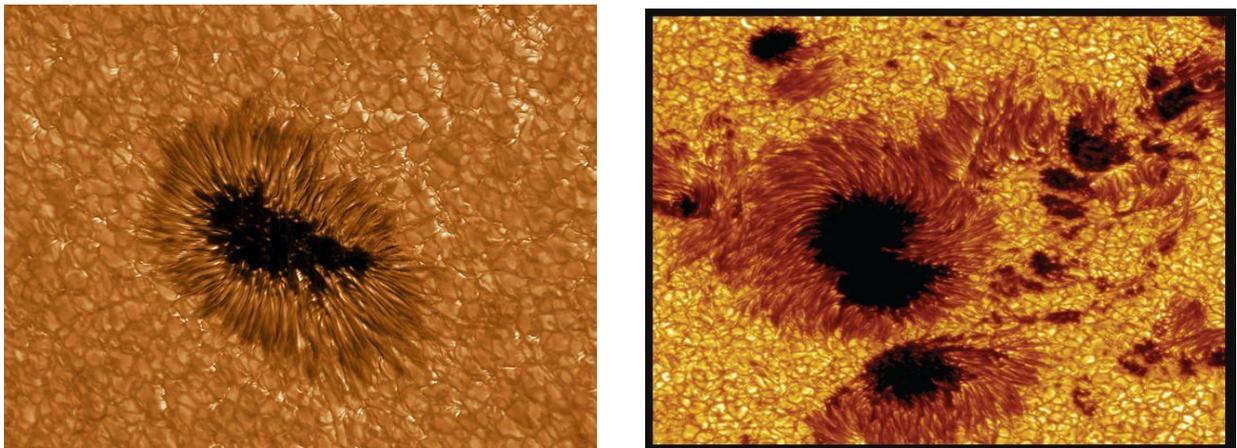


Figure 10 Image des taches solaire.

4.1.2 Nombre de tache solaire : WSN et ISN

Le concept du nombre de taches solaires a été mis au point par Rudolf Wolf de l'observatoire de Zurich au milieu du XIXe siècle. La série de taches solaires, initiée par lui, s'appelle la série Zürich ou Wolf Sunspot number (WSN). On définit ainsi le nombre relatif de taches solaires R_z comme suit :

$$R_z = k (10 G + N) \quad (9)$$

où G est le nombre de groupes de taches solaires, N est le nombre de taches solaires individuelles dans tous les groupes visibles sur le disque solaire et k désigne le facteur de correction individuel, qui compense les différences dans les techniques d'observation et les instruments utilisés par différents observateurs. Ce dernier est introduit pour normaliser les différentes observations les unes par rapport aux autres. La valeur de R_z est calculée chaque jour à partir d'une seule observation faite par l'observateur « primaire » (jugé comme l'observateur le plus fiable à un moment donné) pour la journée (Usoskin, 2017).

La production de la série WSN a pris fin à Zürich en 1982. Depuis, la série de taches solaires est régulièrement mise à jour en tant que série internationale de taches solaires (ISN) R_i , fourni par le Solar Influences Data Analysis Center en Belgique. La série internationale de nombre de taches solaires est calculée en utilisant la formule (9), mais avec des différences significatives par rapport au WSN.

Il existe également une série de nombres de taches solaires hémisphériques R_S et R_N , qui ne représentent que les taches dans les hémisphères solaires nord et sud, respectivement, avec $R_i = R_S + R_N$. Ces séries sont utilisées pour étudier l'asymétrie N-S de l'activité solaire (Usoskin, 2017).

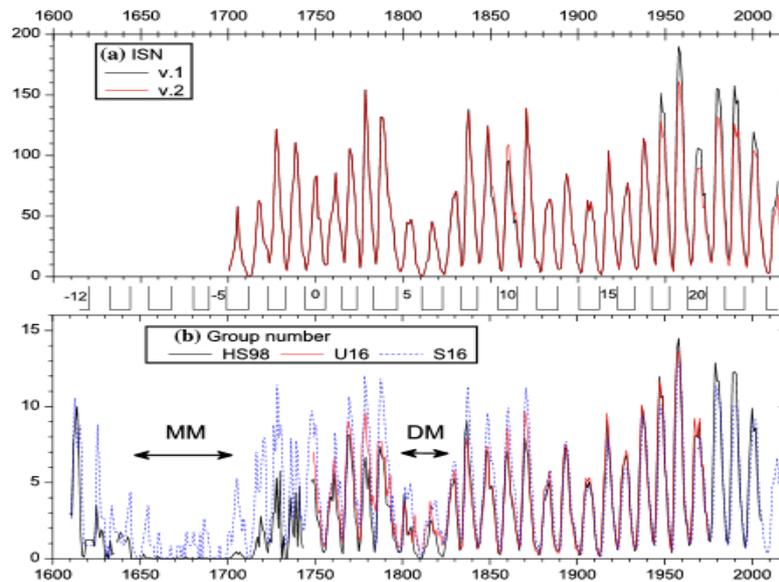


Figure 11 *Activité annuelle des taches solaires au cours des derniers siècles.***a.** Séries internationales de nombres de taches solaires versions 1 et 2 (cette dernière est mise à l'échelle avec un facteur de 0,6, voir SILSO, <http://sidc.be/silso/datafiles>).**b.** Nombre de groupes de taches solaires : HS98— (Hoyt et Schatten 1998) ; U16— (Usoskin et al. 2016b); S16— (Svalgaard et Schatten 2016). La numérotation des cycles standards (Zürich) est indiquée entre les panneaux. Les dates approximatives du minimum de Maunder (MM) et du minimum de Dalton (DM) sont indiquées dans le panneau inférieur.

4.1.3 Série de groupe de taches solaires (Group sunspot number, GSN)

Du fait la série WSN est de qualité inférieure avant les années 1850 et difficilement fiable avant 1750, il a fallu réévaluer les premières données sur les taches solaires. Ce travail est fait par Hoyt et Schatten (1996, 1998). Ils ont produit une nouvelle série de taches solaires appelées nombre de groupe de taches solaires (GSN - voir Figure. 11.b), incluant tous les enregistrements archivistiques disponibles.

Le Nombre de taches solaires de groupe quotidien R_g est défini comme suit (Usoskin, 2017):

$$R_g = \frac{12.08}{n} \sum_i k_i G_i \quad (10)$$

où G_i est le nombre de groupes de taches solaires enregistrés par le i ème observateur, k_i est le facteur de correction individuel de l'observateur, n est le nombre d'observateurs pour un jour en particulier, et 12,08 est un nombre de normalisation mettant à l'échelle les valeurs de R_g à R_z pour la période 1874-1976. Il semble que R_g est plus robuste que R_z ou R_i car il est basé sur des groupes de taches solaires plus facilement identifiables et n'inclut pas le nombre de taches individuelles (Usoskin, 2017).

4.1.4 Autres indices

- a) Un exemple d'indice synthétique d'activité solaire est l'indice d'éruption solaire, représentant l'activité d'éruption solaire. L'indice d'éruption journalière est produit par l'Université de Bogazici et il est disponible depuis 1936.
- b) Un indice physique traditionnel de l'activité solaire est lié au flux radioélectrique du Soleil dans la gamme de longueurs d'onde de 10.7 cm et est appelé le **F10.7**. Il représente le flux (en unité de flux solaire, $1\text{sfu} = 10^{-22} \text{ Wm}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$) d'émission radio solaire à une longueur d'onde centimétrique (Usoskin, 2017). Cet indice est corrélé avec le nombre de taches solaires.
- c) Un autre indice physique est l'indice coronal, qui est une mesure de l'irradiance du Soleil en tant qu'étoile dans la ligne verte coronale. Le calcul de l'indice coronal est basé sur des

observations d'intensités de couronne verte (ligne d'émission Fe XIV à une longueur d'onde de 530,3 nm) (Usoskin, 2017).

- d) La surface des taches solaires est considérée comme un indice physique représentant l'activité solaire. Cet indice donne la surface totale des taches visibles sur le disque solaire en unités de millièmes de l'hémisphère visible du Soleil, corrigée de la distorsion apparente due à la courbure de la surface solaire (Usoskin, 2017).
- e) Une grandeur importante est l'irradiance solaire, totale et spectrale (TSI, SSI) (Usoskin, 2017). Les variations d'irradiance sont physiquement liées à la variabilité magnétique solaire (Solanki, et al., 2000) et sont souvent considérées comme des manifestations de l'activité solaire, qui est d'une importance primordiale pour les relations Soleil-Terre (Usoskin, 2017).
- f) D'autres indices physiques incluent les observations spectrales du Soleil en tant qu'étoile, telles que l'indice CaII-K, le rapport noyau-aile Mg II basé dans l'espace comme indice d'UVI solaire et bien d'autres (Usoskin, 2017).

Tous les indices ci-dessus sont étroitement corrélés aux nombres de taches solaires à l'échelle du cycle solaire, mais peuvent représenter un comportement assez différent sur des échelles de temps courtes ou longues (Usoskin, 2017).

4.2 Indices indirects

Quelque fois, des mesures quantitatives des effets de la variabilité solaire sont aussi considérées comme des indicateurs de l'activité solaire. Ceux-ci ne sont pas liés à l'activité solaire elle-même, mais plutôt à son impact sur différents environnements. Par conséquent, ces indices sont dits indirects et peuvent être grossièrement divisés entre terrestres/géomagnétiques et héliosphériques/interplanétaires. Il y a aussi des indicateurs solaires indirects, qui sont utilisés pour étudier l'activité solaire dans l'ère pré-télescopique (Usoskin, 2017).

L'indicateur le plus courant de l'activité solaire est formé par les données sur les radionucléides cosmogéniques (par exemple ^{10}Be et ^{14}C), qui sont produits par les rayons cosmiques dans l'atmosphère terrestre (Usoskin, 2017).

4.2.1 Radio-isotope ^{14}C :

L'isotope cosmogénique le plus couramment utilisé est le radiocarbonate ^{14}C . Il s'agit d'un isotope de carbone instable dont la demi-vie $T_{1/2}$ est d'environ 5730 ans. Puisque la méthode du radiocarbonate est largement employée dans d'autres disciplines scientifiques, où la datation exacte est un problème clé (Par exemple, l'archéologie, la paléoclimatologie, la géologie), elle a été développée principalement pour cette tâche. La méthode de reconstruction de l'activité solaire, basée sur les données radiocarbonate, a été initialement développée comme un sous-produit des techniques de datation utilisées en archéologie et en géologie quaternaire dans le but d'améliorer la qualité de la datation, elle est produite après la captation d'un neutron thermique par l'azote atmosphérique (voir .eq.11) (Usoskin, 2017).



4.2.2 Isotope cosmogénique ^{10}Be :

L'isotope cosmogénique ^{10}Be est utile pour les études à long terme de l'activité solaire en raison de sa longue demi-vie d'environ $1,5 \times 10^6$ ans. Sa concentration est généralement mesurée dans des carottes de glace stratifiées permettant une datation indépendante. Le rapport $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ doit être mesuré avec exactitude mieux que 10^{-13} . L'isotope ^{10}Be est produit à la suite de la spallation de l'azote atmosphérique et l'isotope d'oxygène. Par la composante nucléonique de la cascade atmosphérique induite par les rayons cosmiques (Usoskin, 2017) .

5. Irradiance solaire

L'irradiance solaire, la puissance radiative du Soleil, est décrite en termes de ce qui est connu comme irradiance solaire totale et spectrale, TSI et SSI. Elles sont définies comme le flux radiatif solaire total et résolu en longueur d'onde au-dessus de l'atmosphère terrestre, normalisé à une UA (Unités de puissance par unité de surface, et puissance par unité de

surface et longueur d'onde, respectivement). En excluant l'interaction entre le rayonnement solaire et l'atmosphère terrestre et les modifications de la séparation Terre-Soleil. On avait longtemps émis l'hypothèse d'une relation entre l'activité solaire et la production radiative du Soleil. Cela n'a cependant pas été confirmé jusqu'à ce que des mesures satellitaires, exemptes des effets des fluctuations de la transmission atmosphérique. TSI et SSI sont régulièrement suivies depuis 1978 d'une succession de missions spatiales sans interruption (L.Yeo, 2014).

5.1 Irradiance solaire totale (TSI)

L'irradiance solaire totale (TSI) est l'énergie totale du Soleil intégrée sur l'ensemble du spectre et normalisée à l'unité astronomique. L'irradiance solaire totale change d'environ 0,1 % entre le maximum et le minimum d'activité solaire (Balmaceda, et al., 2007).

La surveillance de l'irradiance solaire totale de l'espace a commencé avec le lancement du vaisseau spatial NIMBUS 7 en novembre 1978. Depuis, différentes expériences à bord de satellites (HF sur Nimbus-7, ACRIM I sur SMM, ACRIM II sur UARS, VIRGO sur SOHO et TIM sur SORCE) ont suivi la soi-disant "constante solaire". Dans la Figure.12, les mesures quotidiennes d'irradiance de différents instruments sont tracées en fonction du temps. Un composé des données recueillies par ces instruments devaient être créées. En raison de la dégradation de l'instrument, les mesures originales doivent être corrigées pour les changements de sensibilité. Ceci n'est pas trivial, et il existe actuellement trois composites différents (voir les panneaux inférieurs de la Figure. 12.), PMOD, ACRIM et IRMB.

La caractéristique la plus évidente dans l'enregistrement des mesures d'irradiance est la variation du cycle solaire.

Étant donné que la série temporelle de l'irradiance mesuré est relativement courte, ne couvrant que moins de 4 cycles solaires, différentes approches ont été employées afin de modéliser ses variations sur des échelles de temps beaucoup plus longues qu'un cycle solaire. La construction de tels modèles nécessite une compréhension des mécanismes physiques des changements d'irradiance, et bien sûr doit reproduire les mesures directes (Balmaceda, 2007).

6. Irradiance solaire totale et nombre de taches solaires :

En comparant les moyennes annuelles et cycliques de TSI et SN pour une période de temps depuis 1611 dans le cas de GSN, la relation s'est avérée linéaire de la forme

(12)

$$TSI = SN \cdot a + b$$

où a et b sont des paramètres de régression (Balmaceda, 2007).

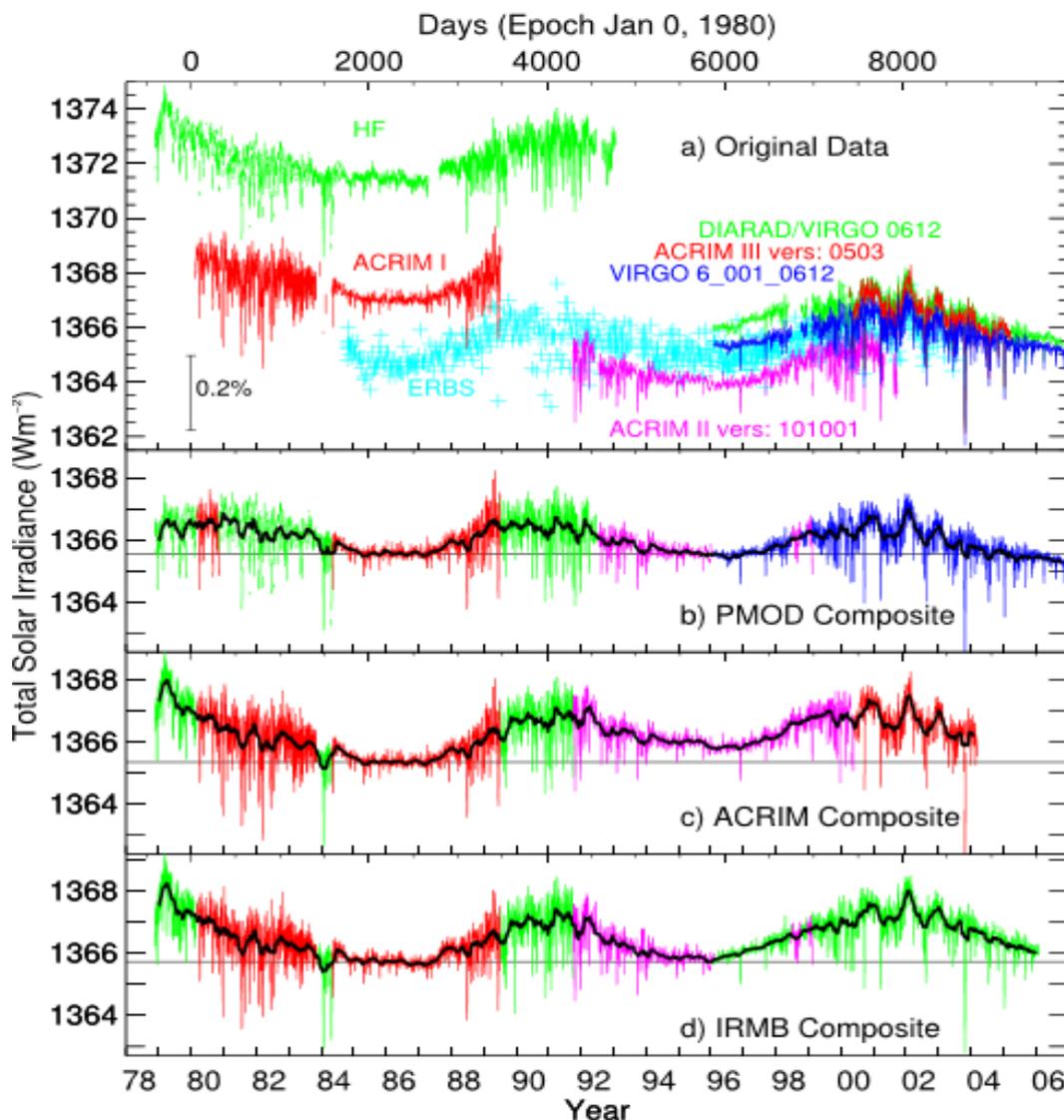


Figure 12 Les mesures de la TSI publiées par des différents radiomètres mis en orbite depuis 1978, et les enregistrements composites concurrents de TSI par b) PMOD, c) ACRIM et d) IRMB. (<http://www.pmodwrc.ch/pmod.php?topic=tsi/composite/SolarConstant>).

Chapitre II : Techniques d'analyses et bases de données.

1. Introduction

Toute série d'observations faite au cours du temps peut être considérée comme une série chronologique. Son analyse rend possible la compréhension et la prévision des valeurs futures. Les techniques d'analyse des séries chronologiques sont utilisées depuis longtemps dans différents domaines : astrophysique, médecine, économie, finance...

Dans ce chapitre, on présente les différentes bases de données utilisées concernant la TSI et les taches (SN, GSN), ainsi que les méthodes d'analyse utilisées dans le troisième chapitre.

2. Série chronologique

2.1. Un peu d'histoire

Historiquement, c'est en astronomie qu'apparaissent les premières séries chronologiques constituées volontairement à des fins d'analyses :

En 1772, Louis de Lagrange (astronome et mathématicien français, 1736-1813) inventa une méthode mathématique de détection et de mesure des périodicités, en 1927, Yule a découvert un modèle autorégressif d'ordre 2 qui représente assez bien le comportement des données de Wolfers sur les taches solaires, et entre 1940-1942, les premières contributions à l'étude statistique de tests d'auto-corrélation pour des séries gaussiennes ont été mis au point (Seddati, 2019).

2.2. Définition d'une série chronologique

Une série chronologique ou série temporelle est une suite finie de données quantitatives indexée par le temps. En d'autres termes, il s'agit d'une suite d'observations d'une famille de variables aléatoires réelles notées $(X_t, t \in \Gamma)$ où l'ensemble Γ est appelé espace des temps, qui peut être :

- a. **Discret** : Dans le cas où $\Gamma \in \mathbb{Z}$. A titre d'exemple, les dates d'observations sont le plus souvent équidistantes.
- b. **Continu** : L'espace des temps Γ est un intervalle de \mathbb{R} . Dans ce cas, on dispose (au moins potentiellement) d'une infinité d'observations issues d'un processus donné. Un tel processus est dit à temps continu. Les méthodes présentées dans ce cadre sont différentes de celles pour les séries chronologiques à temps discret. Exemples : signal radio, résultat d'un électrocardiogramme, etc. (Seddati, 2019).

2.3. Objectifs d'étudier les séries chronologiques

L'étude d'une série chronologique permet d'analyser, de décrire et d'expliquer un phénomène au cours du temps. L'un des objectifs principaux de l'étude d'une série chronologique est la prévision qui consiste à prévoir les valeurs futures (X_{t+h} où $h = 1, 2, 3, \dots$) de la série chronologique à partir de ses valeurs observées jusqu'au temps $t : X_1, X_2, \dots, X_t$ (Seddati, 2019).

3. Corrélation entre deux séries chronologiques

3.1. Stationnarité

Parmi les propriétés nécessaires des séries chronologiques est la stationnarité. Cette propriété est importante pour appliquer certains théorèmes sur la causalité

Si les propriétés suivantes sont vérifiées, la suite $\{X_t : t \geq 0\}$ est une suite stationnaire de seconde ordre (Fortier, 2013).

$$E[X_t] = \mu < \infty$$

$$E[X_t^2] < \infty$$

$$Var[X_t] = \sigma^2 \neq \infty$$

$$Cov(X_s, X_{s+t}) = Cov(X_{s-1}, X_{s-1+t}) = \dots = Cov(X_0, X_t) \text{ pour tout } s, t \in \mathbb{N}.$$

où

$E[X_t]$ est l'espérance, μ est la moyenne, $Var[X_t]$ est la variance, $Cov(X_s, X_{s+t})$ est la covariance, σ est l'écart type.

3.2. Coefficient de corrélation de Pearson

Soient deux variables aléatoires à valeur réelle x et y de moyenne nulle. Le coefficient de corrélation de Pearson, ou le coefficient de corrélation linéaire simple, est une normalisation de la covariance par le produit des écarts-type des variables.

$$r = \frac{cov(x, y)}{\sigma_x \sigma_y} \quad (1)$$

où

$$cov(x, y) = E(x - \mu_x)(y - \mu_y)$$

E est l'espérance, μ est la moyenne, σ est l'écart type.

➤ Quelques propriétés

- Le coefficient de corrélation a le même signe que la covariance, et aussi les mêmes interprétations.
- x et y sont indépendants.

- La corrélation d'une variable avec elle-même est $r_{xx} = 1$.
- Le coefficient de corrélation est indépendant des unités de mesure des variables.
- la valeur de r est comprise entre 1 et -1 ($-1 \leq r \leq 1$) (Figure 1):

Si $r = 1$, on dit que la liaison entre x et y est linéaire, positive et parfaite.

Ainsi, la connaissance de l'une des deux valeurs nous permet de déduire la valeur de l'autre.

Si $r = -1$, la liaison est linéaire mais elle est négative.

Si $r = 0$, les deux variables x et y sont indépendantes (Rakotomalala, 2015).

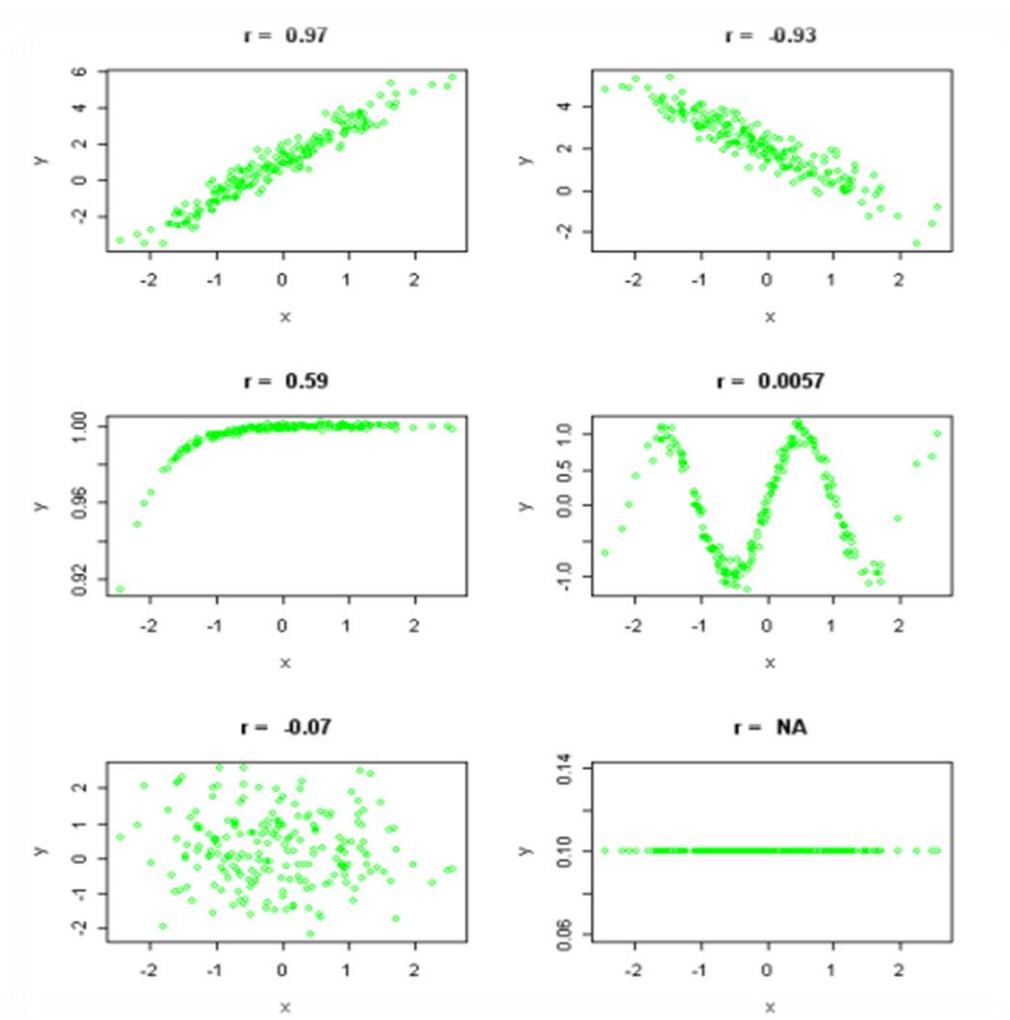


Figure 1 Coefficients de corrélation pour différents situations.

3.3. Coefficient de corrélation empirique

Soit un échantillon d'observations de taille n , le coefficient de corrélation empirique s'écrit sous la forme suivante :

$$\hat{r} = \frac{\sum_{i=1}^n [x_i - \bar{x}][y_i - \bar{y}]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2)$$

où

\bar{x}, \bar{y} sont les moyennes de x et y respectivement

On peut calculer le coefficient de corrélation sans connaître les détails des observations, en utilisant les quantités suivantes (Rakotomalala, 2015), (Cowan, 1998) :

$$\bar{x}, \bar{y}, \sum (x_i y_i), \sum (x_i \cdot x_i), \sum (y_i \cdot y_i)$$

4. Méthode des moindres carrés

La méthode des moindres carrés, indépendamment mise au point par Legendre et Gauss au début du dix-neuvième siècle, permet d'ajuster un modèle théorique, à un ou plusieurs paramètres, aux données de l'expérience.

Soit N le nombre de mesures, les paramètres θ optimaux dans le sens des moindres carrés sont ceux qui minimisent la quantité :

$$S(\theta) = \sum_{i=1}^N (y_i - f(x_i; \theta))^2 = \sum_{i=1}^N r_i^2(\theta)$$

où :

- les $r_i(\theta)$ sont les résidus du modèle.
- $S(\theta)$ est l'écart entre les données expérimentales et le modèle théorique ($y_i; f(x_i; \theta)$).

5. Régression linéaire simple

Le modèle de régression linéaire simple exprime une variable dépendante en fonction d'une seule variable indépendante, sous la forme mathématique suivante :

$$Y = a.x + b$$

où

Y la variable dépendante.

x la variable indépendante.

a, b les paramètres inconnus du modèle (les paramètres à estimer).

6. Logiciel de traitement de données OriginLab

OriginLab est un logiciel de création graphique et d'analyses de données. Il fait partie des logiciels qu'utilisent les ingénieurs et les chercheurs pour résoudre leurs problématiques professionnelles depuis 1992. Le siège d'OriginLab se situe à Northampton, Massachusetts, États-Unis. Les utilisateurs de ce logiciel peuvent travailler en utilisant trois langues : l'allemand, l'anglais et le japonais. Le site officiel d'OriginLab est : www.OriginLab.com .

Pour plus d'informations, d'aides, d'informations de références, d'exemples, des programmations et des licences d'installations, consulter le lien suivant : www.originlab.com/doc/.

7. Bases de données

7.1. SILSO (Sunspot Index and Long-term Solar Observations)

Le WDC-SILSO est une activité de la Direction Opérationnelle « Physique Solaire et Météo Spatiale » également connue internationalement sous le nom de Centre d'Analyse des Données

d'Influences Solaires (SIDC). Le SIDC est un département de l'Observatoire Royal de Belgique. Sa mission est de préserver, développer et diffuser la connaissance des variations à long terme de l'activité solaire.

Les travaux réalisés au WDC-SILSO sont sous la supervision de l'IAU (International Astronomical Union), de l'URSI (Union Radio-Scientifique Internationale) et de l'IAGA (International Association of Geomagnetism and Aeronomy). Ils donnent leur aval au World Data Center SILSO, en ce qui concerne l'utilité scientifique et la qualité des données sur les taches solaires produites et archivées par ce centre de données (Figure 2, 3 et 4) (voir wwwbis.sidc.be/silso/home).

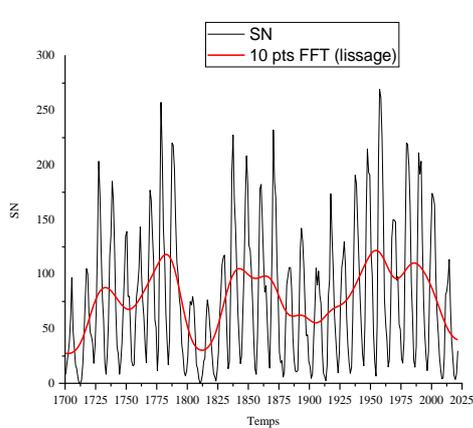


Figure 2 Données annuelles de SN

(SILSO 1700 – 2021).

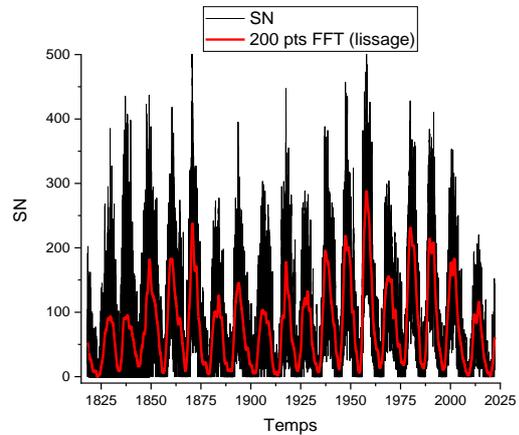


Figure 3 Données quotidiennes de la SN

(SILSO 1/1/1818 -31/3/2022).

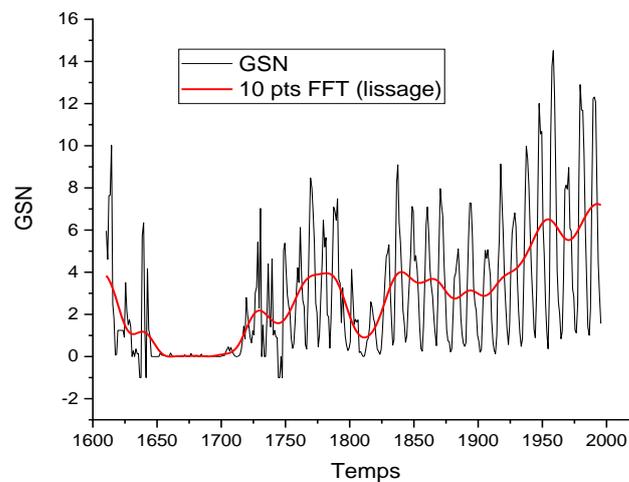


Figure 4 Données annuelles de GSN (1610-1995).

7.2. NOAA (SWPC)

Le Space Weather Prediction Center (SWPC), appelé Space Environment Center (SEC) jusqu'en 2007, est un laboratoire et un centre de service du US National Weather Service (NWS), qui fait partie de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), situé à Boulder, Colorado. Il surveille et prévoit en permanence l'environnement spatial de la Terre, fournissant des informations solaire-terrestre. Le SWPC Forecast Center exploité conjointement par la NOAA et USAF (United States Air Force), est le centre d'alerte national et mondial des perturbations pouvant affecter les personnes et les équipements travaillant dans l'environnement spatial. Il travaille avec de nombreux partenaires nationaux et internationaux qui fournissent des données et des observations (Figure 5) (voir www.swpc.noaa.gov).

Le Space Weather Prediction Center est l'un des neuf centres nationaux de prévision environnementale (NCEP) qui fournit une surveillance et une prévision en temps réel des événements solaires et géophysiques. Il mène des recherches en physique solaire-terrestre (héliophysique) et développe des techniques de prévision solaire et des perturbations géophysiques.

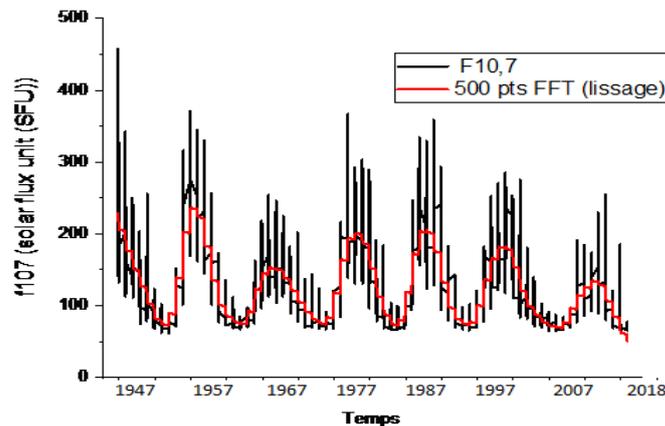


Figure 5 Flux radio solaire à 10.7cm (NOAA)

7.3. PMOD (WRC)

Le Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos/World Radiation Center (PMOD/WRC) est un centre d'étalonnage international pour les instruments de rayonnement

météorologique. Il développe des instruments pour une utilisation au sol et dans l'espace, et mène des recherches sur l'influence du rayonnement solaire sur le climat de la Terre.

Depuis sa création en 1907, le Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos (PMOD) étudie l'influence du rayonnement solaire sur le climat de la Terre. En 1926, l'Observatoire a rejoint l'Institut suisse de recherche sur le climat et la médecine de haute altitude de Davos et

fait depuis partie de cette fondation. A la demande de WMO (Organisation météorologique mondiale), le conseil fédéral a décidé en 1970 de financer un centre d'étalonnage pour la mesure des rayonnements (Figure 6) dans le cadre de la contribution de la Suisse au programme de surveillance météorologique mondiale de l'WMO. Suite à cette décision, le PMOD a été chargé d'établir et d'exploiter le WRC (World Radiation Center).

Activités principales

Le World Radiation Center maintient la norme primaire pour l'irradiance solaire consistant en un groupe de radiomètres absolus de haute précision. En réponse à de nouvelles demandes de l'WMO, un centre d'étalonnage pour les instruments de mesure du rayonnement atmosphérique à ondes longues a été créé en 2004. Depuis 2013, le centre européen d'étalonnage UV est également exploité par le World Radiation Center. Le World Radiation Center se compose aujourd'hui de quatre sections :

- Radiométrie Solaire (WRC-SRS)
- Radiométrie infrarouge (WRC-IRS)
- Turbidité atmosphérique (WRC-WORCC)
- Radiométrie ultra-violet (WRC-WCC-UV)

L'activité d'étalonnage est intégrée dans un système de qualité internationalement reconnu (ISO 17025) pour assurer une conformité fiable et traçable à la norme de qualité.

Le PMOD/WRC développe et construit des radiomètres qui sont parmi les plus précis de leur genre au monde, et qui sont utilisés aussi bien au sol que dans l'espace. Ces instruments sont également disponibles à l'achat et sont utilisés depuis longtemps par les services météorologiques du monde entier. De plus, un réseau mondial de stations de surveillance de la turbidité atmosphérique est équipé de radiomètres à filtre de précision développés par PMOD/WRC.

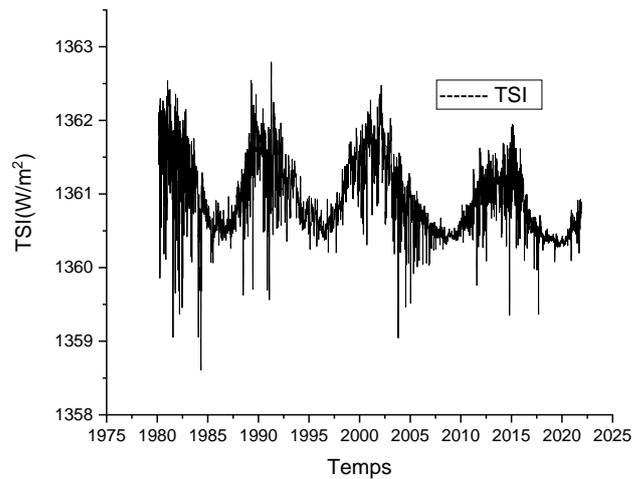


Figure 6 Données quotidiennes de la TSI (PMOD 1980-2021)

7.4. SOHO (Solar & Heliospheric Observatory)

C'est un projet de collaboration internationale entre l'ESA et la NASA pour étudier le Soleil depuis son noyau profond jusqu'à la couronne externe, ainsi que le vent solaire (Figure 7 et 8).

Le vaisseau spatial SOHO a été construit en Europe par une équipe industrielle dirigée par le maître d'œuvre Matra Marconi Space (aujourd'hui EADS Astrium) sous la direction générale de l'ESA, et il a été lancé le 2 décembre 1995. Les douze instruments à bord de SOHO ont été construits par des scientifiques européens et américains. Neuf des consortiums internationaux d'instruments sont dirigés par des chercheurs principaux européens (PI), trois par des PI américains. De grandes équipes d'ingénieurs et plus de 200 co-chercheurs de nombreuses institutions ont soutenu les PI dans le développement des instruments et dans la préparation de leurs opérations et de l'analyse des données. La NASA était responsable du lancement et est maintenant responsable des opérations de la mission. De grandes antennes paraboliques du monde entier qui forment le Deep Space Network de la NASA sont utilisées pour la liaison descendante et la commande de données. Le contrôle de mission est basé au Goddard Space Flight Center dans le Maryland. SOHO est composé de deux modules : le module de service constitue la partie inférieure de l'engin spatial et fournit l'alimentation, le contrôle thermique, le pointage et les télécommunications pour l'ensemble de l'engin spatial et le support des

panneaux solaires. Le module de charge utile se trouve au-dessus et abrite tous les instruments scientifiques. Voir sohowww.nascom.nasa.gov

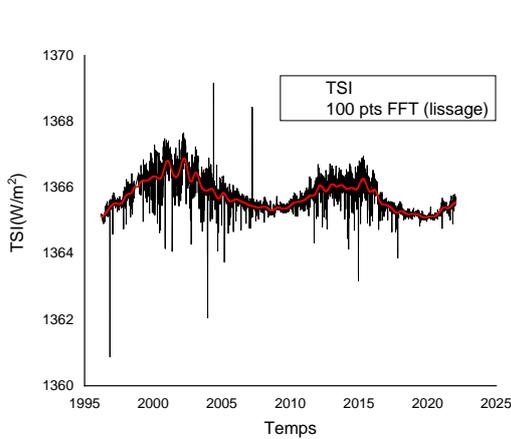


Figure 7 Variation TSI quotidienne
depuis 1995 VIRGO/SOHO

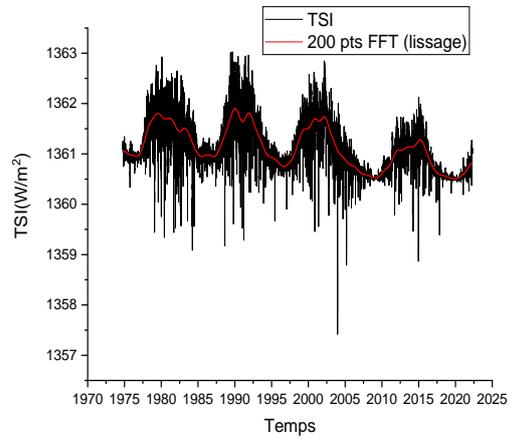


Figure 8 Variation TSI quotidienne
depuis 1974

7.5. ACRIMSAT (Active Cavity Radiometer Irradiance Monitor)

Le but de l'instrument ACRIM III (Active Cavity Radiometer Irradiance Monitor III) est d'étudier l'irradiance solaire totale (Figure 9). Le dispositif ACRIM III est embarqué sur un vaisseau spatial appelé ACRIMSAT. Le vaisseau spatial a été lancé le 20 décembre 1999 en tant que charge utile secondaire sur un lanceur Taurus. ACRIM III, troisième d'une série d'outils de surveillance solaire à long terme construits pour la NASA par le Jet Propulsion Laboratory, continuera d'étendre la base de données créée pour la première fois par ACRIM I, qui a été lancée en 1980 sur le vaisseau spatial SMM (Solar Maximum Mission).

Les objectifs scientifiques de la mission ACRIMSAT concernent la climatologie et la physique solaire. En effet, de petits changements soutenus de l'irradiance solaire totale, de l'ordre de 0,5 % par siècle, pourraient être le principal facteur du changement climatique sur des échelles de temps de plusieurs décennies.

L'étude d'un siècle de variation TSI nécessite l'envoi de nombreux instruments avec des missions qui se chevauchent pour maintenir la haute précision des données nécessaires pour suivre la variabilité solaire.

Sur les échelles de temps les plus courtes, des oscillations solaires globales de faibles degrés ont été détectées dans les données d'irradiance totale ACRIM I.

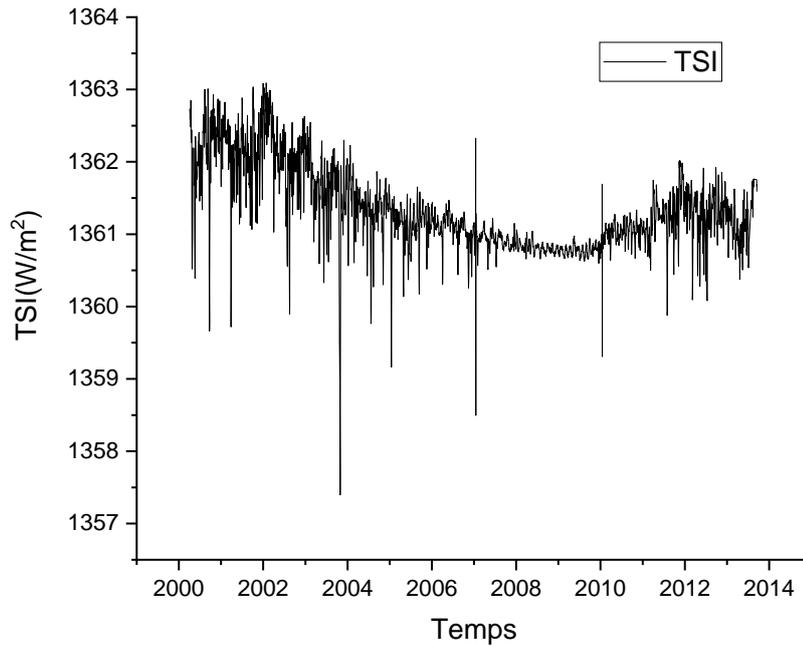


Figure 9 Variation quotidienne de la TSI de ACRIM3 (2000-2013)

Chapitre III : Reconstitution et prédiction de la TSI

1. Introduction

Dans ce troisième chapitre, la partie la plus importante de notre travail, on propose un modèle qui va nous permettre de reconstruire et de prédire la TSI en utilisant deux indicateurs d'activité solaire, le SN et le GSN.

Pour cela, on suit la procédure suivante : on commence par récupérer les données observationnelles sous forme de séries chronologiques, ensuite on propose une fonction de régression qui nous permet, en ajustant ces paramètres, de produire une courbe qui se rapproche le plus possible des données. La reconstitution de la TSI est obtenue en ajustant les SN et les GSN à la TSI, et la prédiction est obtenue en prolongeant la fonction ainsi obtenue.

2. Reconstitution et prédiction de la TSI en utilisant les SN

Pour reconstruire les valeurs de la TSI, un modèle utilisant les SN est proposé. Dans un premier temps, on trace les courbes en fonction du temps, et on cherche la fonction de régression qui convient pour chaque graphe. Après, on cherche une relation linéaire qui relie la SN à la TSI sous la forme :

$$TSI = a.SN + b \quad (1)$$

où :

a : est un coefficient qui ajuste la variation de SN.

b : est un coefficient qui ajuste l'amplitude de SN.

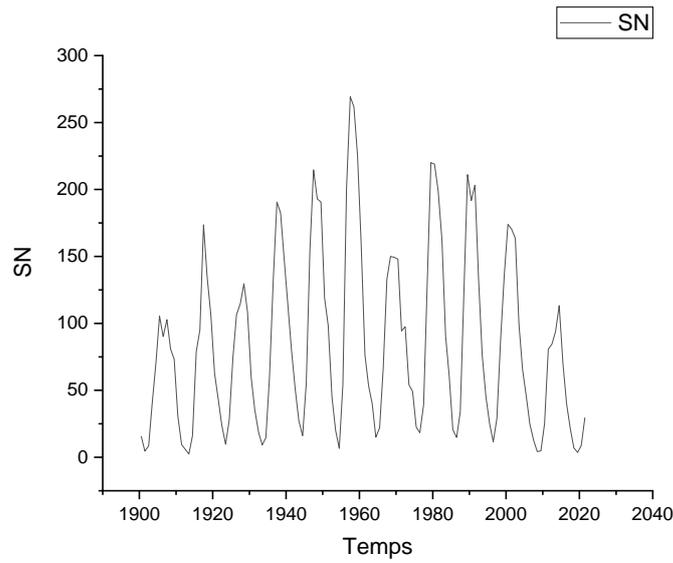


Figure 1 Variation de SN en fonction de temps.

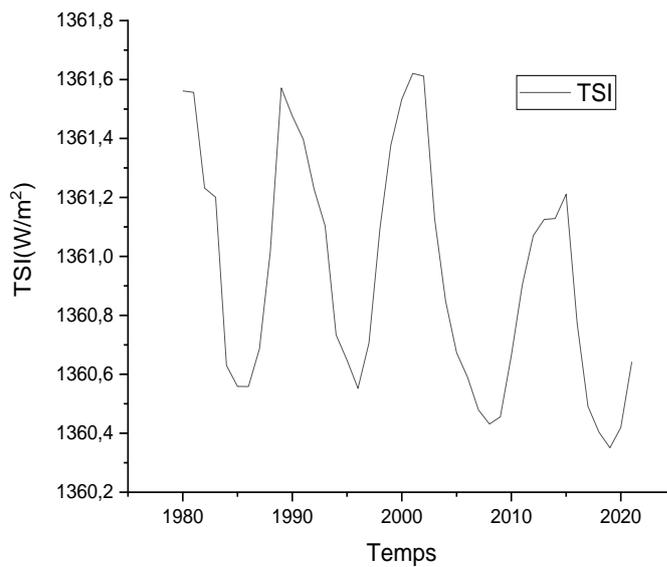


Figure 2 Variation de TSI en fonction de temps.

En traçant les courbes des SN (Figure 1) et de la TSI (Figure 2) en fonction du temps, on voit clairement qu'elles varient d'une façon périodique. Pour cette raison, on propose un modèle basé sur des fonctions sinusoidales, comme suit :

$$F(t) = A(t) \sin^2 \left(\frac{2\pi}{T(t)} t + \Phi \right) + F_0 \quad (1)$$

où :

$T(t)$ est la période, $A(t)$ est l'amplitude, Φ est la fréquence, F_0 permis le shift.

sachant que :

$$T(t) = T_0 + \sum_{i=1}^k \tau_i \frac{(t - t_0)^i}{t_0^i} \quad (2)$$

On a choisi d'écrire la période $T(t)$ sous cette forme (éq.2), car elle est variable et elle n'est pas exactement égale à 11 ans.

Et

$$A(t) = A_0 + \sum_{j=1}^L A_j \sin \left(2\pi \frac{t}{T_j} + \Phi_j \right) \quad (3)$$

On a choisi d'écrire l'amplitude $A(t)$ sous cette forme (éq.3), car elle n'est pas constante et elle varie en fonction de temps.

Le modèle que nous venons de proposer prend en compte la variation en amplitude à travers $A(t)$, et la variation de la période à travers $T(t)$. Tous les paramètres qui interviennent dans ce modèle, excepté $t_0=1955.5$ et $T(t) = 22$, sont déterminés avec la méthode des moindres carrées. Malheureusement, avec ce choix, la fonction $F(t)$ devient non périodique. Mais cela ne nous pas un grand problème, car l'objectif initial dans la reconstitution est de trouver un modèle qui permis un meilleur ajustement.

2.1. Reconstitution et prédiction avec PMOD

L'idée de départ est de supposé l'existence d'une relation linéaire simple entre les SN et la TSI. Le graphe de la Figure 3 représente la régression linéaire entre les SN et la TSI, et la Figure 4 représente la reconstitution et la prédiction de la TSI (PMOD) à base de données SN en fonction du temps. La reconstitution va de 1980 à 1950, soit environ trois cycles. En revanche, la prédiction va de 2022 à 2050, ce qui représente environ deux cycles.

Les courbes de la Figure 4 montrent que la TSI varie entre 1360.48 W/m² et 1361.91 W/m². Pour le cycle 20 (1964-1975), elle atteint sa valeur maximale (1361.39 W/m²) en 1969, par contre sa valeur augmente pour le cycle 19 (1953-1964) et atteint son maximum (1361.91 W/m²) en 1959.

En ce qui concerne le cycle 25 (2022 - 2031), celui qui est en cours, selon notre modèle, il va augmenter jusqu'à atteindre sa valeur maximale (1361.37 W/m²) en 2025. Pour le cycle 26 (2031 - 2043), son amplitude est encore plus importante et atteint sa valeur maximale (1361.85W/m²) en 2037.

On constate une excellente corrélation entre les deux courbes. Ceci est confirmé par le coefficient de corrélation de Pearson, que nous avons pu calculer avec logiciel OriginLab, dont la valeur est de : $r_1 = 0.88799$.

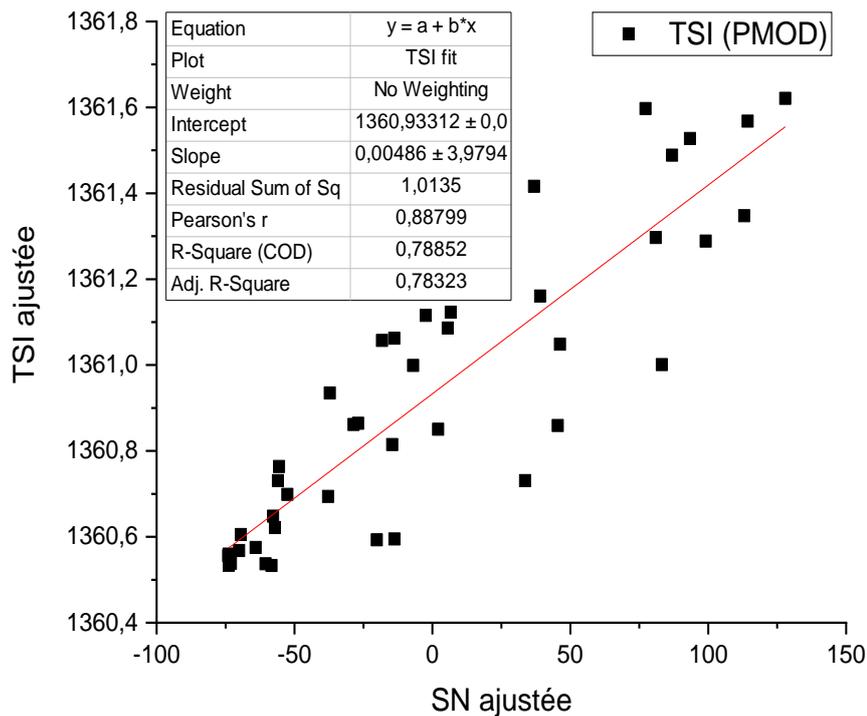


Figure 3 Régression linéaire entre SN ajustée et TSI ajustée.

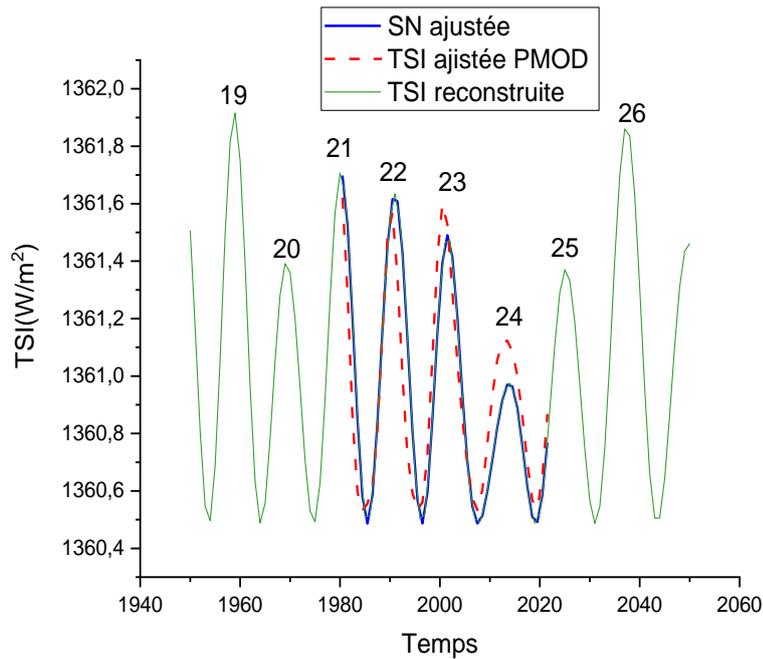


Figure 4 Reconstitution et prédiction de la TSI de PMOD en utilisant les données de SN

2.2. Reconstitution et prédiction avec ACRIM

Le graphe de la Figure 5 représente la régression linéaire entre SN et TSI, le coefficient de corrélation de Pearson entre les deux courbes de la figure 5 est de $r_2=0.87048$. La courbe de la Figure 6 représente la reconstitution et la prédiction de la TSI (ACRIM) à base des données de SN en fonction de temps, où la reconstitution commence à partir de 1978 jusqu'à 1950 ce qui représente environ trois cycles. D'autre part la prédiction commence à partir de 2022 jusqu'à 2050 ce qui représente environ deux cycles. Dans les résultats précédents on remarque dans la reconstitution de la TSI qu'elle varie entre 1365.4 W/m^2 et 1366.8 W/m^2 . Dans le cycle 20 (1964-1975) elle atteint sa valeur maximale (1361.28 W/m^2) en 1969, par contre sa valeur augmente pour le cycle 19 (1954-1964) et atteint son maximum (1366.8 W/m^2) en 1959.

D'autre part, pour la prédiction, on voit clairement que pour le cycle 25 (2022 et 2031) est en train d'augmenter jusqu'à atteindre sa valeur maximale de 1366.25 W/m^2 en 2025, et augmente encore plus pour le cycle 26 (2031 et 2043) et atteint son maximum (1366.74 W/m^2) en 2037.

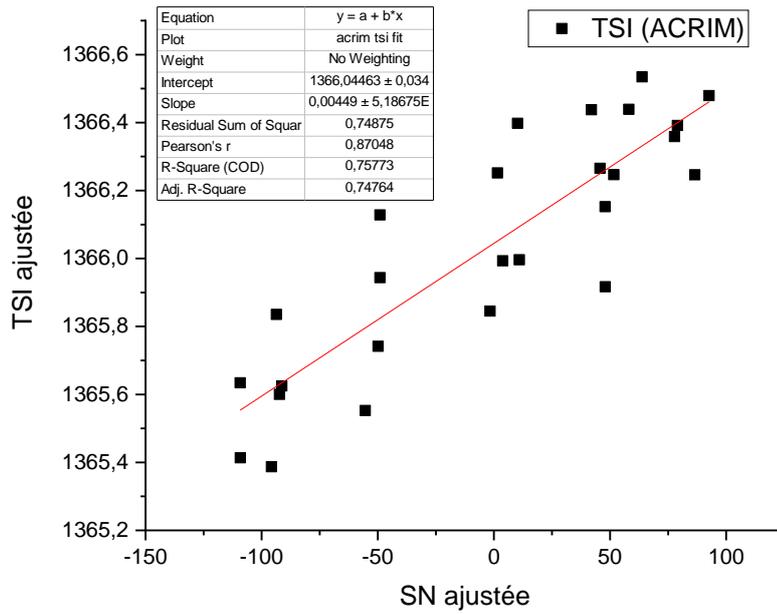


Figure 5 Régression linéaire entre SN ajustée et TSI ajustée.

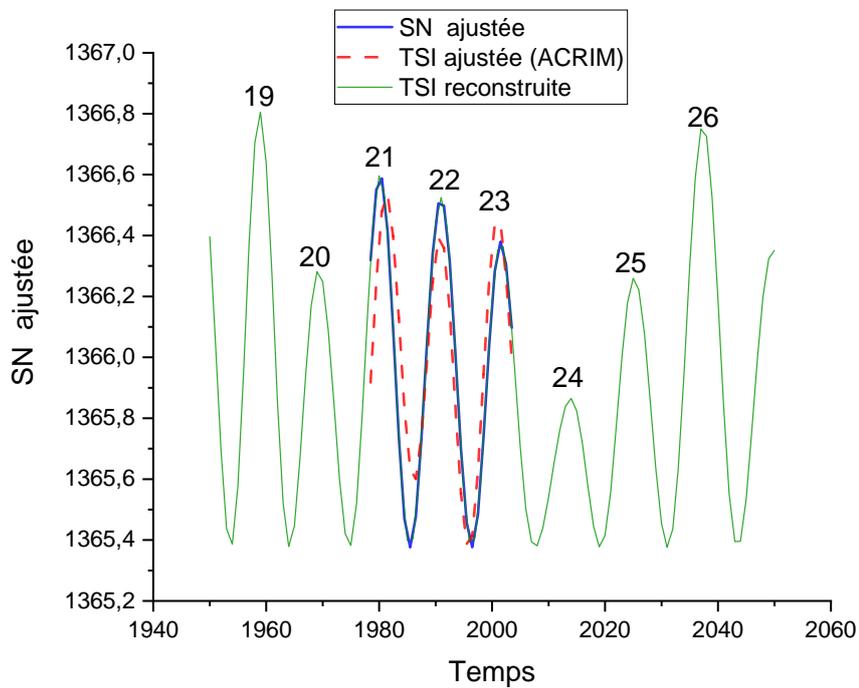


Figure 6 Reconstitution et prédiction de la TSI d'ACRIM en utilisant les données de SN.

3. Reconstitution de la TSI en utilisant les GSN

Dans cette partie, on reproduit la même procédure de reconstitution de la TSI vu dans la section précédente, mais en utilisant les données de la GSN cette fois au lieu des SN.

Il convient de souligner que le modèle utilisé dans la présente section demeure le même que celui de la section précédente (eq. (1), (2) et(3)), mais en modifiant les valeurs des paramètres.

3.1. Reconstitution avec PMOD

Le graphe de la Figure 7 représente la régression linéaire entre GSN et TSI et le graphe de la Figure 8 représente la reconstitution de la TSI (PMOD) basé sur les données de GSN en fonction de temps. La reconstitution commence à partir de 1981 jusqu'à 1940 ce qui représente environs trois cycles.

Dans les résultats précédents on remarque que la courbe de la TSI varie entre 1360.33 W/m^2 et 1361.57 W/m^2 . Pour le cycle 20 (1964-1975) elle atteint sa valeur maximale (1361.18 W/m^2) en 1970, par contre sa valeur augmente pour le cycle 19 (1954-1964) et atteint sa valeur maximale (1361.57 W/m^2) en 1958. Pour le cycle 18 (1943-1954), sa valeur maximale atteint 1361.56 W/m^2 en 1949.

Le coefficient de corrélation de Pearson pour les deux courbes GSN ajustée et TSI reconstituée de la Figure 7 est de $r_3 = 0.90293$, ce qui montre une corrélation excellente entre les deux courbes.

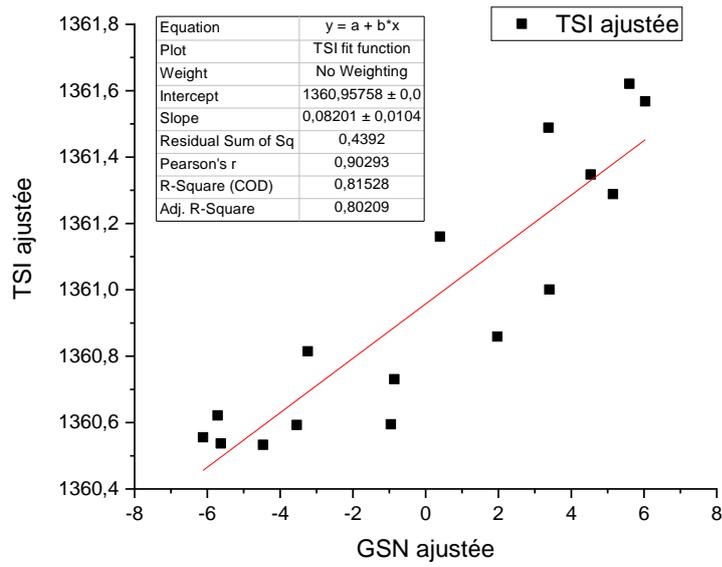


Figure 7 Régression linéaire entre GSN ajustée et TSI ajustée.

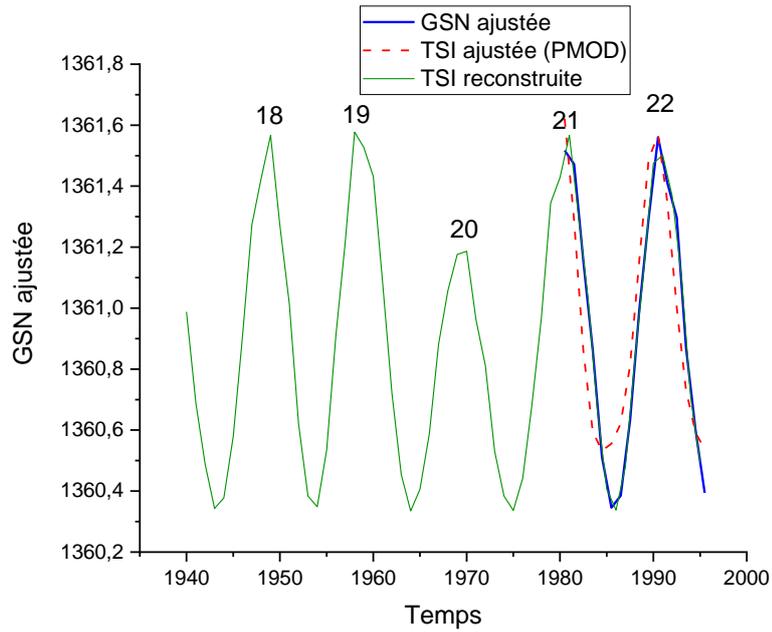


Figure 8 Reconstitution de la TSI de PMOD en utilisant les données de GSN.

3.2. Reconstitution avec ACRIM :

Le graphe de la Figure 9 représente la régression linéaire entre GSN et TSI et les graphes de la Figure 10 représente la reconstitution de la TSI (ACRIM) à base des données de GSN en fonction de temps où la reconstitution commence à partir de 1977 jusqu'à 1950 ce qui représente plus que deux cycles.

On remarque que la TSI varie entre 1365.35 W/m^2 et 1366.6 W/m^2 . Pour le cycle 20 (1964-1975) elle atteint sa valeur maximale (1366.21 W/m^2) en 1970, par contre sa valeur augmente dans le cycle 19 (1954-1964) et atteint son maximum (1366.60 W/m^2) en 1958.

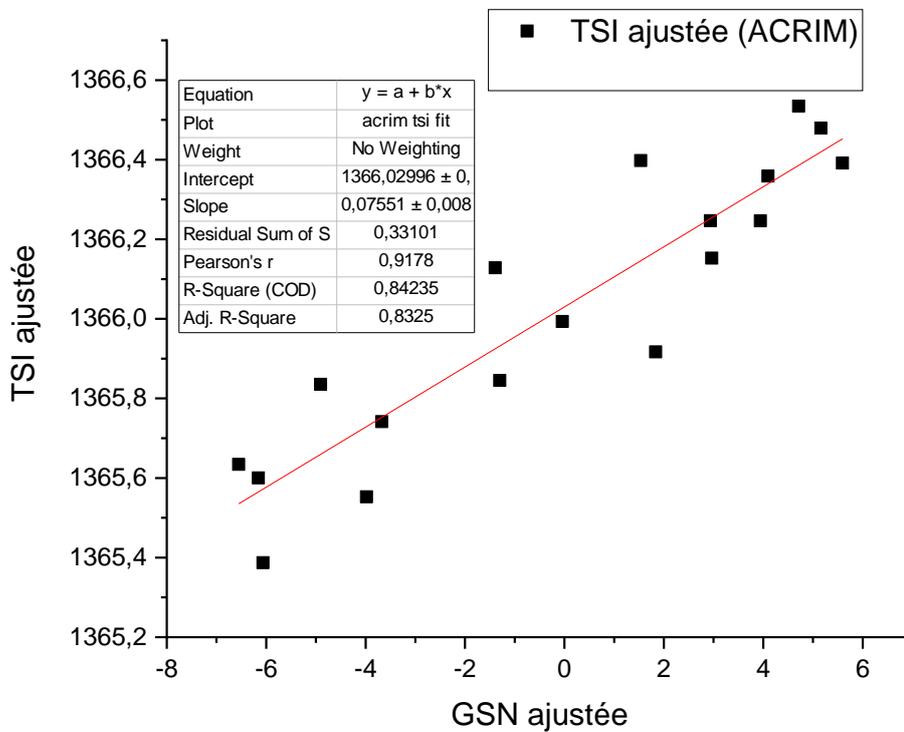


Figure 9 Régression linéaire entre GSN ajusté et TSI ajustée

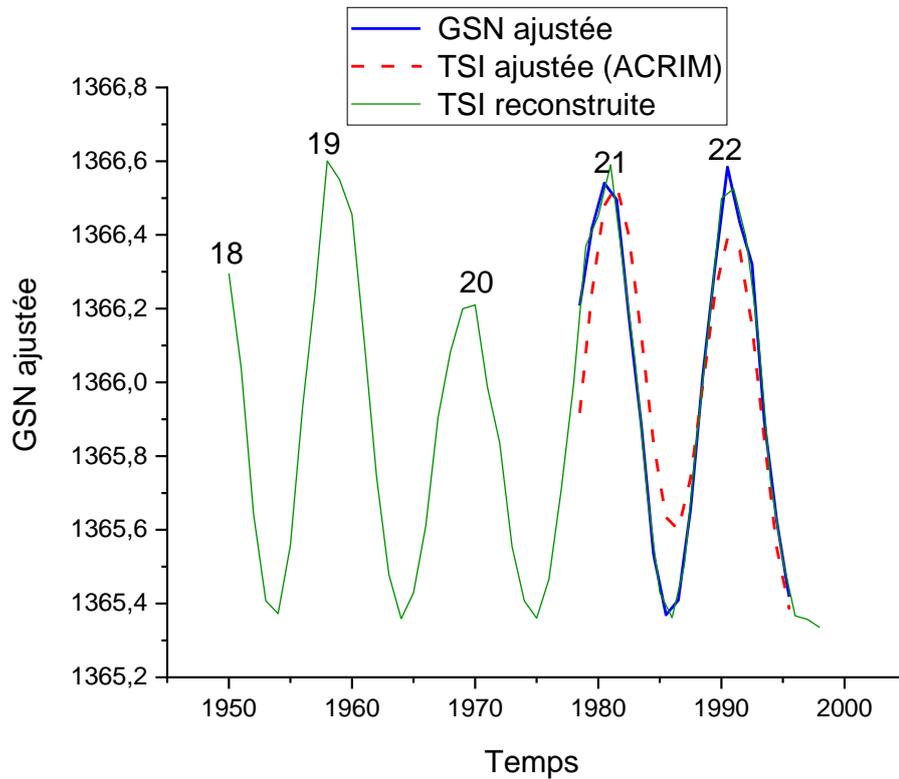


Figure 10 régression linéaire entre GSN ajustée et utilisant les données de GSN.

4. Discussion des résultats

Pour la reconstitution, d'après nos résultats, l'amplitude du cycle 20 est moins faible que celle du cycle 21 (observé), tandis que le cycle 19 (reconstruit), son amplitude est plus importante par rapport au cycle 20, et quasiment la même avec le cycle 21, (Nos résultats s'accordent avec d'autres recherches (Juan & YanBen, 2012), voir Figure 11).

On remarque l'existence d'une importante corrélation entre la TSI, d'une part, et les SN et les GSN, d'autre part. Cette corrélation est encore plus importante avec les données d'ACRIM.

Le tableau qui suit rassemble tous les coefficients de régression a et b pour chaque situation, ainsi que le coefficient de corrélation de Pearson.

SN	TSI	Période	a	b	r
Moyenne annuelle					
SN	Modèle (données de PMOD)	1950-2050	0.00486	1360.93024	0.88799
GSN	Modèle (données de PMOD)	1940-1995	0.00449	1360.95719	0.87048
SN	Modèle (données de ACRIM)	1950-2050	0.08201	1366.0313	0.90293
GSN	Modèle (données de ACRIM)	1950-1995	0.07551	1366.02456	0.9178

Pour la prédiction, selon le modèle utilisé, on voit clairement l'augmentation d'amplitude pour le cycle 25 comparé au cycle 24. Par ailleurs, elle continuera à augmenter pour le cycle 26. Cela est peut-être dû au cycle de 80 ans de Gleissberg.

Les études publiées ne s'accordent pas sur l'amplitude du cycle 25. Certaines prédisent qu'un cycle faible alors que d'autres prévoient un cycle fort.

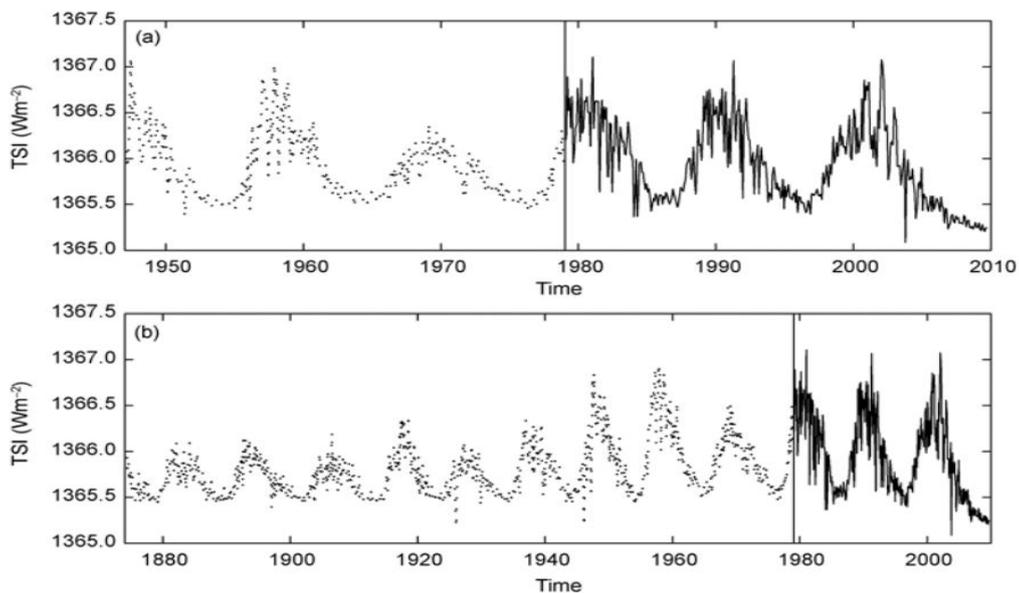


Figure 11 (a) Variation de la TSI entre (1947-1978) (la reconstitution en pointillées), et entre (1979-2009) (observation en lignes continues) ; (b) variation de la TSI entre (1874-1978) (la reconstitution en pointillées), et entre (1979-2009) (observation en lignes continues).

5. Conclusion

La modélisation des variations de l'irradiance solaire totale à long terme est essentielle en particulier pour le développement des modèles théoriques de la dynamo solaire, ainsi que pour l'étude de l'interaction Terre-Soleil.

Cependant, les données de l'irradiance solaire totale ne s'étendent que sur quelques cycles. À cet effet, le modèle développé ici présente l'avantage de répondre particulièrement bien à ce problème.

Dans le présent chapitre, nous avons reconstruit l'irradiance solaire couvrant les cycles 18, 19, 20 et 21, et nous avons tenté de prédire les cycles 25 et 26.

Les résultats obtenus sont satisfaisants, ce qui est confirmé par l'analyse de corrélation et l'accord de nos résultats avec les autres travaux.

Conclusion générale

L'objectif et le but ultime de cette étude est de proposer un modèle qui permet de reconstruire et de prédire l'irradiance solaire totale (TSI) en utilisant les taches solaires (SN) et les groupes de taches solaires (GSN). Les données de la TSI utilisées sont celles d'ACRIM et du PMOD.

Ces données d'observation ont été prises comme une base pour les reconstructions et les prédictions de la variation de l'irradiance solaire totale (TSI) pour quelques cycles en utilisant le modèle proposé.

Dans un premier temps, nous avons proposé une fonction d'ajustement pour les différentes données, basées sur des sinusoides, où les paramètres sont calculés avec la méthode de moindres carrés.

La corrélation observée entre, d'une part, les valeurs de la TSI (ACRIM et PMOD), et d'autre part, le nombre des taches solaires (SN et GSN), nous a permis de proposer aussi un modèle de régression linéaire entre ces deux ensembles.

Ainsi, nous avons déduit les meilleurs paramètres pour coïncider les SN et les GSN avec la TSI.

La reconstruction obtenue pour les cycles 18,19 et 20, est donc basée sur les données des SN et des GSN recalibrées. Par contre, pour la prédiction, nous avons prolongé la fonction d'ajustement des SN recalibrés. Ainsi nous avons remarqué que le cycle 25 devrait être plus important que le cycle précédent.

L'amplitude du cycle 26 devrait être selon notre modèle encore plus importante. Cela est dû probablement au fait qu'on est dans la phase ascendante du cycle 80 ans de Gleissberg.

Enfin, à travers tous les tests effectués, nous avons remarqué que la meilleure corrélation est obtenue entre les GSN et les données de TSI de ACRIM, plus que celle de PMOD.

Malheureusement, la série de GSN a été interrompue en 1995.

ABSTRACT

Context: Long-term records of solar radiative output are essential for understanding solar variability and past climate change. Unfortunately, measurements of total solar irradiance are only available for the last three decades, which necessitates reconstructing and predicting of this quantity on longer time scales using appropriate models.

Aims: In this work we present a physically consistent reconstruction and prediction of total solar irradiance. For the reconstruction, we are interested in the period from 1980 to 1950, and for the prediction, we are interested in the period from 2022 to 2050.

Method: We use data from the solar activity indices, sunspots (SN) and sunspot groups (GSN) to estimate the evolution and variation of the total solar irradiance over the reconstructed and predicted cycles.

The basic assumption is that the variations in total solar irradiance are correlated with the variation in SN and GSN. A linear relationship of the form $TSI = ax + b$ is assumed, where x represents the SN or GSN indices, a and b the fitting coefficients. A model based on sinusoidal functions was proposed to fit the data.

Results: The total solar irradiance was reconstructed for cycles 18, 19, and 20 and predicted for cycles 25 and 26. After performing several tests between the SN and GSN on the one hand, and the PMOD and ACRIM data on the other hand, we found a better correlation between the GSN and the ACRIM TSI. Unfortunately, the sunspot group series was interrupted in 1995.

On the other hand, the prediction made using the SNs indicates that the total solar irradiance increases for cycle 25, and will continue to increase for cycle 26. This may be due to the 80-year Gleissberg cycle.

Résumé

Le contexte : Les enregistrements à long terme de la production radiative solaire sont essentiels pour comprendre la variabilité solaire et les changements climatiques passés. Malheureusement, les mesures de l'irradiance solaire totale ne sont disponibles que pour les trois dernières décennies, ce qui nécessite de reconstruire et de prédire cette quantité sur des échelles de temps plus longues à l'aide des modèles appropriés.

Objectifs : Nous présentons dans ce travail une reconstruction et prédiction physiquement cohérente de l'irradiance solaire totale. Pour la reconstruction, on s'intéresse à la période allant de 1980 à 1950, et pour la prédiction, on s'intéresse à la période allant de 2022 à 2050.

Méthode : Nous utilisons les données des indices de l'activité solaire, taches solaires (SN) et groupe de taches solaires (GSN), pour estimer l'évolution et la variation de l'irradiance solaire totale.

L'hypothèse de base est que les variations de l'irradiance solaire totale sont corrélées avec la variation des SN et des GSN. On suppose l'existence d'une relation linéaire de la forme $TSI = a x + b$, où x représente les indices de SN ou de GSN, a et b les coefficients d'ajustement. Par ailleurs, on a proposé un modèle basé sur des fonctions sinusoïdales, où les paramètres sont ajustés aux différents ensembles de données en utilisant la méthode des moindres carrés.

Résultats : L'irradiance solaire totale a été reconstruite pour les cycles 18, 19, et 20, et prédite pour les cycles 25 et 26. Après avoir effectué plusieurs tests, entre d'une part, les SN et les GSN, et d'autre part, les données de PMOD et de ACRIM, nous avons constaté une meilleure corrélation entre les GSN et la TSI de ACRIM. Malheureusement, la série des groupes de taches solaires a été interrompu en 1995.

Par ailleurs, la prédiction réalisée en utilisant les SN indique que l'irradiance solaire totale augmente pour le cycle 25, et continuera à augmenter pour le cycle 26. Cela est peut-être dû au fait que nous sommes dans la phase ascendante du cycle de 80 ans de Gleissberg.

Annexe I :

Quelques paramètres solaires essentiels :

<i>masse solaire</i>	$M = 1.988500 \cdot 10^{24} \text{ kg}$
<i>Volume</i>	$V = 1412000 \cdot 10^{12} \text{ Km}^3$
<i>Rayon volumique moyen</i>	$R = 695.700 \text{ Km}$
<i>luminosité solaire</i>	$L = 382.8 \cdot 10^{24} \text{ (J/s)}$
<i>accélération de la pesanteur à la surface solaire</i>	$g_s = 274.0 \text{ m/s}^2$
<i>Ellipticité</i>	$e = 0.00005$
<i>Magnitude apparente $V(1,0)$</i>	$M = -26.74$
<i>Magnitude absolue</i>	$M = +4.83$
<i>Type spectral</i>	$G2V$
<i>Composition de la photosphère</i>	<i>Principaux éléments :</i> $H - 90.965\%, He - 8.889\%$
	<i>Mineurs éléments :</i> $O - 774, C - 330, Ne - 112, N - 102, Fe - 43, Mg - 35, Si - 32, S - 15$
<i>Température effective</i>	5772 K
<i>Température au sommet de la photosphère</i>	4400 K
<i>Température au bas de la photosphère</i>	6600 K
<i>Épaisseur de la photosphère</i>	$\sim 500 \text{ km}$
<i>Épaisseur de la chromosphère</i>	$\sim 2500 \text{ km}$
<i>Champ polaire</i>	$1-2 \text{ Gauss}$
<i>Champ des taches solaires</i>	3000 Gauss

(Williams, s.d.)

Annexe II : Paramètres d'ajustement

Ci-après, les paramètres d'ajustement obtenus par la méthode des moindres carrés pour les quatre séries chronologiques exploitées dans ce mémoire.

Groupes de taches solaires (GSN)

<i>Paramètre</i>	<i>Valeur</i>	<i>Paramètre</i>	<i>Valeur</i>	<i>Paramètre</i>	<i>Valeur</i>
A0	0,53522	T1	0,63886	t0	1955,5
A1	0,63886	T2	39,30918	f	-2,3692
A2	-5,14746	T3	59,92752	f1	15,49264
A3	33,37086	T4	79,2163	f2	-6,85011
A4	87,12903	T5	98,12104	f3	-0,87011
A5	67,21863	d	-1,50252	f4	1,54381
F0	0,52933	T	22	f5	2088741,02 861
to0	-0,01047	to1	0,50941	to2	0,00217
to3	-0,00139				

Fonction d'ajustement de GSN :

$$\begin{aligned}
 & (A0 + A1 * \sin(2 * \pi * x/T1 + f1) + A2 * \sin(2 * \pi * x/T2 + f2) \\
 & + A3 * \sin(2 * \pi * x/T3 + f3) + A4 * \sin(2 * \pi * x/T4 \\
 & + f4) + A5 * \sin(2 * \pi * x/T5 + f5)) * \sin(2 * \pi \\
 & * x/((T + to0) + to1 * (x - t0 - d)/(T + to0) + to2 \\
 & * (x - t0 - d)^2/(T + to0)^2 + to3 * (x - t0 \\
 & - d)^3/(T + to0)^3) + f)^2 + F
 \end{aligned}$$

Taches solaire (SN)

<i>Paramètre</i>	<i>Valeur</i>	<i>Paramètre</i>	<i>Valeur</i>	<i>Paramètre</i>	<i>Valeur</i>
A0	170,89596	T1	19,8738	t0	1955,5
A1	20,44816	T2	39,91568	f	-0,65669
A2	-32,54648	T3	59,94456	f1	-8,61718
A3	33,4982	T4	78,83057	f2	-1,12646
A4	44,42527	T5	99,09309	f3	0,26918
A5	40,21187	d	-1,03049	f4	3,01725
F0	7,35453	T	22	f5	2,05631
to0	0,06746	to1	0,51343	to2	0,00369
to3	$-6,89203E^{-4}$				

Fonction d'ajustement de SN :

$$\begin{aligned}
 & (A0 + A1 * \sin(2 * \pi * x/T1 + f1) + A2 * \sin(2 * \pi * x/T2 + f2) \\
 & + A3 * \sin(2 * \pi * x/T3 + f3) + A4 * \sin(2 * \pi * x/T4 \\
 & + f4) + A5 * \sin(2 * \pi * x/T5 + f5)) * \sin(2 * \pi \\
 & * x / ((T + to0) + to1 * (x - t0 - d) / (T + to0) + to2 \\
 & * (x - t0 - d)^2 / (T + to0)^2 + to3 * (x - t0 \\
 & - d)^3 / (T + to0)^3) + f)^2 + F
 \end{aligned}$$

Irradiance solaires totales (TSI) PMOD

<i>Paramètre</i>	<i>Valeur</i>	<i>Paramètre</i>	<i>Valeur</i>	<i>Param</i>	<i>Valeur</i>
<i>a1</i>	0,80592	<i>t2</i>	9,2483	<i>aa</i>	0,49399
<i>a2</i>	-0,14441	<i>t3</i>	22,04213	<i>x0</i>	1970,60526
<i>a3</i>	0,15488	<i>t4</i>	8,9724	<i>y</i>	1360,53292
<i>a4</i>	0,6273	<i>t5</i>	8,77916	<i>f1</i>	1351,24022
<i>a5</i>	0,67552	<i>t6</i>	9,23097	<i>f2</i>	1335,59106
<i>a6</i>	-0,15742	<i>t7</i>	9,22637	<i>f3</i>	1410,67971
<i>f4</i>	1351,11988	<i>f5</i>	1392,93 683	<i>f6</i>	1445,03887
<i>f7</i>	1137,29018	<i>a7</i>	-0,23752		

Fonction d'ajustement de TSI (PMOD) :

$$\begin{aligned}
 &(a1 + a2 * \sin(2 * \pi * x/t2 + f2) + a3 * \sin(2 * \pi * x/t3 + f3) + a4 \\
 &\quad * \sin(2 * \pi * x/t4 + f4) + a5 * \sin(2 * \pi * x/t5 + f5) + a6 \\
 &\quad * \sin(2 * \pi * x/t6 + f6) + a7 * \sin(2 * \pi * x/t7 + f7)) * \sin(2 \\
 &\quad * \pi * x/(22 + aa * (x - x0)/22) + f1)^2 + y
 \end{aligned}$$

Irradiance solaires totales (TSI) ACRIM

<i>Paramètre</i>	<i>Valeur</i>	<i>Paramètre</i>	<i>Valeur</i>
<i>a1</i>	683,28027	<i>x0</i>	-1385,23471
<i>a2</i>	0,12252	<i>xc</i>	0,22855
<i>a3</i>	-0,95853	<i>f1</i>	-0,37987
<i>aa</i>	-0,00969	<i>y</i>	683,17026

Fonction d'ajustement de TSI (ACRIM) :

$$a1 + a2 * \sin(2 * \pi * x / (xc + 22)) + (a3 * \sin(2 * \pi * x / (22 + aa * (x - x0) / 22) + f1)^2) + y$$

Bibliographie

Available at: www.OriginLab.com

[Accès le 2022].

Axford., W., 1985. *The solar wind*. s.l.:Springer, Dordrecht.

Balmaceda, L. A., 2007. *Solar variability and solar irradiance reconstructions on time scales of decades to centuries..* Berlin: s.n.

Balmaceda, L., Krivova, N. & Solanki, S., 2007. Reconstruction of solar irradiance using the Group sunspot number.. *Advances in Space Research*, 40(7), pp. 986-989.

Bely, P.-Y., Christian, C. & Roy, J.-R., 2008. *250 réponses à vos questions sur l'astronomie*. s.l.:s.n.

Boulder, U. O. C., 2020. *solar radiation & climate experiment*, Colorado: s.n.

Boumelit, Z. L., 2015. *Activité solaire, vent solaire et géomagnétisme durant les cycles solaire N° 23 et 24*. Alger(Sciences de la terre,géophysique.): USTHB.

Cowan, G., 1998. *Statistical data analysis*. Oxford: Oxford university press.

Fortier, S., 2013. Les modèles MA, AR et ARMA multidimensionnels : estimation et causalité. *Fortier, S. (2013). Les modèles MA, AR et ARMA multidimCaMUS (Cahiers Mathématiques de l'Université de Sherbrooke)*, Volume 4, pp. 112-136.

Juan, Z. & YanBen, H., 2012. Sun's total irradiance reconstruction based on multiple solar indices. *Science China Physics, Mechanics and Astronomy*, 55(1), pp. 179-186.

L.Yeo, K., 2014. Analysis and modeling of solar irradiance variations.. *arXiv preprint arXiv:1412.3935*.

Lilensten, J. & Blelly, P., 2021. *Du soleil à la Terre: Aéronomie et météorologie de l'espace..* s.l.:EDP Science.

Louis. Zerbo, J., 2012. *ACTIVITE SOLAIRE, VENT SOLAIRE, GEOMAGNETISME ET IONOSPHERE EQUATORIALE..* Ouagadougou: Université de Ouagadougou.

Malherbe, J.-M., 2012. Inversions du champ magnétique solaire: observations. *hal-00787809*, Issue 2, p. 22.

Rakotomalala, R., 2015. *Analyse de corrélation*. Lyon: université de lumière Lyon.

Seddati, L., 2019. *Séries chronologiques séries chronologiques*. Fes: s.n.

Solanki, S. K., Schüssler, M. & Fligge, M., 2000. Evolution of the Sun's large-scale magnetic field since the Maunder minimum.. *Nature* , 408(6811), pp. 445-447..

Thomas, J. H. & Weiss, N. O., 2008. *Sunspots and starspots*.. New York: Cambridge University Press.

Usoskin, I. G., 2017. A history of solar activity over millennia. *Living Rev. Sol. Phys*, 14(1), pp. 1-97..

Webb, D. & Howard, T., 2012. Coronal Mass Ejections: Observations. *Living Rev. Sol. Phys.*, 9(1), pp. 1-83.

Williams, D. R., s.d. *Sun Fact Sheet*. [En ligne]

Available at: <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/sunfact.html>

[Accès le 2022].

Xavier, V., 2002. *Les échelles de la turbulence dans l'ionosphère des*. ORLEANS(Physique): UNIVERSITE D'ORLEANS.

