



UNIVERSITÉ DE LILLE
FACULTE DE MÉDECINE HENRI WAREMBOURG
Année : 2020

THÈSE POUR LE DIPLOME D'ÉTAT
DE DOCTEUR EN MÉDECINE

**Impact de l'Activité Solaire en Médecine :
Etude sur la crise d'épilepsie**

Présentée et soutenue publiquement le jeudi 12 Mars 2020 à 16 heures
au Pôle Formation

Par Morgan TORILLIOUX

JURY

Président :

Monsieur le Professeur Eric Wiel

Assesseurs :

Monsieur le Professeur Philippe Derambure

Monsieur le Docteur Jean-Marie Renard

Madame le Docteur Leslie Charbonnier

Directrice de Thèse :

Madame le Docteur Marie Girot

Avertissement

***La Faculté n'entend donner aucune approbation aux opinions émises dans les thèses :
celles-ci sont propres à leurs auteurs.***

SOMMAIRE

I] RESUME.....	6
II] INTRODUCTION	8
III] ASTRONOMIE	12
A) LE SOLEIL	12
1) Caractéristiques.....	12
2) Atmosphère solaire	12
3) Vent solaire.....	14
B) ACTIVITE SOLAIRE	14
1) Cycle solaire	14
2) Taches solaires.....	15
3) Éruptions solaires	20
4) Activité Géomagnétique.....	23
5) Autres conséquences de l'activité solaire	28
6) En résumé	29
IV] INFLUENCE DE L'ACTIVITE SOLAIRE EN MEDECINE : REVUE DE LITTERATURE.....	32
A) Impact sur les paramètres biologiques	33
B) Cardiologie	34
C) Neurologie.....	39
D) Psychiatrie.....	41
E) Infectiologie	42
F) Obstétrique	44
G) Pédiatrie.....	44
V] INFLUENCE DE L'ACTIVITE SOLAIRE SUR LA CRISE D'EPILEPSIE : REVUE DE LITTERATURE	46
VI] INFLUENCE DE L'ACTIVITÉ SOLAIRE DANS DES DOMAINES AUTRES QUE LA MÉDECINE	50
VIII] INFLUENCE DE L'ACTIVITE SOLAIRE SUR LES CRISES D'ÉPILEPSIES : ETUDE SUR 11924 CONSULTATIONS AUX URGENCES SUR UNE PERIODE DE NEUF ANS.....	54
A) OBJECTIFS.....	54

B) MATERIELS ET METHODE	55
1) Population	55
2) Données de l'activité solaire	57
3) Méthodologie statistique	59
C) RESULTATS	60
1) Description de la population.....	60
2) Données de l'activité solaire	62
3) Calculs et analyses des coefficients de corrélation de Pearson	63
4) Description annuelle des paramètres.....	65
D) DISCUSSION.....	67
1) Originalité et force.....	67
2) Limites et biais	71
3) Hypothèses physio-pathologiques	74
4) Autres facteurs environnementaux favorisant les crises épileptiques	79
E) IMPLICATION	85
CONCLUSION	86
BIBLIOGRAPHIE	88

I] RESUME

Introduction : L'activité solaire, représentée, entre autres, par la variation temporelle et cyclique du nombre de taches solaires et d'éruptions solaires, provoque une modification de l'activité géomagnétique. De nombreuses études ont montré l'influence de cette activité solaire dans différentes pathologies médicales. Parallèlement, la survenue de crise épileptique pourrait, en partie, être liée à des facteurs de risques environnementaux tels que ceux liés à la météorologie terrestre par exemple.

Objectif : Après avoir défini la notion d'activité solaire puis réalisé une revue de littérature sur l'impact de cette activité sur des pathologies médicales et dans d'autres domaines non médicaux dans laquelle il sera discuté des mécanismes physio-pathologiques appliqués à chacun de ces éléments ; il s'agissait de déterminer, par le biais d'une étude dédiée, si l'activité solaire pouvait représenter un facteur de risque environnemental sur la survenue de crise d'épilepsie.

Méthode : Au travers d'une étude rétrospective menée sur plus de huit ans, nous avons corrélé de façon quotidienne, 11924 consultations médicales aux Urgences Adultes et Enfants du CHU de Lille pour motif de crises d'épilepsies, aux données de l'activité solaire représentée par le nombre de taches solaires, d'éruptions solaires et par l'indice d'activité géomagnétique Ap.

Résultats : Il a été retrouvé des corrélations statistiquement significatives entre le nombre de taches solaires et le nombre total de consultations médicales pour crise d'épilepsie [$r = 0.2484$; $p\text{-value} = 0.0101 < 0.05$] et entre le nombre d'éruptions solaires et le nombre total de consultations médicales pour crise d'épilepsie [$r = 0.2364$; $p\text{-value} = 0.0147 < 0.05$]. La corrélation statistiquement significative la plus forte est retrouvée entre le nombre de taches solaires et le nombre de consultations médicales pour crise d'épilepsie partielle [$r = 0.5467$; $p\text{-value} = 1.597 \cdot 10^{-9} < 0.05$].

Discussion : Le mécanisme biologique physio-pathologique sous-jacent, le plus discuté dans la littérature, serait en lien avec l'hormone mélatonine qui serait affectée négativement par la forte activité solaire. Or, cette hormone serait anti-convulsante.

Conclusion : La forte activité solaire pourrait représenter un facteur de risque environnemental sur la survenue de crise d'épilepsie. Cependant, d'autres études sont nécessaires pour étayer les présents résultats avant d'adopter de possibles stratégies de prévention basées sur la météorologie spatiale.

II] INTRODUCTION

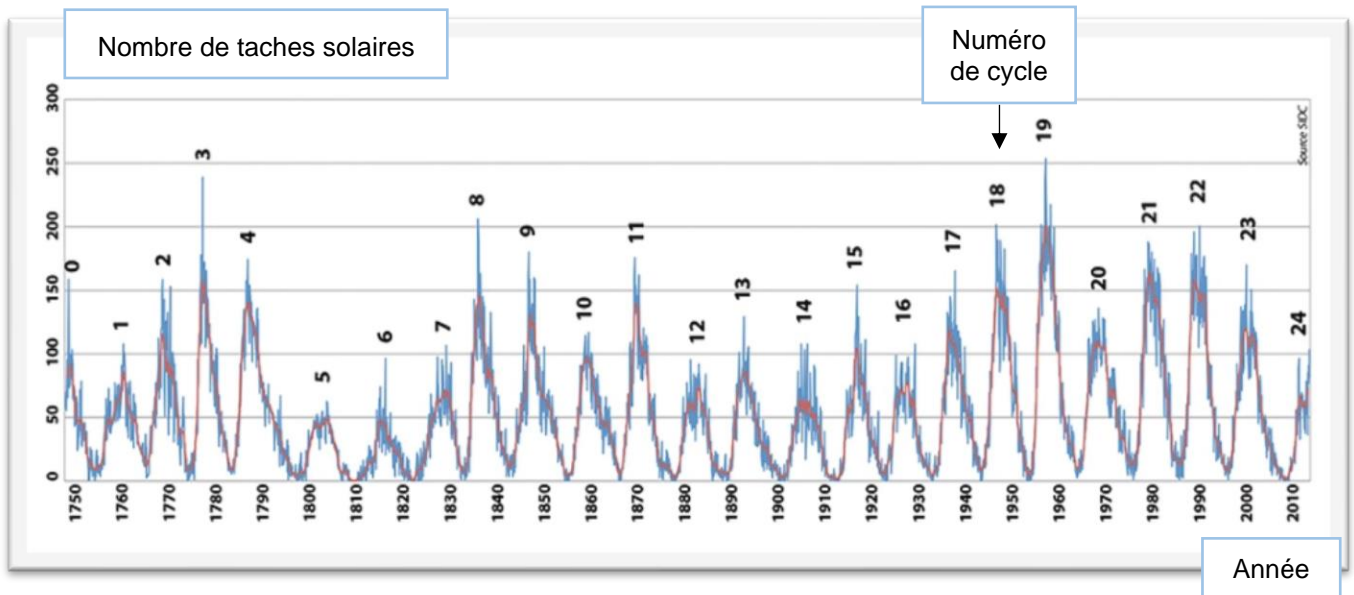
L'activité solaire est représentée, entre autres, par le nombre d'éruptions solaires et de taches solaires. De cette activité, en résulte une projection massive de radiations (rayons X, UV), de particules chargées électriquement (électrons et protons) et de vent solaire en direction de la Terre. Ces derniers mettent environ trois à quatre jours (selon *Comins*¹) à plusieurs jours (selon *Menzel*⁵⁵) à atteindre la magnétosphère terrestre. Bien que notre planète soit protégée par cette dernière, certaines conditions permettent la pénétration de l'énergie solaire sur l'environnement terrestre.

En conséquence, cette activité solaire provoque une modification du champ magnétique terrestre. On parle alors d'activité géomagnétique. Cette activité solaire varie de manière cyclique sur environ 11,2 années. En 2020, nous sommes au cours du cycle numéro 24 qui a débuté en 2008, son maximum d'activité se situait entre 2011 et 2015 et ce dernier se finira en 2020. L'étude de la prévision et des conséquences terrestres de cette activité représente la météorologie spatiale [*Comins, 2016*]^{1 et 2-11,55}.

De nombreuses études ont montré que l'activité solaire avait un impact dans bien de domaines¹²⁻²⁴ tels qu'en psychologie, en sociologie, en anthropologie, dans la culture, la science et en médecine.

Concernant l'effet globale des perturbations géomagnétiques sur la santé humaine, *Palmer et al.*¹² ont conclu que :

- Les valeurs extrêmement élevées et extrêmement faibles de l'activité géomagnétique semblent avoir des effets néfastes sur la santé
- Qu'un sous-ensemble de la population (10-15%) est prédisposé à une mauvaise santé en raison de variations géomagnétiques
- Les effets géomagnétiques sont plus prononcés aux latitudes magnétiques élevées.



Graphique ci-dessus : L'activité solaire, cyclique, est reflétée par le nombre de taches solaires en fonction du temps. Un cycle dure environ 11,2 ans. Le cycle 1 débuta en 1755. En 2020, nous sommes au cours du cycle 24. Source du graphique : NASA¹¹.

Un certain nombre d'études scientifiques ont été réalisées sur les conséquences de l'activité solaire sur différentes pathologies, notamment neurologiques (sclérose en plaques, accidents vasculaires cérébraux, rupture d'anévrismes cérébraux, migraine), cardiologiques (hypertension artérielle, infarctus du myocarde, trouble du rythme cardiaque) et psychiatriques (dépression, suicide). Le mécanisme causal passerait par la modification de paramètres biologiques tels que ceux de la coagulation, de l'hémostase, immunologiques, de l'inflammation et hormonaux (mélatonine, sérotonine et prolactine) entres autres [Papathanasopoulos et al.²⁶, 2016 ; Rosenbaum et al.²⁷, 2001 ; Kuritzky et al.²⁸, 1987 ; Kay²⁹, 1994 ; Gordon et Berk³⁰, 2006 ; Ghione et al.³¹, 1998 ; Vencloviene et al.³², 2013 ; Stoupe³³, 2002 ; Stoupe¹⁵¹, 2006].

Une crise d'épilepsie se définit par un ensemble de manifestations cliniques brutales, imprévisibles, transitoires qui résultent de l'hyperactivité paroxystique d'un réseau de neurones corticaux ou cortico-sous-corticaux hyperexcitable et de son éventuelle propagation [Fischer et al.³⁶, 2005]. De nombreux facteurs déclencheurs de crises ont été identifiés tels que le manque

de sommeil, la stimulation lumineuse, le stress, l'hyperventilation ainsi que des facteurs environnementaux tels que ceux relatifs à la météorologie terrestre (température, pression atmosphérique, humidité de l'air ambiante) [Aird³⁷, 1983 ; *Rakers et al.*³⁸, 2017 ; *Kim et al.*³⁹, 2017].

De plus, des études ont suggéré que la fréquence de survenue de crises d'épilepsies était corrélée à la variation de l'activité solaire [Venkatraman⁴⁰, 1976 ; *Rajaram and Mitra*⁴¹, 1981 ; *Keshavan et al.*⁴², 1981 ; *Stoupel et al.*⁴³, 1991 ; *Spottiswoode*⁴⁴, 1993].

Les hypothèses physio-pathologiques les plus discutées dans la littérature sont d'ordre hormonal par le biais de la mélatonine [Persinger⁴⁵, 1988 ; *Lapin et al.*⁴⁶, 1998], du facteur de libération de la corticotropine CRF [Ehlers¹²², 1983 ; *Foley et al.*¹²⁴, 2011] ; d'ordre moléculaire via le cryptochrome et la protéine codée par le gène CG8198 [Yamanaka et al.¹²⁹, 2010] ; d'ordre physique [Venkatraman⁴⁰, 1976] ou relèvent de démonstration empirique [Keshavan et al.⁴², 1981].

Cependant, ces quelques études concernant la survenue de crises épileptiques sont anciennes, et portent uniquement sur des analyses de cycles solaires antérieurs au cycle solaire actuel, soit le cycle numéro 24.

De ce fait, l'objectif de ce travail est double.

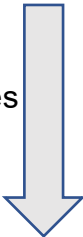
Dans un premier temps, après une définition de l'activité solaire, il consistera à une revue de la littérature sur l'impact de l'activité solaire sur certaines pathologies médicales ainsi que dans des domaines extra-médicaux et d'en discuter les hypothèses physiopathologiques. Dans un deuxième temps, nous nous proposons de tester l'existence d'un lien entre activité solaire et survenue d'une crise d'épilepsie au travers d'une étude qui investiguera la relation entre variation temporelle du nombre de personnes consultant aux Urgences Adultes et Enfants du Centre Hospitalier Universitaire de Lille, pour les motifs de crises d'épilepsies, avec la variation temporelle de l'activité solaire au travers des trois paramètres du cycle solaire numéro 24

(variation de l'activité géomagnétique, du nombre d'éruptions solaires ainsi que du nombre de taches solaires).

Les pics d'activité solaire étant prévisibles à l'avance (on parle alors de météorologie spatiale⁴⁷) ; L'objectif potentiel pratique de ce travail, si les résultats sont en faveur du lien de corrélation entre activité solaire et épilepsies, pourrait être celui de développer des mesures préventives globales et ainsi prévenir les crises et les blessures liées aux crises d'épilepsies.


SOLEIL : Activité solaire (éruptions solaire, taches solaires)

Envoi de particules et radiations via le vent solaire
vitesse : 400 km/s



Quelques jours plus tard → **Impact sur la magnétosphère terrestre**

Immédiatement →



TERRE : Modification de l'activité géomagnétique

Mécanisme simplifié de l'activité solaire

III] ASTRONOMIE

A) LE SOLEIL

1) Caractéristiques¹

C'est l'étoile la plus proche de notre système solaire, sa masse équivaut environ à 333 000 fois celle de la Terre. La distance Terre-soleil définit une Unité Astronomique (UA = $1,496 \times 10^8$ km). Les températures moyennes sont de 5800 Kelvin à sa surface et $1,55 \times 10^7$ K Kelvin en son centre. Il est composé d'atomes d'hydrogène à plus de 90 % et d'hélium principalement.

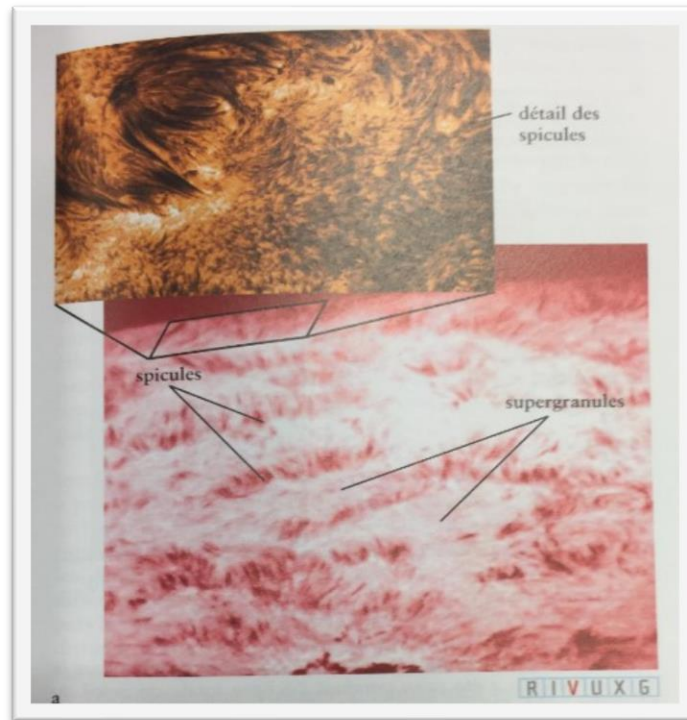
2) Atmosphère solaire¹

Elle est composée de trois couches : la photosphère, la chromosphère ainsi que la couronne solaire.

La photosphère est la surface visible du soleil. Mesurant près de 400 km d'épaisseur, elle est la couche la plus interne du soleil. Comme les deux autres couches sont transparentes à la plupart des longueurs d'ondes visibles, l'œil humain perçoit directement cette couche. Sa surface est granulée (granulations solaires). Elle est composée d'un mélange d'ions chargés électriquement et d'électrons (plasma).

La chromosphère, située au-dessus de la photosphère, est moins dense. Elle mesure environ 2000 km d'altitude. Elle est composée de nombreux spicules, qui correspondent à des jets de gaz de forme effilée. Ces jets peuvent, de manière brève et brutale, s'élever jusqu'à 10 000 km d'altitude et à une vitesse de 72 000 km/h. Plusieurs spicules forment des réseaux de super-granules.

La couronne, qui est la couche la plus externe de l'atmosphère solaire, s'étend sur plusieurs milliers de kilomètres. Sa température est la plus élevée des trois couches, pouvant aller jusqu'à un million de degré Kelvin. La région de transition, située entre la chromosphère et la couronne, correspond à une différence brutale de température.



Photographie ci-dessus : prise au travers d'un filtre H alpha (qui laisse passer la lumière rouge de l'hydrogène), cette image de la chromosphère montre des spicules et des super granules.

Source : Comins¹ depuis la NASA/Swedish Solar télescope.

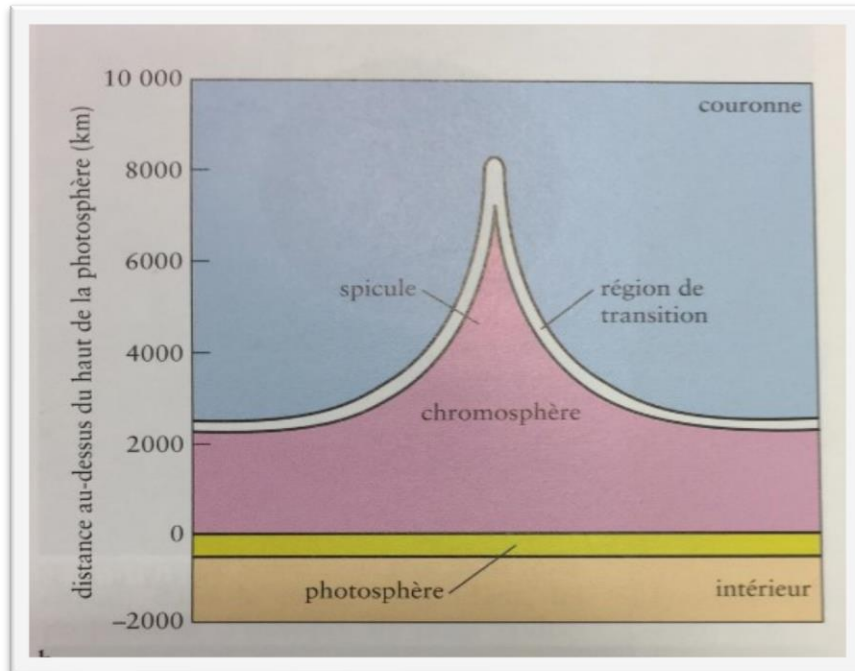


Image ci-dessus : atmosphère solaire. Représentation des différentes altitudes des couches de l'atmosphère solaire à partir de la photosphère. Source : Comins¹.

3) Vent solaire¹

Une quantité de gaz de la couronne, échappant à l'attraction solaire et facilitée par le champ magnétique solaire, s'échappe vers l'espace.

Il en résulte une éjection d'environ un million de tonnes de particules par seconde qui sont composées de radiations (rayons X et UV) et de particules chargées électriquement (électrons et protons). Ceci correspond ainsi au vent solaire.

Un certain nombre d'entre elles se dirigent vers la Terre à une vitesse initiale de 400 km/s et donc mettront plus de quatre jours à atteindre la Terre.

B) ACTIVITE SOLAIRE

L'activité solaire est définie par une perturbation cyclique de l'atmosphère solaire générée par ses champs magnétiques. La durée moyenne d'un cycle solaire est de 11,2 ans. Ces derniers sont numérotés depuis leurs premières années d'observations (cf. infra). En 2020, le cycle solaire actuel est le vingt-quatrième qui a débuté en janvier 2008.

Sous le terme d'activité solaire est regroupé, de façon non exhaustive, les éruptions solaires, les taches solaires et les tempêtes géomagnétiques. Ces différents paramètres, qui varient quotidiennement, seront définis ci-après.

1) Cycle solaire^{1,7,8,9}

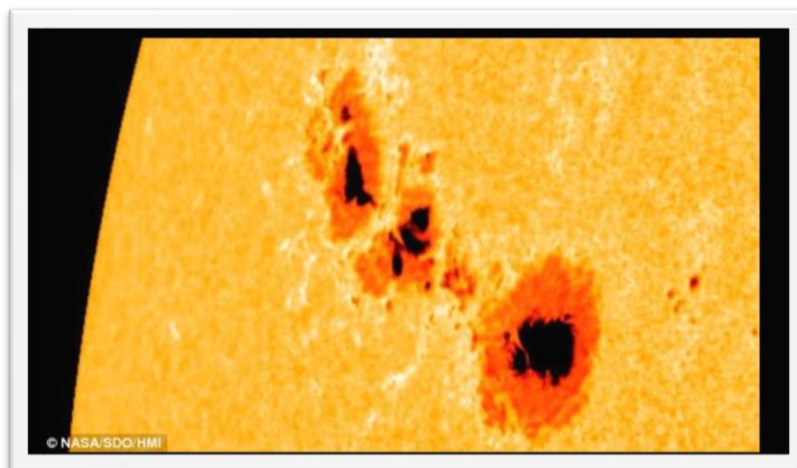
Également appelé cycle d'activité magnétique solaire, il correspond au changement presque périodique sur onze ans de l'activité du soleil et de son apparence : variations des niveaux de rayonnement solaire, de l'éjection de matériau solaire, modifications du nombre et de la taille des taches solaires, et des éruptions solaires entre autres.

Par convention, la comptabilisation des cycles solaires se réfèrent à la variation temporelle du nombre de taches solaires sur 11,2 ans.

Les minimas et maximas d'un cycle se réfèrent respectivement aux périodes de dénombrement minimal et maximal de taches solaires. Les cycles s'étendant d'un minimum à un autre.

2) Taches solaires^{1, 48}

Ce sont des régions de la photosphère solaire (surface visible du soleil) qui apparaissent plus sombres, car moins chaudes, que le reste de la basse atmosphère. Elles mesurent environ 10 000 km de large et persistent de quelques heures à quelques mois. Ces taches sont composées de deux parties, une centrale plus sombre nommée l'ombre, entourée d'une plus brillante, la pénombre.



Taches solaires. En noir l'ombre et en orangée la pénombre. Source : Comins¹ depuis le télescope ALMA, NASA.

a) Historique de l'observation des taches solaires⁴⁹⁻⁵³

Les premières observations rapportées datent d'environ -20 avant J.-C par des astronomes chinois. Les moyens techniques demeurent inconnus à ce jour, les hypothèses évoquées sont celles d'un climat favorable pour l'observation lors de tempêtes de sable dans le désert du Gobi. En Europe, durant le Haut Moyen Âge, les premières observations de taches solaires mentionnées sont faites par *Éginhard*. Il a observé une tache solaire en 807 pendant huit jours

avant d'être masquée par des nuages. Les annales de Saint Bertin de 860 évoquent ce qui laisse penser à être des taches solaires : « *On dit de même que le 6 avril (860), le soleil levé, l'on vit au milieu de son disque une tache noire, et celle-là étant descendue vers les parties inférieures, une autre aussitôt se jeta sur les parties supérieures, et parcourut tout le disque jusqu'en bas. Cela arriva le dixième jour de la Lune* ».

Christoph Scheiner, astronome allemand, inventa une lunette astronomique ainsi que l'hélioscope qui permet de projeter les rayons solaires sur un écran pour s'affranchir l'observation oculaire directe. C'est ainsi qu'il répertoria les taches solaires dès 1611. A la même époque, *Galilée*, en 1610, via le même système de télescope à rétroprojection découvre que le soleil tourne autour de lui-même sur une période de quatre semaines grâce au relevé mensuel des taches solaires sur un écran.

La comptabilisation scientifique des taches solaires débuta vers 1630 où une très faible activité solaire a été recensée de 1645 à 1715 dénommée *minimum de Maunder* (du nom de l'astronome anglais qui identifia cette période). Cette période correspond avec l'ère du petit âge glaciaire où des températures très froides furent recensées sur l'ensemble du globe terrestre. Ce minimum d'activité solaire en serait une des causes des chutes de températures. Parmi les autres causes proposées par les scientifiques : des éruptions très intenses de volcans occultant le rayonnement solaire ainsi que des modifications des courants marins, notamment celui du Gulf Stream.

Le cycle solaire numéro 1 débuta en 1755. Le *minimum de Dalton* (du nom du météorologiste anglais), de 1790 à 1830, correspond de même à une période de faible activité solaire. Dans les années 1800, deux astronomes *Samuel Schwabe* et *Johann Rudolf Wolf*, affinent le mode de calcul des taches solaires. Le *modern maximum* fait référence à la période d'activité solaire relativement élevée qui a débuté lors du cycle solaire 15 en 1914. Cette période a atteint son maximum au cycle 19 à la fin des années 1950 et pourrait s'être terminée avec le pic du cycle 23 en 2000. En 2020, le cycle 24 où nous nous trouvons actuellement a débuté en 2008. Il s'agit du plus faible cycle en termes d'activité solaire depuis leur comptabilisation, excepté le *minium de Dalton*.

b) Mécanisme d'apparition¹

Il a été découvert par *Zeeman* en 1896 que les taches solaires sont liées à des variations locales du champ magnétique. Ces derniers vont interagir avec la photosphère qui, pour mémoire, est un mélange d'ions chargés électriquement et d'électrons (plasma) le tout à une très haute température. Ce champ magnétique empêche les gaz chauds et ionisés de l'intérieur du soleil de remonter à sa surface par convection. De ce fait, les taches sont relativement plus froides que le reste de l'atmosphère du soleil et apparaissent donc plus sombres.

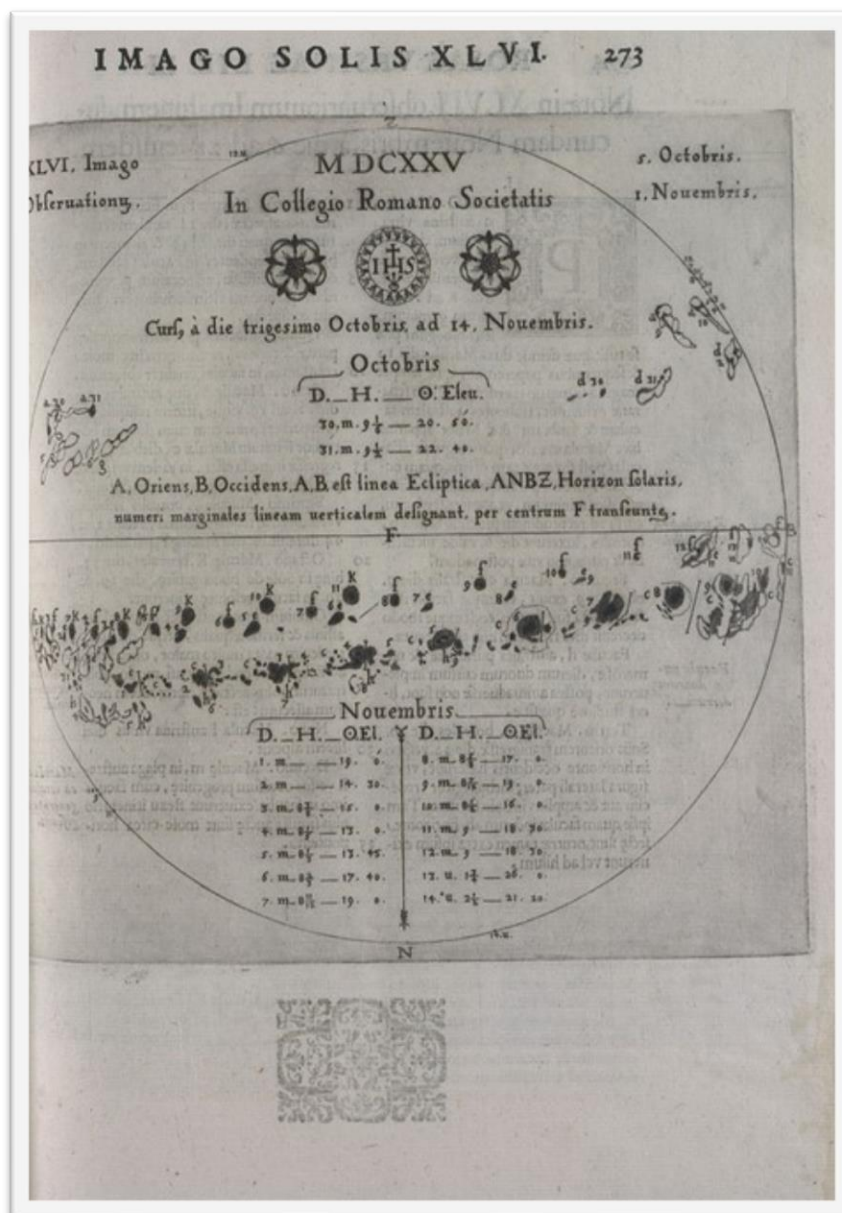


Illustration ci-dessus⁵¹ : reproduction manuscrite d'observations de taches solaires faites par Scheiner, 1630.

c) Champs magnétique solaire¹

Il est créé par la rotation du soleil et par les particules ionisées qui le contient. Tous les 11 ans se produit un inversement du champ magnétique solaire.

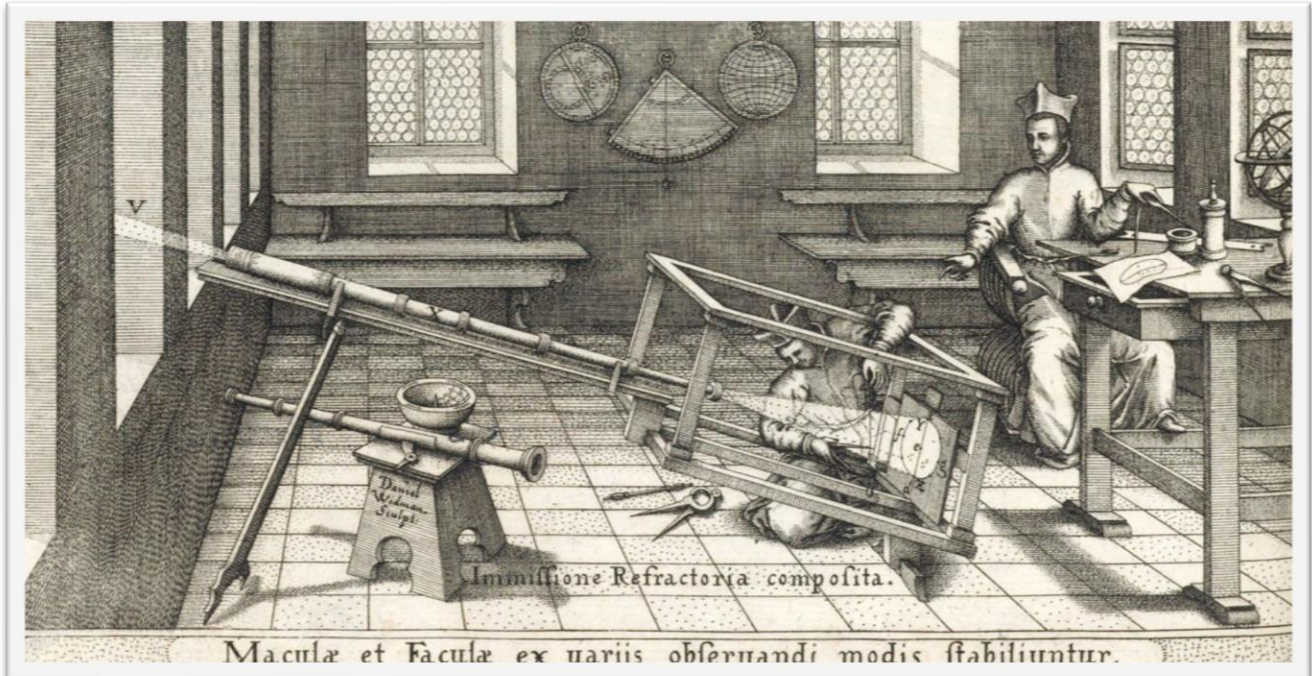
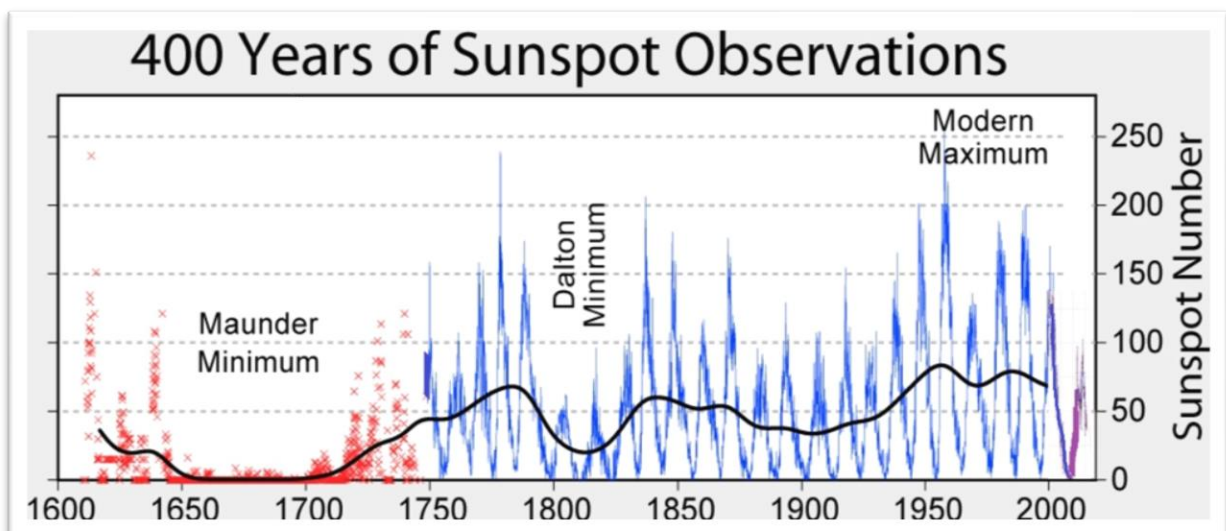
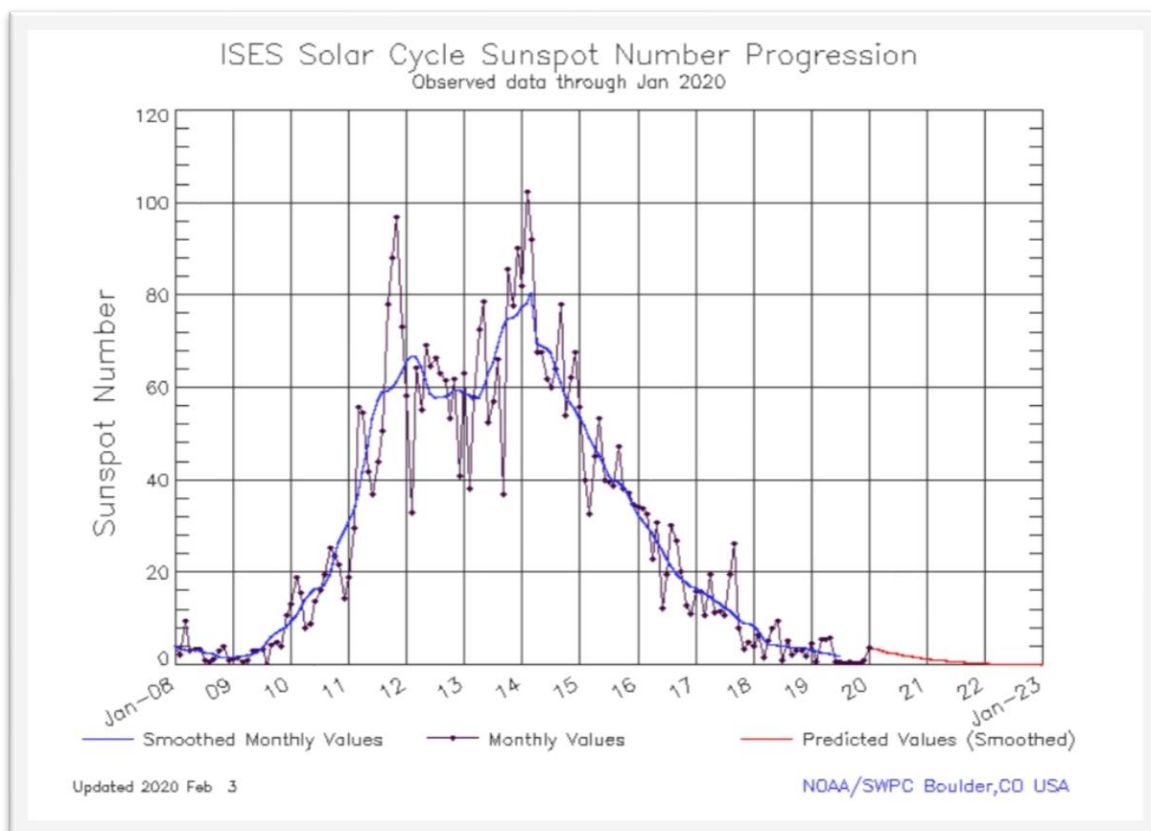


Illustration ci-dessus⁵² : Christoph Scheider utilisant son télescope avec système de projection des rayons solaires sur écran, 1612.



Graphique⁸ de page précédente : Evolution cyclique du nombre de taches solaires en fonction de temps depuis le début de leur comptabilisation vers 1600.

Le minimum de Maunder de 1645 à 1715 renvoie à une période de très faible activité solaire (en rouge). Le minimum de Dalton de 1790 à 1830 correspond à une faible période d'activité. Le modern maximum fait référence à la période d'activité solaire relativement élevée. Le comptage des cycles débuta en 1755 (cycle 1, début du tracé en bleu). Le cycle 24 (en violet) a débuté en 2008.



Graphique ci-dessus⁹ : Evolution du nombre de taches solaire au cours du cycle solaire numéro 24 qui a débuté en janvier 2008.

Nous voyons que le maximum d'activité solaire, pour ce cycle, se situait des années 2011 à 2015. Le trait en rouge correspond à la prédiction des valeurs du nombre de taches solaire pour les années de début 2020 à fin 2023. Ce graphique est arrêté au 03 février 2020.

NOAA = National Oceanic and Atmospheric Administration et SWPC = Space Weather Prediction Center.

3) Éruptions solaires

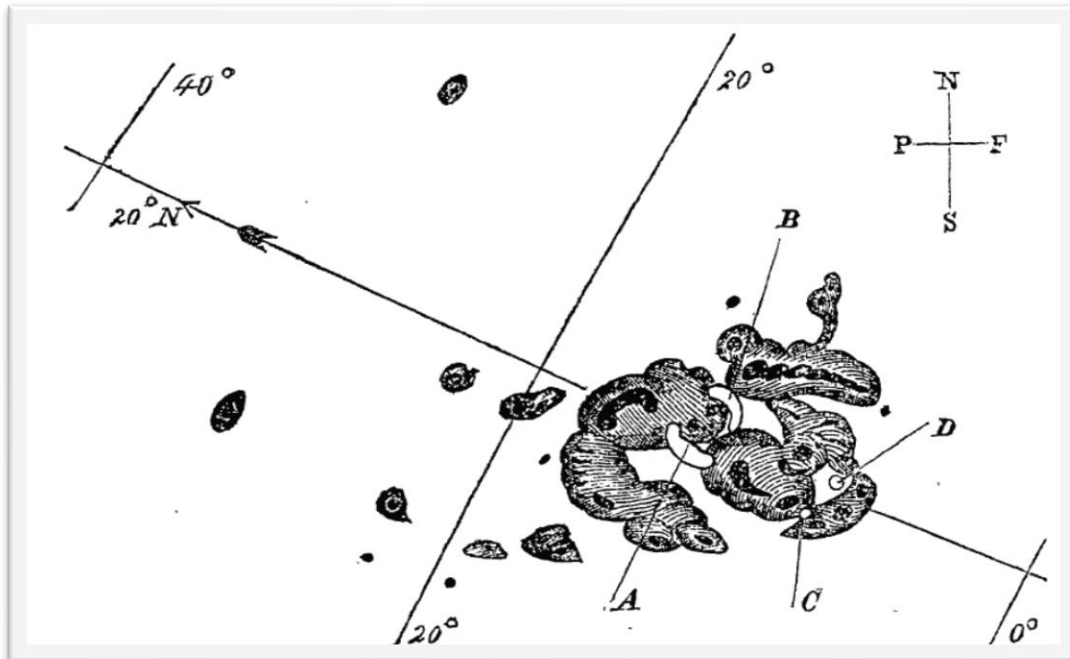


Illustration ci-dessus⁵⁴ : croquis de la disposition des éruptions solaires réalisé par Carrington d'après son observation solaire du 1^{er} septembre 1859. Les zones marquées A et B correspondent à une lumière intense blanche observée pendant plus de 5 minutes. [Carrington⁵⁴, 1859].

a) Historiques des éruptions solaires⁵⁰

La première mention d'éruptions solaires émane de Carrington⁵⁴, le 1^{er} septembre 1859, qui remarqua un aspect inhabituel au niveau de la surface du soleil qui perdura plusieurs minutes. Elles correspondent à une libération grande quantité de particules de haute énergie ainsi que des rayons X et UV et des nuages de plasma vers l'espace pendant des durées allant de quelques secondes à cinq heures. Les particules sont guidées par le champ magnétique solaire. Ce plasma voyage à une vitesse d'environ 400km/s et atteint la magnétosphère de la Terre entre trois à quatre jours selon Comins¹ à plusieurs jours selon Menzel⁵⁵ plus tard. Ceci implique une modification du champ magnétique terrestre.

Lors d'une éruption Solaire, la température de l'atmosphère solaire peut monter jusqu'à environ 5 Millions de degré Kelvin. Au maximum d'un cycle, il se produit en moyenne 1100 éruptions par an.

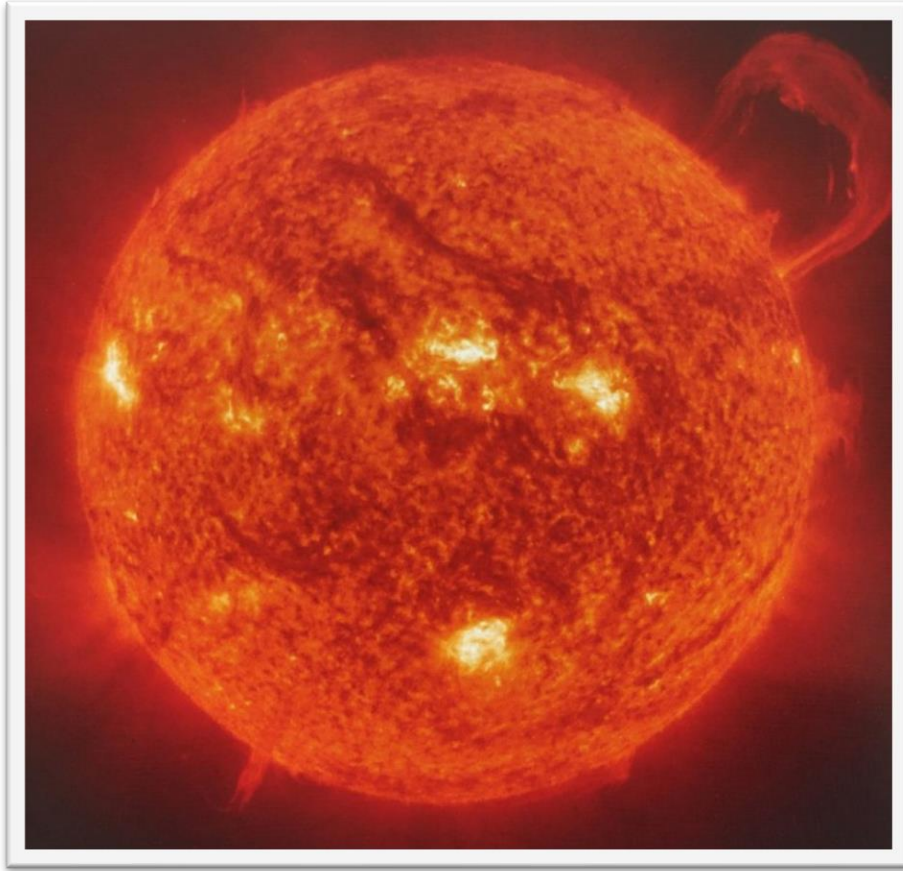


Image ci-dessus¹ : Éruption solaire (vue par le télescope SOHO de la NASA) en haut à droite de l'image.

b) Classification^{56,57} :

Le système de classification des éruptions solaires utilise les lettres A, B, C, M ou X, qui reflète l'intensité de l'éruption. Cette intensité est exprimée en W/m^2 . X étant une éruption intense et A faible.

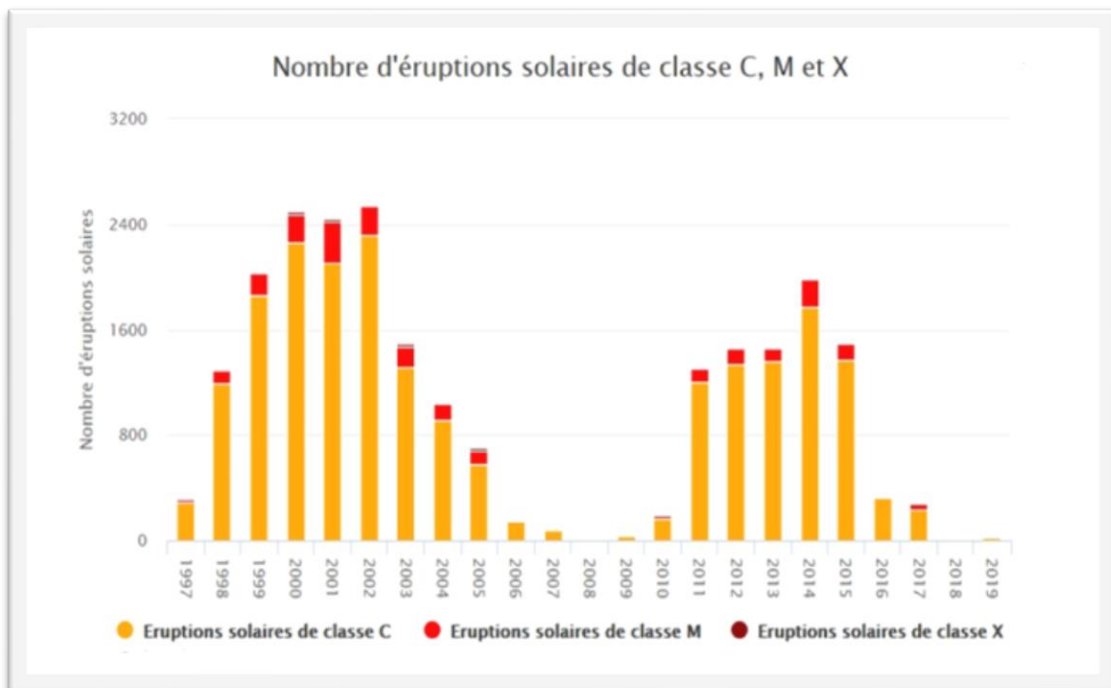
Classe de l'éruption solaire	Intensité en W/m²
A	$< 10^{-7}$
B	$> \text{ou} = 10^{-7} \text{ et } < 10^{-6}$
C	$> \text{ou} = 10^{-6} \text{ et } < 10^{-5}$
M	$> \text{ou} = 10^{-5} \text{ et } < 10^{-4}$
X	$> \text{ou} = 10^{-4}$

Tableau de classification des éruptions solaires en fonction de leur intensité.

Les mesures des intensités sont réalisées par le biais d'un satellite américain : GOES-15 (Geostationary Operational Environmental Satellite) opéré par la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)⁵⁷. Ce dernier est géostationnaire au-dessus de l'océan pacifique.

Les éjections de masse coronale¹ (EMC) sont associées aux éruptions solaires et produisent un flux de rayonnement de protons de haute énergie, parfois appelés rayons cosmiques solaires liées aux éruptions solaires. Les particules se déplacent à très grande vitesse dans le milieu interplanétaire (entre 100km/s et 2500 km/s) et peuvent parcourir la distance Terre-soleil en quelques jours. La fréquence des émissions varie en fonction du cycle solaire. On observe en moyenne une EMC par semaine lors du minimum solaire et deux à trois par jour lors du maximum solaire.

Le nombre d'éruptions solaires, de taches solaires et d'éjections de masse coronale varient selon le même cycle d'environ 11 années.



Graphique ci-dessus⁵⁸ : Evolution du nombre d'éruptions solaires (somme des éruptions classées C, M et X) en fonction du temps. Seuls les cycles solaire 23 et 24 sont représentés.

4) Activité Géomagnétique^{1,59}

C'est l'une des conséquences de l'activité solaire sur la Terre.

Le champ magnétique terrestre également appelé champ géomagnétique est principalement généré par l'activité solaire. En effet, les rayonnements UV et X produits par le soleil, constituant le vent solaire, rentre en contact avec la magnétosphère (partie la plus externe du champ magnétique terrestre). De façon paradoxale, la magnétosphère joue un rôle de bouclier terrestre en déviant les particules de haute énergie du vent solaire et des rayons cosmiques. Mais comme cette dernière n'est pas totalement étanche à ces particules, une variation du champ magnétique est observée au sol de la Terre. Les entrées de rayonnements se font par les pôles magnétiques de la Terre.

La magnétosphère a permis à l'atmosphère terrestre de se maintenir au cours du temps, contrairement à ce qui s'est passé sur Mars, où en l'absence de magnétosphère, le vent solaire a arraché à son passage une grande partie de l'atmosphère de cette planète. Le bouclier fourni par la magnétosphère terrestre a ainsi réduit le flux de rayonnement à haute énergie qui arrive jusqu'au sol, permettant le maintien de la vie sur Terre. De plus, ces rayonnements X et UV sont absorbés dans les couches les plus hautes de l'atmosphère, créant des couples ions-électrons. Des courants électriques sont alors produits à environ 100 km d'altitude faisant varier de manière diurne le champ magnétique. On parle de la partie ionosphérique du champ magnétique terrestre. Au vu de ces éléments, on comprend bien que le champ magnétique terrestre est fortement impacté par la météorologie spatiale.

Les autres sources du champ magnétique terrestre sont générées, entre autres, par⁶⁰ :

- L'intérieur de la Terre, par le biais de l'effet de dynamo dû aux mouvements de convection dans le noyau terrestre, composé à 90% de fer liquide.

Ces mouvements sont générés par le refroidissement progressif du noyau et de la graine solide située au centre de la Terre. Il en résulte un champ magnétique dipolaire, incliné d'environ 10° par rapport à l'axe de rotation de la Terre.

- Des roches aimantées de la croûte terrestre (lithosphère) : l'analyse de l'aimantation des roches des fonds océaniques a notamment permis de mettre en évidence les inversions des pôles, qui se produisent environ une fois tous les millions d'années.

a) Mesure de l'activité géomagnétique

Les mesures sont réalisées par des récepteurs terrestres que sont les magnétomètres. Ils sont répartis sur différents continents, et enregistrent simultanément les variations de l'activité géomagnétique. Différents indices de mesure magnétique⁶¹ sont utilisés comme les indices Ap, Kp, ap ou l'indice Dst (*Disturbance Storm Index*).

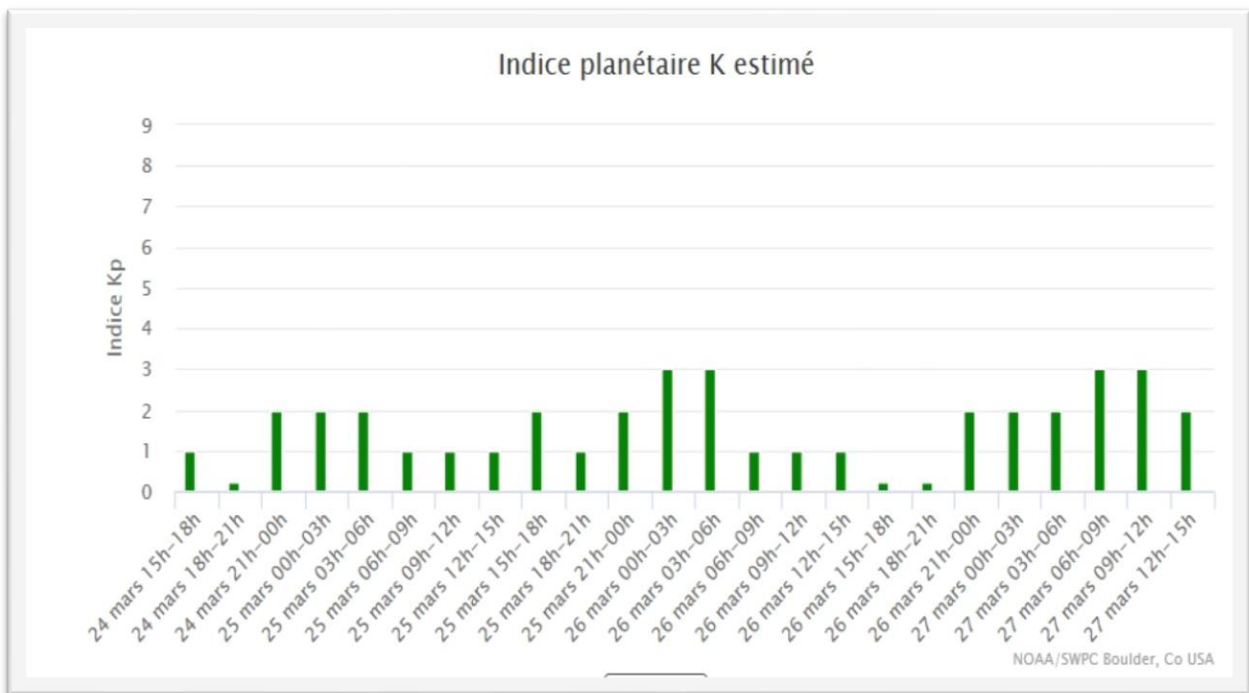
Indice Kp⁶²

Cet indice, introduit par *Bartels* en 1949, provient de l'allemand "planetarische Kennziffer" qui signifie index planétaire. Il est dérivé de l'indice K qui mesure les perturbations de la composante horizontale du champ géomagnétique terrestre. L'indice Kp mesure les effets des particules solaires sur le champ magnétique terrestre et reflète l'activité géomagnétique global de la Terre mesuré toutes les trois heures par 13 magnétomètres situés sur l'ensemble du globe. La localisation (ville) de chacun de ces magnétomètres est détaillée dans le tableau ci-après. Notons, qu'aucun n'est localisé en France.

MEA	Meanook
SIT	Sitka
LER	Lerwick
OTT	Ottawa
LOV	Lovö
ESK	Eskdalemuir
BJE	Brorfelde
FRD	Fredericksburg
WNG	Wingst
HAD	Hartland
NGK	Niemegk
EYR	Eyrewell
CAN	Canberra

*Tableau ci-dessus*⁸⁰ : Localisation par nom de ville des 13 magnétomètres répartis sur la Terre utilisés pour définir l'indice kp. Leur nom de code en 3 lettres y est associé.

Les valeurs de l'indice Kp peuvent varier entre 0 et 9 (0 signifiant une très faible activité géomagnétique et 9 signifiant une intense activité géomagnétique). A partir de cet indice brut kp est obtenu l'indice ap.



Graphe ci-dessus⁷ : mesure de l'activité géomagnétique du 25 au 27 mars 2019 par l'indice Kp.

Indice Ap⁶¹

Cet indice Ap est la référence pour quantifier l'impact de particules solaires sur Terre. Il fournit un niveau moyen quotidien d'activité géomagnétique et correspond à la moyenne quotidienne de la somme des 8 valeurs ap, elles-mêmes dérivées de l'indice kp. Ses valeurs varient du minimum 0 au maximum 280. L'indice Ap quotidien est obtenu en faisant la moyenne de la somme des 8 valeurs de l'indice ap quotidien.

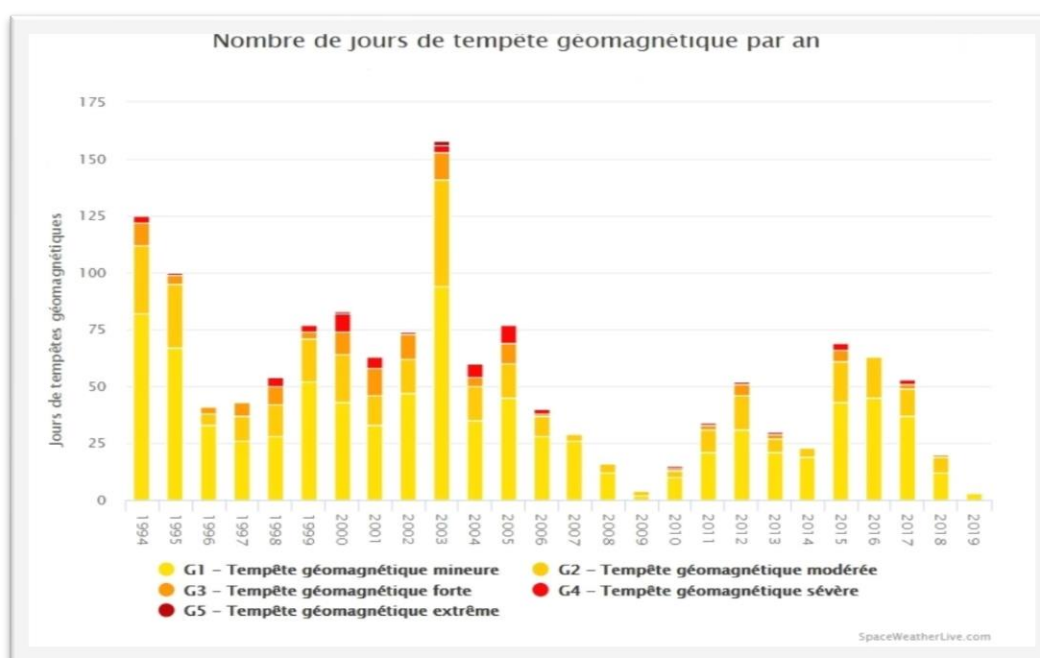
b) Classification des tempêtes géomagnétiques^{63,64,65}

Les tempêtes géomagnétiques correspondent à de fortes intensités d'activité géomagnétique. Elles peuvent durer de quelques heures à quelques jours⁶³. Elles sont classées selon leurs intensités croissantes⁶⁴, allant de calme (G0) à faible (G1) à modérée (G2) à forte (G3) à sévère (G4) et enfin à extrême (G5).

Le tableau ci-dessous indique la correspondance entre la gamme d'indice Ap et la catégorie des tempêtes géomagnétiques.

Gamme d'indice Ap	Catégorie des tempêtes géomagnétiques
0-8	G0
8-16	G1
17-30	G2
31-50	G3
51-100	G4
>100	G5

Le graphe⁷ ci-dessous montre l'évolution du nombre de jours de tempêtes géomagnétiques par an, depuis 1994 jusque 2019, classées par intensité sur deux cycles solaires (23 et 24).



5) Autres conséquences de l'activité solaire¹

→ Les aurores

Les pôles magnétiques terrestres attirent les particules du soleil, ils fonctionnent comme des aimants [Théorie de *Chapman*⁶⁵ de 1930]. La magnétosphère, ou champ magnétique terrestre, est le bouclier protecteur contre les vents solaires, les particules solaires sont bloquées et doivent contourner la « barrière » pour revenir sur Terre grâce à des brèches dans le champ magnétique. Ces particules entrent dans l'atmosphère et se heurtent aux atomes d'oxygène et d'azote dans l'ionosphère, ces « collisions » chimiques causent la couleur des aurores⁶⁵.

Les observations d'aurores sont reportées depuis l'antiquité⁶⁶ et sont mentionnées dans la bible : « Et maintenant, les hommes ne voient pas la lumière qui brille dans les cieux ; mais le vent passe et les nettoie. Du nord vient la splendeur dorée, à propos de Dieu est la majesté terrible » *Société Juive de publication biblique, Job 37 : 21-22* et par *Aristote*⁶⁶. Cependant, les premiers relevés systématiques des aurores remontent au début du 17^{ème} siècle⁶⁶.

→ Perturbations des communications radios

Citons par exemple, une intense éruption solaire, le 23 mai 1967, qui a failli mener à une crise diplomatique entre les Etats Unis et l'URSS dans un contexte de guerre froide⁶⁷. En effet, à la suite de cette puissante éruption, qui était visible depuis la Terre à des latitudes inhabituelles, les communications radios américaines ont été coupées. Dans ce contexte, les américains ont immédiatement soupçonné l'URSS à l'origine de ce fait, pensant à un sabotage. Heureusement, les scientifiques de l'époque avaient pu prévenir à temps les forces américaines de la réalité des faits⁶⁷.

→ Perturbation du réseau électrique

Par exemple, la région du Québec a ainsi subi, en mars 1989, une panne générale d'électricité par suite d'une forte tempête solaire⁶⁸.

→ Perturbation des satellites

→ Perturbation des équipements électroniques

Téléphones cellulaires, ordinateurs, récepteurs de télévision, GPS, bruit électrique induit dans les câbles téléphoniques.

6) En résumé

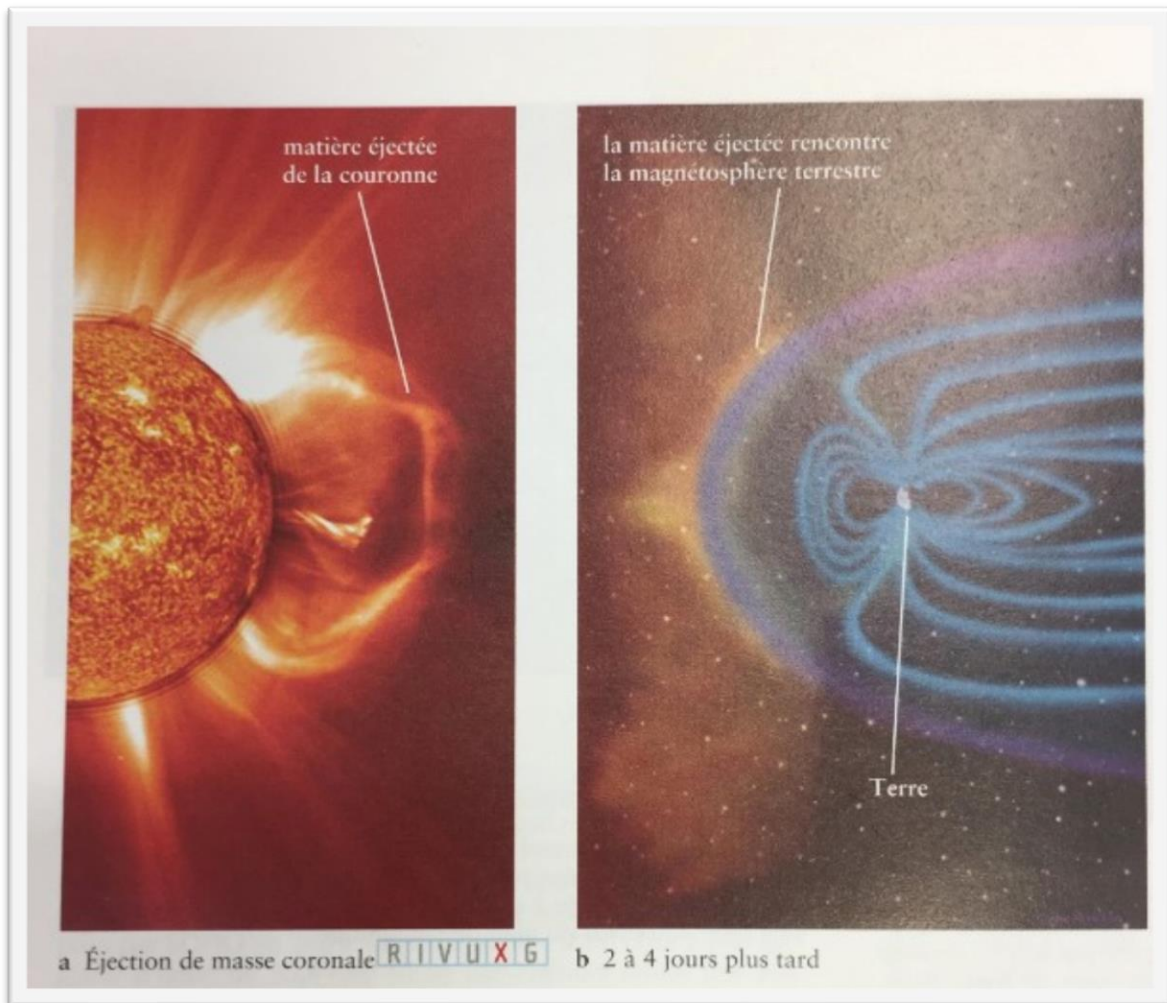
L'activité solaire est quantifiée par le nombre et l'intensité d'éruptions solaires, le nombre de taches solaires, les éjections de masse coronale ainsi que par ses tempêtes géomagnétiques.

Elle évolue de manière cyclique sur environ 11,2 ans avec un minimum et un maximum d'activité.

En 2020, nous sommes actuellement au cours du cycle solaire numéro 24.

Il en résulte une projection de radiations (rayons X, UV), de particules chargées électriquement (électrons et protons) ainsi que de vent solaire qui arrive vers la Terre à environ 400km/s. Soit un temps estimé entre trois et quatre jours selon *Comins*¹ à plusieurs jours selon *Menzel*⁵⁵ pour atteindre la magnétosphère terrestre.

Bien que la terre en soit protégée par cette dernière, certaines conditions permettent la pénétration de l'énergie solaire sur l'environnement terrestre. Ceci modifie alors le champ magnétique terrestre, on parle alors d'activité géomagnétique. Cette activité est mesurée par le biais de différents indices comme par exemple l'indice Ap.



Image¹ ci-dessus : A gauche, photographie prise par le télescope SOHO (NASA) montrant une éruption solaire accompagnée d'une éjection de masse coronale envoyant à la fois des particules énergétiques ainsi que des ondes électromagnétiques qui mettent environ entre 3 à 4 jours (selon Comins), à atteindre la magnétosphère terrestre (vue d'artiste à droite).

IV] INFLUENCE DE L'ACTIVITE SOLAIRE EN MEDECINE : REVUE DE LITTERATURE

Des nombreuses études ont été réalisées, cherchant à corréler activité solaire et fréquence de survenue d'une pathologie. Cela porte principalement sur des paramètres biologiques, des pathologies neurologiques, cardiologiques et psychiatriques.

D'une manière générale, concernant l'effet des perturbations géomagnétiques sur la santé humaine, *Palmer et al.*¹² ont conclu que des valeurs extrêmement élevées et extrêmement faibles de l'activité géomagnétique semblent avoir des effets néfastes sur la santé et qu'un sous-ensemble de la population (10-15%) est prédisposé à une mauvaise santé en raison de variations géomagnétiques.

Si beaucoup d'études montrent un lien de corrélation positif, certaines ne mettent pas en évidence de lien entre activité solaire et pathologies humaines. D'autres mettent en évidence un lien de corrélation négatif. Ci-après, est présenté, une liste revue de littérature non exhaustive d'études réalisées sur le sujet dans laquelle il sera discuté des mécanismes physio-pathologiques appliqués à chaque pathologie.

Méthode

La revue de littérature a été réalisée à partir de Mars 2019 jusque Janvier 2020 par le biais de deux bases de données disponibles sur internet : « PubMed » et « Google Scholar ». Il n'y avait pas de restriction de date de parution, ni de langue. Les résultats des recherches étaient classés par « meilleur correspondance ». Les mots clés utilisés étaient :

- « Solar Activity and Cardiology », « Solar Activity and Cardiovascular », « Solar Activity and Blood Pressure », « Solar Activity and Myocardial Infarction », « Solar Activity and

Cardiac Rythm » ; « Geomagnetic Activity and Cardiology ».

- « Solar Activity and Neurology » , « Solar Activity and Depression » , « Solar Activity and Suicide » , « Solar Activity and Migraine » , « Solar Activity and Strokes ».
- « Solar Activity and Birth » , « Solar Activity and Pregnancy »
- « Solar Activity and Infection »

La combinaison de recherche a aussi été réalisée par les synonymes des termes « Solar Activity ». A savoir : « Geomagnetic Activity » ou « Geomagnetic Storms » ou « Sunspots Numbers » ou « Solar Flares » ou « Solar Cycle ».

De plus, une partie importante d'articles ont été trouvés par le biais de sources contenues dans d'autres articles lus au fur et à mesure.

Les résultats sont centrés sur trois grands domaines de pathologies : la cardiologie, la neurologie, la psychiatrie où le plus grand nombre de recherches ont été effectuées. Lorsque plusieurs études sur une pathologie précise existaient, l'étude la plus récente sur le sujet était incluse.

Au total, 45 articles entiers pertinents ont été lus pour constituer ce chapitre. Nous sommes conscients que cette revue n'est pas totalement exhaustive, et ce n'était pas le but recherché. Il s'agissait de présenter l'impact qu'a l'activité solaire sur quelques pathologies les plus étudiées dans ce domaine.

A) Impact sur les paramètres biologiques

- Sur le plan hématologique et de la coagulation, *Stoupel et al*^{92,151}, ont montré que le nombre de plaquettes sanguines, les fonctions d'agrégation plaquettaire, le taux de prothrombine (TP), que le taux de fibrinogène ainsi que le nombre de polynucléaires neutrophiles varient de manière significativement positive à l'activité géomagnétique.
- Sur le plan biochimique, *Stoupel et al*⁹¹, en 2007, ont analysé, sur une période de trois ans, 25 399 valeurs sériques de CRP aux différents niveaux mensuels et quotidiens de

l'activité magnétique. Il est montré une corrélation positive significative entre importance du taux de CRP et activité magnétique. *Stoupel et al.*¹⁹³, en 1990, ont montré une corrélation négative entre du taux sérique des triglycérides et activité géomagnétique.

- Sur le plan immunologique, en 2011, *Stoupel et al.*⁷², ont montré une corrélation positive significative entre activité géomagnétique et taux d'anticorps anti-phospholipide (anticorps anti-Béata2GP1) et taux d'anticorps lupique (temps de kaolin (KCT)). Ces différents anticorps interviennent notamment dans le syndrome des antiphospholipides.
- Sur le plan endocrinien : les taux d'hormones de croissance GH, de prolactine et de corticostéroïdes sont significativement négativement corrélés à l'activité géomagnétique¹⁵¹.

Ces découvertes sont souvent citées comme mécanismes potentiels sous-jacents de survenue d'accident vasculaire cérébral, d'infarctus du myocarde ou de migraine lors de variation de l'activité magnétique par le biais, entre autres, de la modification de la tension artérielle, ou de la genèse des plaques athéromateuses.

B) Cardiologie

Hypertension artérielle

- Dans une étude de *Ghione et al.*³¹ de 1998, la mesure de la tension artérielle (TA) de 447 patients non hypertendus, ni traités a été réalisée sur une période de 5 ans et comparée aux valeurs quotidiennes de l'activité géomagnétique. La mesure comportait la moyenne des mesures de la TA systolique et diastolique le jour, la nuit et de 24 heures consécutives. Des corrélations positives et significatives ont été retrouvées entre jours de fortes activités magnétiques et augmentation de la TA systolique de jour et sur les 24 h consécutives d'une part et pour la TA diastolique sur les mesures de jour, de nuit et des 24 heures

consécutives d'autre part. La différence de valeurs moyennes de la TA systolique et diastolique sur les mesures des 24 heures consécutives entre les jours où l'activité géomagnétique était la plus faible et la plus élevée était d'environ 6 à 8 mm de mercure. Aucune corrélation n'avait été retrouvée avec la fréquence cardiaque.

- Dans une étude, de *Dimitrova et al.*⁷⁵ de 2004, la tension artérielle de 86 volontaires a été mesurée, du 1er octobre au 9 novembre 2001 et du 8 avril au 28 mai 2002. Ces périodes ont été choisies comme des périodes d'activité géomagnétique maximale. Au total, 2799 enregistrements ont été obtenus. Il a été constaté que la moyenne de tension artérielle augmentait avec l'augmentation du taux d'activité géomagnétique. Et que les tensions artérielles systoliques et diastoliques augmentaient de manière significative le lendemain de jours de fortes activités géomagnétiques.
- D'autres chercheurs [*Gavryuseva et Kroussanova*⁷⁶, 2002] ont trouvé une corrélation significative et positive entre le nombre de taches solaires et la valeur de tension artérielle systolique et diastolique.
- Une étude mexicaine plus récente de 2017 [*Azcárate et Mendoz*⁷⁷] ne portant que sur huit sujets, confortent cette corrélation positive avec le niveau de l'activité géomagnétique.

Les hypothèses physio-pathologiques suggérées par les auteurs^{31,75,76} sont en lien avec une modulation du système adrénergique et de réponse au stress en fonction des niveaux d'activité géomagnétique.

De plus, le rôle de la mélatonine est suggéré. Cette hormone (comme on le verra plus tard avec précision) est abaissée lors de forts taux d'activité géomatique [*Burch et al.*⁹⁵, 1988 ; *Lapin et al.*⁴⁶, 1998]. Or, Il a été démontré que les personnes souffrant d'hypertension artérielle ont des niveaux de mélatonine inférieurs à des personnes sans HTA, et l'administration

de mélatonine réduit la tension artérielle [*Dominguez-Rodriguez et al.*¹²⁰, 2010]. Par ce mécanisme, les forts taux d'activité géomagnétique augmenteraient la tension artérielle.

Ischémie cardiaque

- *Stoupel et al.*^{156,162}, en 1988, ont montré que des faibles taux d'activité géomagnétique étaient associés à une plus grande fréquence de survenue d'infarctus du myocarde notamment dans le territoire cardiaque postéro-inférieur²⁰².
- *Vencloviene et al.*³², dans une étude datant de 2013, ont montré chez une population de 1979 patients hospitalisés à l'hôpital universitaire de Kaunas (Lituanie) ayant des antécédents médicaux d'infarctus du myocarde et/ou d'angor stable, que deux jours après de tempêtes géomagnétiques, le risque d'infarctus du myocarde avec élévation du segment ST (STEMI) était 1,5 fois plus élevé que des jours où l'activité géomagnétique était calme. Cette étude confirme l'effet potentiel des phénomènes solaires chez les patients à haut risque cardio-vasculaire.

Les mécanismes proposés sont en lien avec une variation du taux des protéines de l'inflammation, de la coagulation sanguine, de l'agrégation plaquettaire, de la sécrétion d'hormones tels que la prolactine et la dopamine¹⁶² et de la tension artérielle en fonction de l'activité solaire^{120,151}. Tous ces paramètres interviennent, partiellement, dans la genèse de l'ischémie cardiaque.

Concernant, l'atteinte plus fréquente du territoire cardiaque postéro-inférieur, il est avancé que l'artère coronaire droite (vascularisant la partie postéro-inférieure cardiaque) est plus sous l'influence du système parasympathique que l'artère coronaire gauche (vascularisant principalement la paroi antérieure du cœur) qui est, pour sa part, sous influence du complexe hypophyso-hypothalamique. Or, l'activité solaire semble un facteur protecteur de sécrétion d'hormones de ce complexe¹⁵¹.

De plus, les patients aux antécédents de maladie coronaire ont un taux de mélatonine inférieur à des personnes aux coronaires saines¹²⁰. Pour cette raison, la baisse des niveaux de mélatonine pendant et après une forte activité géomagnétique chez les patients souffrant de problèmes cardiovasculaires augmente le risque de STEMI.

Cependant, d'autres études ne mettent pas en évidence de corrélation entre activité géomagnétique et pathologies cardiologiques.

*Feinleib et al.*⁷⁹ n'ont pas trouvé de relation significative entre activité géomagnétique et mortalité cardiovasculaire. *Knox et al.*⁸⁰ et *Malin and Srivastava*⁸¹ n'ont révélé aucune corrélation significative entre activité géomagnétique et crises cardiaques. Une étude a également retrouvé aucune relation statistiquement significative entre le nombre d'infarctus aigu du myocarde mortel ou non mortel, le nombre de morts subites et activité géomagnétique [*Messner et al.*⁸², 2002].

Fréquence cardiaque

*Alabdulgader et al.*⁷⁸, en 2008, ont réalisé une étude cherchant à monter une relation entre variation de l'activité solaire et activité du système nerveux autonome reflétée par la variabilité de la fréquence cardiaque (VFC). Il a été procédé à un enregistrement de la VFC pendant 72 heures consécutives chaque semaine sur une période de cinq mois chez 16 participants. Il a été conclu que l'augmentation de l'intensité du vent solaire était corrélée à l'augmentation de la variabilité de la fréquence cardiaque. Un des mécanismes proposés passerait par le biais de protéine de l'inflammation C-Reactive Protein qui, comme vu précédemment, varie en fonction du niveau de l'activité solaire. Or, il a aussi été montré que des taux élevés de CRP sériques étaient associés à des faibles variations de la VFC [*Sajadieh et al.*,2004]¹⁵⁵.

Arythmie cardiaque

Stoupe^{33,151,153,161}, a montré, dans une méta-analyse, que l'activité géomagnétique élevée semble facteur protecteur sur la survenue d'arythmie cardiaque (tachycardie ventriculaire,

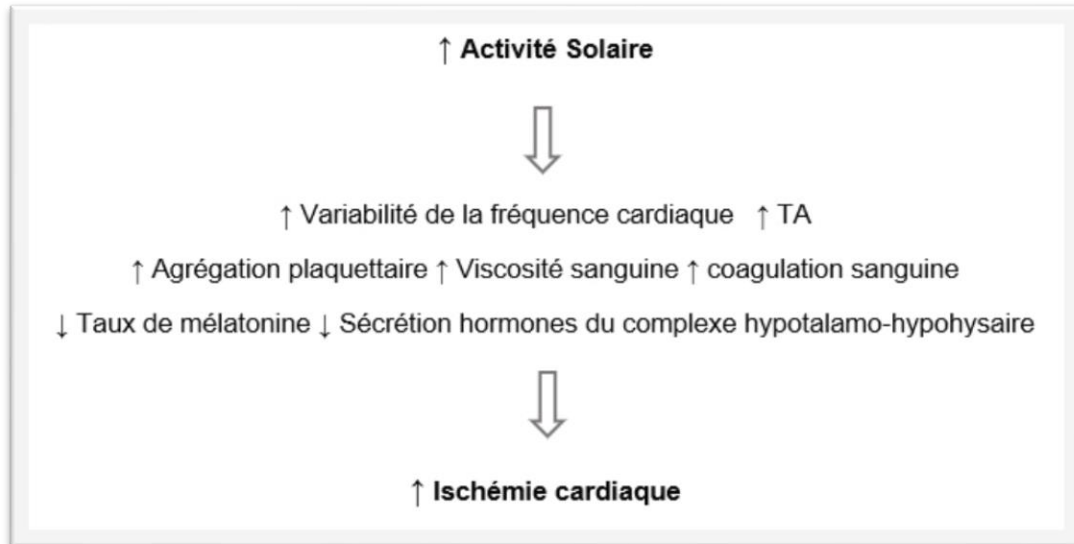
fibrillation atriale, extrasystole supra et infra ventriculaire) et sur la survenue de mort subite cardiaque.

Les mécanismes proposés seraient en lien avec une modification de l'activité électrique cardiaque induite par des faibles taux d'activité géomagnétique. En effet, une étude chez le porc a montré que lors de champs magnétiques très faibles, un allongement de l'intervalle QT et des changements dans les ondes P et T étaient enregistrés. Ces changements s'expliqueraient par un efflux d'ions calcium provenant des myocytes suite au blocage ou à l'inactivation des canaux [Laniadio et al., 2004]¹⁵². En outre, il semblerait que les électrons réagissent à différents niveaux d'activité du champ magnétique ; et seraient moins excitables lors un champ magnétique élevé [Stoupel, 2002]¹⁵³.

Les effets de l'activité solaire sur les paramètres cardiovasculaires sont résumés ci-après. Une forte activité géomagnétique induit :

- Une augmentation de la tension artérielle sanguine, de la viscosité sanguine, des protéines de l'inflammation, du taux de prolactine.
- Une baisse de la VFC, du taux de mélatonine et de GH.
- Une modification de l'activité électrique cardiaque.

Or, ces paramètres interviennent, au moins en partie, dans la physio-pathologie de survenue de l'infarctus du myocarde, d'accidents vasculaires cérébraux ischémique ou hémorragique ou lors de troubles rythmiques cardiaques.



Adapté de l'article de Vencloviene et al.³², 2013.

C) Neurologie

Sclérose en plaques (SEP)

En 2016, une étude grecque [Papathanasopoulos et al.⁶⁹, 2016] a montré que l'activité géomagnétique et solaire pourrait représenter un facteur de risque environnemental concernant la poussée de sclérose en plaques. Leur étude portait sur le cycle solaire numéro 23, de 1996 à 2006. Ils ont inclus tous les patients admis pour poussée de SEP dans un service universitaire de neurologie et ont corrélé ces données à l'activité géomagnétique ainsi qu'à l'intensité et le nombre d'éruptions solaires. Ils ont mis en évidence une augmentation significative du nombre d'admissions pour poussée de SEP, sept à huit mois après une intense activité solaire, notamment lors d'une activité géomagnétique intense.

Concernant le mécanisme sous-jacent, les auteurs suggèrent le rôle indirect de la Mélanine. Une forme oxydée et chargée du précurseur de la mélanine (*melanoma like neuromelanin*) serait produite sous l'influence des rayons cosmiques. Cette forme alternative, par son incapacité à éliminer les radicaux libres, promouvrait la démyélinisation nerveuse [Krone et Grange⁷⁰, 2013].

Accident vasculaire cérébral (AVC)

Il semblerait que des valeurs à la fois très faibles et très élevées d'activité géomagnétique aient un impact sur la survenue des AVC.

*Feigin et al.*⁷¹, en 2014, dans une étude multicentrique conduite sur 23 ans, ont analysé plus de 10 000 patients ayant subi un AVC et confronté ces valeurs à celles annuelles des tempêtes géomagnétiques. Il en ressort qu'au plus l'activité géomagnétique quotidienne est intense, au plus le risque d'AVC est accru avec un effet dose-dépendant. Les hypothèses physiopathologiques seraient en lien avec une augmentation de la pression artérielle³¹, de la fréquence cardiaque³³ et de la viscosité sanguine⁹² lors de forts taux d'activité géomagnétique, ce qui expliqueraient l'augmentation de survenue d'AVC ischémique. Ces mécanismes sont aussi ceux proposés dans la survenue d'infarctus du myocarde.

Migraines

*Kuritzky et al.*²⁸, en 1987, ont montré que l'intensité des céphalées lors de migraine était linéairement et positivement corrélée au niveau d'intensité de l'activité géomagnétique. Cependant, dans cette étude, aucune corrélation n'a été retrouvée entre la fréquence des crises de migraine et le degré d'activité géomagnétique. Les explications du mécanisme proposées par les auteurs sont en lien avec l'augmentation de la viscosité sanguine⁹², du tonus vasculaire¹⁵¹, de l'agrégation plaquettaire⁹² et du taux de prolactine¹⁵¹ lors d'une activité géomagnétique élevée. Ces derniers facteurs étant suggérés faisant partiellement partie de la genèse des migraines²⁸. Une autre étude de *De Mattei et al.*⁷³, en 1994, ne retrouva, pour sa part, aucune augmentation significative de la fréquence de migraines lors de forts taux d'activité géomagnétique.

Hémorragie méningée

Une étude américaine [*Rosenbaum et al.*²⁷, 2001] portant sur les cycles solaires 22 et 23 suggère

une corrélation négative entre l'activité solaire (flux solaire et taches solaires) et incidence d'hémorragie méningée par rupture d'anévrisme intracrânien. Les mécanismes sous-jacents proposés par les auteurs demeurent flous, suggérant le rôle indirect de la modulation du système immunitaire et de la modulation de l'activité circadienne induites par l'activité solaire.

Une étude suisse multicentrique [*Stienen et al.*⁷⁴, 2015], quant à elle, portant sur environ 1000 patients, retrouve une association positive et significative entre fréquence de survenue d'hémorragie méningée par rupture d'anévrismes intracrâniens et intensité de l'activité solaire (mesurée de façon exhaustive via le nombre de taches solaire, l'activité géomagnétique, le flux de protons solaire et le nombre d'éruptions solaires). Le mécanisme suggéré par les auteurs est celui qu'une augmentation de la tension artérielle se retrouve lors d'une forte activité solaire, précipitant alors la rupture d'un anévrisme.

D) Psychiatrie

Dépression, Suicide

Dans une étude de *Kay*²⁹ en 1994, il a été mis en évidence que les tempêtes géomagnétiques sont corroborées avec une augmentation statistiquement significative de 36,2% d'admissions à l'hôpital pour diagnostic de maladie maniaco-dépressive au cours de la deuxième semaine suivant ces tempêtes, par rapport aux périodes de contrôle géomagnétiquement calmes.

Une étude de *Gordon et Berk*³⁰ de 2003, réalisée en Afrique du Sud, portant sur une analyse rétrospective de 13 ans, une corrélation significative ($r = 0,6964$; $p < 0,01$) a été trouvée entre le nombre total moyen de suicides et activité magnétique.

Dans une autre étude de 2005, de *Berk et al.*⁸³, portant sur le nombre total de suicides en Australie de 1968 à 2002, il est montré une corrélation positive, mais portant uniquement une population

féminine, entre nombre de suicide et intensité de l'activité géomagnétique (mesuré via l'indice Ap).

Dans une autre étude japonaise, de 2014, de *Tada et al.*⁸⁴, menée entre 1999 à 2010, il a été retrouvé une association significative entre intensité des tempêtes géomagnétiques et nombre de suicides chez les hommes.

Le mécanisme causal commun passerait par le biais de la sérotonine, de la mélatonine et de la prolactine, ces dernières semblent en effet, sensibles aux variations de l'activité magnétique^{46,95,151}. Or, il a été montré que la dépression et le suicide étaient associés à une baisse du taux de ces hormones [*Cowen et al.*, 1989]¹⁹⁴.

E) Infectiologie

Epidémie de Grippe

Depuis 1700, il est mis en évidence un chevauchement entre la survenue de pandémie de grippe avec leurs cycles solaires correspondants. En effet, les maxima des cycles correspondaient pour la plupart aux acmés des dites pandémies [*Ertef*¹⁵⁷, 1994 ; *Qu*⁸⁵, 2015].

Les mécanismes sous-jacents proposés par les auteurs⁸⁵ seraient liés à l'impact des rayons cosmique sur la structure virale et sur la migration de l'hôte du virus, à savoir les oiseaux.

En effet, le rayonnement solaire et les rayons cosmiques peuvent agir comme des mutagènes physiques produisant des mutations ponctuelles pouvant donner naissance à des souches de grippe capables de provoquer une pandémie. Les mutations en causes sont en lien avec une variation de l'ARN viral qui rend les plus virulentes [*Domingo*¹⁵⁹, 2010].

Il est discuté de la possibilité atypique et rocambolesque de l'apport d'un fragment d'ARN d'origine extra-terrestre via le rayonnement solaire [*Hoyle*¹⁵⁸, 1979]. Les cycles solaires peuvent

influer le climat [cf. *partie III*] B) 2) a)]. Le virus de la grippe sont généralement hébergés par les oiseaux, qui par rapport aux mammifères, échantillonnent l'atmosphère plus complètement et seraient donc idéalement mieux adaptés pour incorporer des virions provenant de l'espace. Le changement climatique poussera les oiseaux à migrer, ce qui affectera à son tour le cycle de transmission du virus de la grippe aviaire et affectera la survie du virus en dehors de son hôte [Gilbert et al.⁸⁷, 2008].

Epidémie de Choléra

Il en va de même pour la survenue d'épidémies de choléra qui se superposent aux données des cycles solaires [Tchijevsky¹⁹, 1971]. Cependant, aucun mécanisme n'est proposé par l'auteur.

Sunspots		Cholera Epidemics		
Maxima	Minima	Beginning	Maxima	Ending
1816	1823	1816	1817	1823
1829/37	1833	1827	1829-31 - 1837	1833
1848	1856	1844	1848	1847
1860	1867	1863	1863-66	1875
1870	1878		1870-72	
1883	1889	1883	1883-86	1889
1894	1900	1890	1892-894	

Tiré de l'article de Tchijevsky¹⁹.

Ces deux tableaux comparent les années de maximas et de minimas de taches solaires (Sunspots) par rapport aux dates de survenue des sept épidémies historiques de Choléra (Cholera epidemics). On y observe une superposition assez homogène de ces différentes dates.

F) Obstétrique

Grossesse gémellaire, Fausse couche, Espérance de vie

Une étude, de *Melnikov*⁸⁸, montra une association significativement négative entre activité solaire et fréquence des grossesses gémellaires, ceci en rapport avec une augmentation du nombre de fausses couches lors de fortes activité solaire [*Lucock et al.*⁸⁶, 2012].

Une étude norvégienne de 2015, de *Skjærvø et al.*⁹⁰, a analysé 8662 naissances en Norvège entre 1676 et 1878 avec l'activité solaire (notamment l'irradiance totale du soleil ainsi que la force de ses ultraviolets). Ils ont montré que les enfants, nés lors d'une période d'activité solaire maximale, avaient une espérance de vie 5,2 ans plus courte que celle d'enfants nés lors d'un minimum solaire.

Le mécanisme sous-jacent de ces constatations est porté par un défaut ponctuel de folate sanguin lors de forte activité solaire⁹⁰. En effet, ce dernier se dégrade sous l'action des rayons ultraviolets produits lors de l'activité solaire⁸⁶. Or, le folate, nécessaire à la synthèse de l'ADN, est essentiel pour le développement d'individus sains au cours de la gestation⁸⁶.

G) Pédiatrie

Mort inattendue du nourrisson

Des études [*O'Connor et Persinger*⁹⁹, 1977 ; *Sturner*¹⁶⁰, 1990] ont retrouvé une corrélation positive entre nombre de cas de mort subite du nourrisson et activité géomagnétique. Leur hypothèse est que la mort subite du nourrisson serait induite par la baisse soudaine du taux de mélatonine nocturne qui initierait un potentiel électrique fatal en réponse à plage spécifique d'activité géomagnétique.

V] INFLUENCE DE L'ACTIVITE SOLAIRE SUR LA CRISE D'EPILEPSIE : REVUE DE LITTERATURE

Pour ce chapitre, la revue de littérature a été réalisée par le biais de « PubMed » et « Google Scholar ». Il n'y avait pas de filtre de recherche. Les mots clés utilisés étaient : « Solar Activity and Seizure », « Solar Activity and Convulsive Seizure », « Solar Activity and Epilepsy ».

La combinaison de recherche a aussi été réalisée par les synonymes des termes « Solar Activity ». A savoir : « Geomagnetic Activity » et « Geomagnetic Storms » et « Sunspots Numbers » et « Solar Flares » et « Solar Cycle ».

Au total, seuls six articles sont référencés avec ces critères.

- *Venkataram*⁴⁰, qui est chercheur en physique, non médecin, publie en 1976, le premier article sur le sujet. Il compara le jour et l'heure précise de survenue de 147 crises épileptiques chez 86 patients épileptiques connus avec les dates d'éruptions solaires et des tempêtes géomagnétiques. Il mit en évidence que 65 % des crises survinrent pendant des périodes d'éruptions solaires et de tempêtes géomagnétiques. Cependant, il n'a fourni aucune analyse statistique appuyant ses conclusions.

Au niveau du mécanisme, il avança l'hypothèse que pour être affecté par une crise d'épilepsie par une perturbation géomagnétique, cela nécessite au corps humain de répondre à un certain niveau de fréquence qui rentrerait en phase avec celle du géomagnétisme. Une conversion de l'énergie magnétique en énergie électrique (telle une dynamo) au niveau cérébral créerait une impulsion électrique qui, chez des personnes prédisposées aux crises, participerait à un environnement favorable à déclencher de telles crises.

Il proposa, au décours de ces recherches, un moyen singulier de prophylaxie de ces perturbations magnétiques, comme celle de porter une sorte de bouclier magnétique autour du corps humain pour des personnes épileptiques connues.

- *Rajaram et Mitra*⁴¹, en 1981, ont réalisé une étude de corrélation sur une période (de 1955 à 1971) correspondant à une partie du cycle solaire numéro 20, analysant le pourcentage de consultation dans un service de neurologie de l'Institut de Bangur en Inde pour première crise d'épilepsie par rapport à tout autre motif neurologique confondu avec le nombre de taches solaires et la variation de l'activité magnétique terrestre moyenne (via l'indice Ap reflétant l'activité quotidienne moyenne géomagnétique). La population correspondait à un total de 21893 patients faisant leur première crise d'épilepsie. Ils ont montré que la fréquence de crises d'épilepsies étaient corrélées de manière significative aux nombres de taches solaires ($r = 0.53$; $p < 0.05$). La corrélation était plus forte pour le versant de l'activité géomagnétique ($r = 0.55$; $p < 0.02$). Ainsi, de 1962 à 1965 où le nombre de taches solaires furent le plus bas, le nombre de patients admis pour crises d'épilepsies évoluaient de la même manière.

Le mécanisme proposé par les auteurs est rudimentaire et empirique avançant que les éruptions solaires pourraient perturber les rythmes électriques cérébraux qui, des fois, se soldaient par des crises d'épilepsies.

- *Stoupel et al.*⁴³, en 1991, ont étudié sur une période de 11 ans le taux d'admission pour crises épileptiques chez 762 patients dont 400 épileptiques connus selon leur genre dans un service de neurologie de l'hôpital universitaire de Petah Tiqy en Israël sur la base des cycles solaire 21 et 22 et avec les données du nombre de taches solaires et de l'activité géomagnétique via l'indice kp et le flux radio de longueur d'onde 10.7 cm.

Il a été mis en évidence des corrélations différentes selon le genre. En effet, pour les femmes, une corrélation positive est retrouvée entre crise d'épilepsie et niveau d'activité géomagnétique alors que chez les hommes, il est retrouvé une corrélation négative avec l'intensité de l'activité géomagnétique ($r = -0.57$; $p = 0.067$) et avec le nombre de taches solaires ($r = -0.54$; $p = 0.089$). Les auteurs évoquent comme mécanisme, la possibilité d'une variation différente à l'activité géomagnétique, selon le genre, d'hormones telles que la GH et la prolactine¹⁵¹.

- *Spottiswoode*⁴⁴, en 1993, a mis en évidence une corrélation positive entre niveau moyen d'activité géomagnétique terrestre (mesuré par l'indice Ap) et fréquence de crises épileptiques à partir de l'analyse de l'agenda de crises de 22 patients épileptiques américains, contenant au total 4101 crises épileptiques sur la période de 1977 à 1991 (cycle solaire numéro 21). L'indice Ap était significativement plus élevé les journées où il y avait le plus grand nombre de crises épileptiques par rapport à la veille de ces journées de fort taux de crise (méthode de Stouffer. Z-score = 2.48, p : 0.007). Cependant, l'auteur signala que son échantillon de patients était inhomogène suggérant que le type de crise ou le type de traitement reçu par les patients répondait différemment aux variations de l'activité magnétique.

Les explications, du mécanisme causal, citées par l'auteur, sont portées par le rôle de la mélatonine⁴⁵, variant négativement à l'activité géomagnétique, précipitant la survenue de crise d'épilepsie ainsi que par une étude ayant montré que le champs magnétique artificiel intense abaisserait le seuil convulsif chez les rats [*Ossenkopp and Cain*, 1988]¹⁶³.

- *Persinger et Psych*⁹³, en 1995, ont montré que l'augmentation brutale et intense de l'activité géomagnétique nocturne pourrait provoquer une proportion importante de décès inattendus (ou inexplicables) chez des patients épileptiques connus. Leur étude, réalisée sur des rats, montrait que le taux de morts subites inattendues chez des rats épileptiques a sensiblement augmenté lorsque l'activité géomagnétique quotidienne moyenne (mesurée via l'indice Dst) était supérieure à 50 nanoteslas. D'autres expériences ont démontré que les rats épileptiques présentaient plus de crises spontanées la nuit s'il y avait eu une augmentation soudaine de l'activité géomagnétique. Les auteurs rappellent que les études précédemment publiées sur le sujet ont montré que le nombre de morts subites inattendues chez les épileptiques humains par mois était positivement associé au nombre de jours par mois où l'activité géomagnétique moyenne dépassait 50 nanoteslas.

L'hypothèse émise par les auteurs pour expliquer le mécanisme de la mort chez ce type de

population est celle que la suppression des concentrations nocturnes de mélatonine endogène, hormone anti-convulsante, par une augmentation soudaine de l'activité géomagnétique, pouvait favoriser des arythmies cardiaques fatales.

- *Keshavan et al.*⁴², en 1981, ont étudié le seuil convulsif de personnes et d'animaux le jour d'une éclipse solaire. Cela portait sur 26 patients psychiatriques traités par sismothérapie ainsi que sur 8 rats, le 16 février 1980, journée où une éclipse solaire totale s'est déroulée ; il a été montré une baisse de leur seuil convulsif par rapport à un jour témoin de nouvelle Lune, le 17 mars 1980. Ceci fut expliqué par la variation de l'activité géomagnétique provoquée par l'éclipse. En effet, l'éclipse a provoqué le blocage de toute propagation de vent solaire depuis le soleil vers la Terre.

VI] INFLUENCE DE L'ACTIVITÉ SOLAIRE DANS DES DOMAINES AUTRES QUE LA MÉDECINE

Un impact de l'activité solaire sur des domaines non médicaux, tels que la physiologie, la psychologie, la sociologie, l'anthropologie, la culture et la science, est retrouvé.

Sur plan sociétal, une augmentation des taux de violences physiques, de criminalité, de révolutions et de la fréquence des attaques terroristes a été liée au cycles solaires et aux perturbations qui en résultent sur le champ magnétique terrestre. De même, qu'un lien a été retrouvé entre évolution du cycle solaire et performances humaines sur le marché financier.

Le dénominateur commun de toutes ces études serait celui que l'activité magnétique intense affecte négativement le comportement, le jugement ainsi que l'humeur [*Bergiannaki et al.*⁹⁴, 1996]. Le mécanisme commun à ces résultats passerait par la sécrétion de mélatonine qui est soumise aux variations de l'activité géomagnétique [*Burch et al.*⁹⁵, 1988 ; *Lapin et al.*⁴⁶, 1998]. Or, cette dernière jouerait un rôle notable dans la genèse des troubles de l'humeur et par exemple dans la dépression [*Kay*²⁹, 1994].

Une revue de littérature, non exhaustive, est proposée explorant ces différents domaines.

1) Sur le plan criminel

*Grigoryev et al.*¹⁶, en 2009, ont montré en utilisant des données d'attentats terroristes suicides en Israël, en Iraq et en Afghanistan (1062 cas de 1994 à 2008), que l'activité géomagnétique était considérablement augmentée ($p < 0,0001$) le jour même et le lendemain d'une telle attaque terroriste.

Les mécanismes supputés par les auteurs sont en lien avec les concentrations sériques de mélatonine et d'adrénaline qui varient en fonction de l'activité magnétique⁹⁵. Les terroristes se

présentent souvent comme des psychopathes, la plupart d'entre eux sont en état de stress émotionnel chronique. Cela signifie qu'une partie des attaques terroristes peuvent être initiées par les changements spontanés de l'état psychique du terroriste, qui peuvent être influencés par l'activité géomagnétique, jouant alors le rôle de facteur précipitant. Cette supposition est appuyée par le fait que les perturbations géomagnétiques exacerbent le degré de dépression chez les patients psychiatriques ainsi que le taux de suicide^{29,30}.

*Avdonina and Samovichev*²², en 1995, ont analysé les crimes commis entre 1980 et 1990 en URSS. L'analyse, de 150 crimes, a montré que ceux-ci surviennent le plus souvent un à trois jours après une forte diminution de l'activité solaire, de l'activité géomagnétique et de la température ambiante à la surface de la terre.

*Persinger*¹³ et *Mikulecký*²¹, ont montré que le nombre de conflits armés de la première moitié du XX^e siècle étaient associés à l'activité géomagnétique globale moyenne annuelle.

2) Sur le plan historique

*Tchijevsky*¹⁹, astronome russe, en 1971, a fait la synthèse de faits historiques marquants depuis le V^e siècle avant JC jusqu'au XIX^e siècle et les corréla en fonction des cycles solaires.

Selon lui, les phénomènes « d'excitation » sociétale, comme les révolutions, se sont produits de manière synchrone avec les maximas solaires et, à l'opposé, les activités pacifiques, telles que la science et l'arts, avec les minimas solaires.

Il remarqua, par exemple, que les périodes d'activités de Napoléon Ier coïncidèrent avec le nombre de taches solaires des cycles en question. L'étude avait été effectuée sur la base des cycles solaires numéro 5 (de 1798 à 1810 avec son maximum en 1804) et numéro 6 (de 1810 à 1823 avec son maximum en 1816). Il remarqua que, de 1809 à 1811 (minima du cycle solaire 5), correspondaient à une période où peu de campagnes militaires furent menées par Bonaparte. L'an 1804 (maximum du cycle solaire 5) correspond à l'année de son sacre, le 2 décembre en la cathédrale Notre-Dame de Paris qui fut partiellement détruite à la suite d'un incendie en 2019,

minima du cycle solaire 24. Autre exemple, l'année 1815, maxima du cycle, correspond à une nouvelle période de guerres pour Napoléon (Les Cents Jours) qui se finira par sa défaite sur le champ de bataille de Waterloo (le 18 juin) puis par son exil sur l'île de Saint Hélène.

Autre exemple cité par l'auteur : l'année 1789, maximum du cycle solaire numéro 4 et année de la Révolution Française.

Aucune explication claire n'est apportée par l'auteur concernant le mécanisme causal.

*Mikulecký*²¹, en 2007, conforta les résultats de *Tchijevsky*¹⁹ en utilisant des données historiques composées de deux séries de révolutions en Europe et en Chine sur une période de plus de 500 ans. Il constata que ces révolutions se sont toutes déroulées sur une période en phase avec les maximas des cycles solaires correspondants et de ce fait à distance des minima de ces cycles.

3) Sur le plan culturel

*Ertef*¹⁵, en 1998, a étudié la distribution temporelle de création d'œuvres remarquables telles que celles relevant de la peinture, de la poésie ainsi que de découvertes scientifiques majeures sur une période allant de 1400 à 1800 en Europe occidentale et en Chine. Il est mis en évidence, que cette distribution s'avère périodique sur environ dix années, tant pour les œuvres chinoises qu'euro péennes. De plus, les maximas de productions culturelles sont en phase temporellement pour les deux civilisations. Or, à priori, les deux civilisations n'ont eu aucunes influences mutuelles sur leurs propres établissements culturels. Il est proposé par l'auteur du fait de ces observations, l'effet de l'activité solaire et son cycle d'environ 11,2 ans comme facteur externe majeur. Aucune explication claire n'est apportée par l'auteur concernant le mécanisme causal.

4) En économie

Une étude, de *Krivelyova et Robotti*²⁰ de 2003, a montré que les rendements des marchés boursiers mondiaux et nationaux varient de manière négative aux variations de l'activité géomagnétique de la semaine précédente.

Les explications proposées par les auteurs sont en lien avec la variation de l'humeur²⁹, du jugement, des décisions et donc de la performance des financiers au travail (par le biais hormonal de la mélatonine⁹⁴) en fonction du niveau d'activité géomagnétique.

5) En physiologie animale

Dans les années soixante-dix et quatre-vingt, un certain nombre de publications se sont intéressées à la trajectoire de vol d'un pigeon d'espèce *Columba Livia var. domestica*.

Ainsi, *Keeton et al.*⁹⁶ en 1974, ont relâché plusieurs fois des pigeons, de cette espèce, à une distance de 70 km au Nord puis à 70 km à l'Ouest de leur pigeonnier et ont observé leur trajectoire de retour. Ils ont mis en évidence que leur trajectoire déviait fortement lorsque l'activité magnétique locale était plus forte. Une étude similaire, réalisée par *Larkin and Keeton*¹⁴ en 1976, a corroboré ces résultats. Plus tard, les effets de l'activité géomagnétique sur l'orientation des pigeons ont été démontrés [*Kowalski et al.*¹⁸, 1988].

6) En Agriculture

La qualité de production de vins français semblerait liée à la variation de l'activité solaire. Par exemple, les vins de millésimes 1947 et 1959 coïncident avec deux maximas solaires (respectivement ceux des cycles solaires 18 et 19) [*Muller*⁶⁶, 2014]. Cependant, aucune explication n'est apportée par l'auteur concernant le mécanisme causal.

VII] INFLUENCE DE L'ACTIVITE SOLAIRE SUR LES CRISES D'ÉPILEPSIES : ETUDE SUR 11924 CONSULTATIONS AUX URGENCES SUR UNE PERIODE DE NEUF ANS

A) OBJECTIFS

L'objectif principal de l'étude est, par le biais d'une étude quantitative et rétrospective, de chercher une corrélation entre :

- La variation temporelle du nombre de personnes consultantes aux Urgences Adultes et Enfants du Centre Hospitalier Universitaire de Lille, tout âge et sexe confondus, pour les motifs globaux de crises épileptiques ou convulsions sur une période s'étalant du 16 mars 2010 au 31 décembre 2018 inclus ;
- Et la variation temporelle de l'activité solaire au travers des trois paramètres du cycle solaire numéro 24 (variation quotidienne de l'activité géomagnétique, du nombre d'éruptions solaires ainsi que du nombre de taches solaire) ;
- Et ce avec un temps de latence (*lag time*) de 7 jours entre survenue d'une tache solaire ou d'une éruption solaire et consultations pour crise d'épilepsie.
- Et sans temps de latence pour la mesure de l'activité géomagnétique et observation de la variation du nombre de consultations.

Les objectifs secondaires étant de corréler les trois paramètres de l'activité solaire à des sous-types de population classés selon le genre, l'âge, et selon trois entités diagnostics (convulsion fébrile, épilepsie focale et épilepsie généralisée).

Les pics d'activité solaire étant prévisibles à l'avance (on parle alors de météorologie solaire) ; L'objectif potentiel pratique de ce travail, si les résultats sont en faveur du lien de corrélation entre

activité solaire et épilepsies, serait en prévision d'une forte activité solaire, la mise en place d'une quelconque prophylaxie.

B) MATERIELS ET METHODE

1) Population

Critères d'inclusion :

L'étude a été menée au Service des Urgences Adultes et Enfants du Centre Hospitalier Universitaire (CHU) de Lille sur la période d'étude courant du 16/03/2010 au 31/12/2018 inclus. Il a été recueilli, quotidiennement, le nombre de consultations médicales de patients de tout âge, que ce soit adultes ou enfants, aux urgences, pour les diagnostics principaux de crises d'épilepsies. La limite d'âge de 15 ans et 3 mois définit l'orientation des patients : soit dans le service enfants (inférieur ou égal à 15 ans et 3 mois) ou dans le service adulte (strictement supérieur à 15 ans et 3 mois).

Le logiciel informatique utilisé pour recueillir ces données est *ResUrgences*®. Ce logiciel sert, entre autres, pour la constitution du dossier médical informatisé aux Urgences Adultes et Enfants du CHU de Lille. Il a été procédé, à partir de ce logiciel, à une recherche informatique par codes selon la Classification internationale des maladies, 10^e révision (CIM-10), sur la période d'étude, pour établir l'ensemble de ces données.

Caractéristiques des crises incluses

Le *tableau 0* contient les différentes formes de diagnostics inclus de manière quotidienne sur la période d'étude.

Tableau 0

Code (CIM-10)	Diagnostics correspondants
G 40.0	Épilepsie et syndromes épileptiques idiopathiques définis par leur localisation (focale, partielle) avec crises à début focal
G 40 .1	Épilepsie et syndromes épileptiques symptomatiques définis par leur localisation (focale, partielle) avec crises partielles simples
G 40.2	Épilepsie et syndromes épileptiques symptomatiques définis par leur localisation (focale, partielle) avec des crises partielles complexes
G 40.3	Épilepsie et syndromes épileptiques généralisés idiopathiques
G 40.4	Autres épilepsies et syndromes épileptiques généralisés
G 40.5	Syndromes épileptiques particuliers
G 40.6	Crise de grand mal, sans précision (avec ou sans petit mal)
G 40.7	Petit mal, sans crises de grand mal, sans précision
G 40.8	Autres épilepsies
G 40.9	Épilepsie, sans précision
R 56.0	Convulsions fébriles
R 56.8	Convulsions, autres et non précisées

Pour l'étude de l'objectif principal, la somme (addition des codes G40 et R56) des tous les sous-codes cités ci-dessus correspond à la définition des consultations médicales pour motifs de crises épileptiques.

Pour l'étude des objectifs secondaires, les données définissant la convulsion fébrile correspondent à la somme des code R 56.0 pour les adultes et les enfants. Celles définissant l'épilepsie partielle correspondent à la somme des codes G 40.0 + G40.1 + G 40.2 pour les adultes et les enfants. Et celles définissant l'épilepsie généralisée correspondent à la somme des codes G 40.3 + G 40.4 pour les adultes et les enfants.

Les diagnostics et les codages correspondants sont établis par le médecin sénior, l'interne lors de la finalisation du dossier. Les renseignements obtenus à l'issue de la recherche informatique par consultation comportent : l'âge, le sexe, la date précise de consultation avec heure de consultation et de sortie, l'orientation après le passage aux urgences ainsi que le numéro IEP du patient, correspondant à son identité traduit en code barre numérique. Toutes les données sont donc indirectement anonymes. Le recueil a débuté le 16 mars 2010, date de début d'utilisation du logiciel *ResUrgences*® au CHU de Lille.

2) Données de l'activité solaire

Toutes les informations nécessaires sur l'activité solaire furent recueillies sur le site internet : www.spaceweatherlive.com⁷. Ce site, en accès libre par tout internaute, centralise toutes les données de l'activité solaire, hors activité géomagnétique, provenant de la Space Weather Prediction Center de la National Oceanic and Atmospheric Administration⁹ (NOAA), basé aux Etats Unis d'Amérique ainsi que celle de la National Aeronautics and Space Administration¹¹ (NASA). L'activité géomagnétique est, pour sa part centralisée sur ce site internet depuis les données du German Research Center for Geosciences⁹⁷ (GFZ, cf. infra).

Il a été récupéré rétrospectivement, et de manière quotidienne, du 16 mars 2010 au 31 décembre 2018 inclus, les données suivantes :

- Indice Ap de l'activité géomagnétique
- Le nombre et l'intensité des éruptions solaires
- Le nombre de taches solaires visualisées.

Concernant l'activité magnétique :

Les données de l'indice Ap quotidien sont centralisées et gérées par le German research center for geosciences⁹⁷ (GFZ) à Potsdam en Allemagne. Elles sont accessibles gratuitement en ligne.

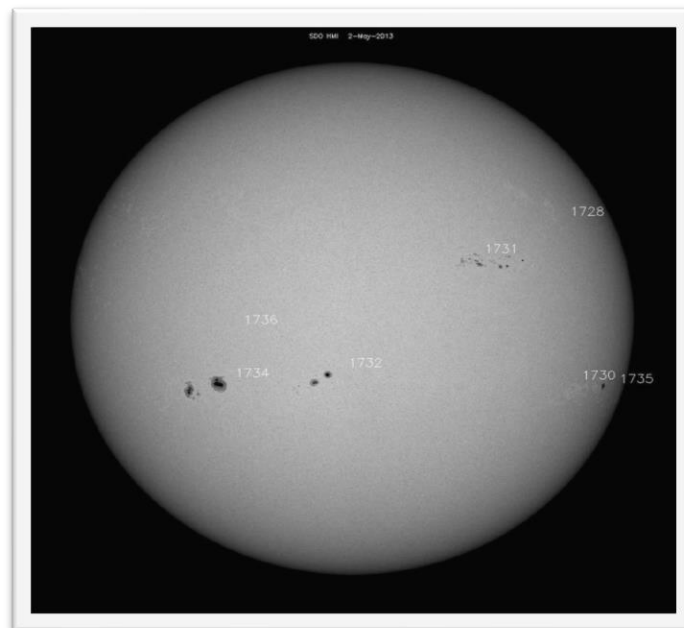
Concernant les éruptions solaires :

Les mesures de l'intensité et le comptage des éruptions sont réalisés par le satellite américain GOES-15 (Geostationary Operational Environmental Satellite) opéré par la National Oceanic and Atmospheric Administration⁹ (NOAA). C'est un satellite géostationnaire au-dessus de l'océan pacifique.

Concernant le nombre quotidien de taches solaires observées :

Celui-ci nous est fourni par des observatoires spatiaux solaires qui correspondent :

- à l'Observatoire Solaire et Hélosphérique⁹⁸ (SOHO) mis en place conjointement par la National Aeronautics and Space Administration (NASA) et L'Agence Spatiale Européenne (ESA).
- à l'Observatoire Dynamique Solaire⁹⁹ (Solar Dynamic Observatory, SDO) dépendant de la NASA.



Décompte du nombre du nombre de taches solaires quotidien. Image fournie par l'observatoire SDO, exemple sur la journée du 02 mai 2013. Source : NASA⁹⁸



Le satellite SOHO en orbite. Source : NASA⁹⁹.

3) Méthodologie statistique

L'outil statistique utilisé est le coefficient de corrélation de Pearson (r). Il indique une force de corrélation linéaire entre deux variables aléatoires X et Y où $(X_i - \mu_x) / \sigma_x$, μ_x et σ_x sont le score standard, la moyenne de l'échantillon et l'écart-type de l'échantillon pour la variable aléatoire X . Respectivement, $(Y_i - \mu_y) / \sigma_y$, μ_y et σ_y pour la variable aléatoire Y .

$$r(X, Y) = \left(\frac{1}{n-1} \right) \sum_i \left(\frac{X_i - \mu_x}{\sigma_x} \right) \left(\frac{Y_i - \mu_y}{\sigma_y} \right)$$

r a une valeur comprise entre +1 et -1. Si $r(X, Y) = 0$, il n'y a pas de corrélation entre X et Y . Au plus $r(X, Y)$ est proche de +/-1 au plus la corrélation est forte. La positivité de r indique une relation de corrélation positive entre les 2 variables X et Y . Inversement pour la négativité de r .

r est considéré comme statistiquement significatif si la p-value associée est strictement inférieure à 0.05.

Sur la période d'étude, nous avons calculé le coefficient de corrélation de Pearson entre les paramètres de l'activité solaire (indice Ap, nombre de taches solaires, nombre d'éruptions solaires) et les paramètres des consultations médicales (nombre de consultations pour crises épileptique).

Ce calcul a été réalisé à partir des données mensuelles de ces deux paramètres d'étude (ceux de l'activité solaire et ceux de la population) et la mesure a été réalisée avec un temps de latence de 7 jours entre la survenue d'une éruption solaire et/ou d'une tache solaire et l'observation de nombre de consultations sauf pour la corrélation avec l'indice Ap où la mesure a été réalisée sans temps de latence.

Dans un second temps, et sur le même schéma d'étude, nous avons calculé ce même coefficient de corrélation de Pearson entre les paramètres de l'activité solaire (indice Ap, nombre de taches solaires, nombre d'éruption solaire) et des sous-paramètres de la population classée par tranche d'âge (enfants, adultes), genre, et par formes cliniques de diagnostic : convulsion fébrile, épilepsie partielle, épilepsie généralisée.

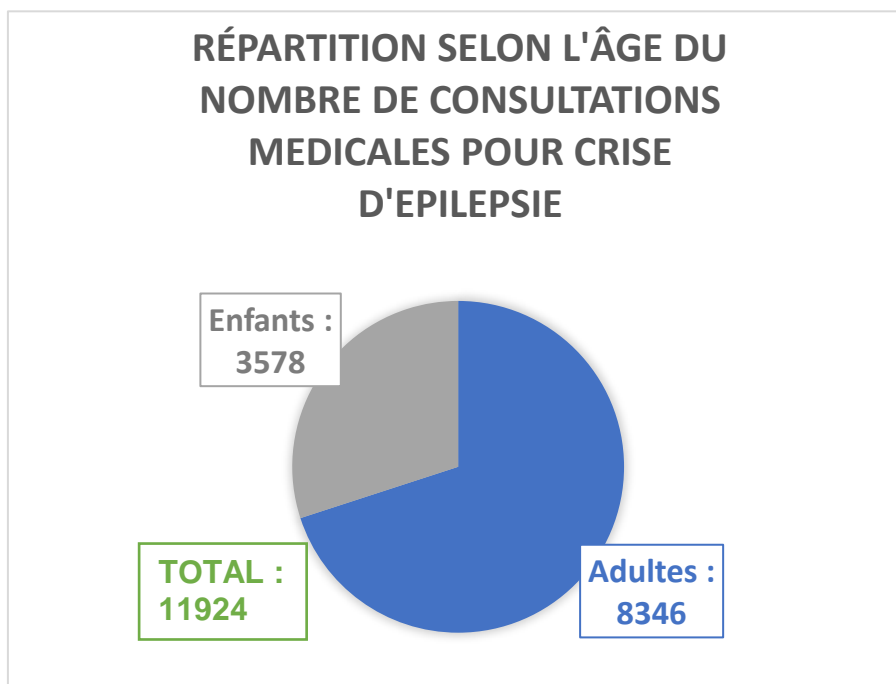
C) RESULTATS

1) Description de la population

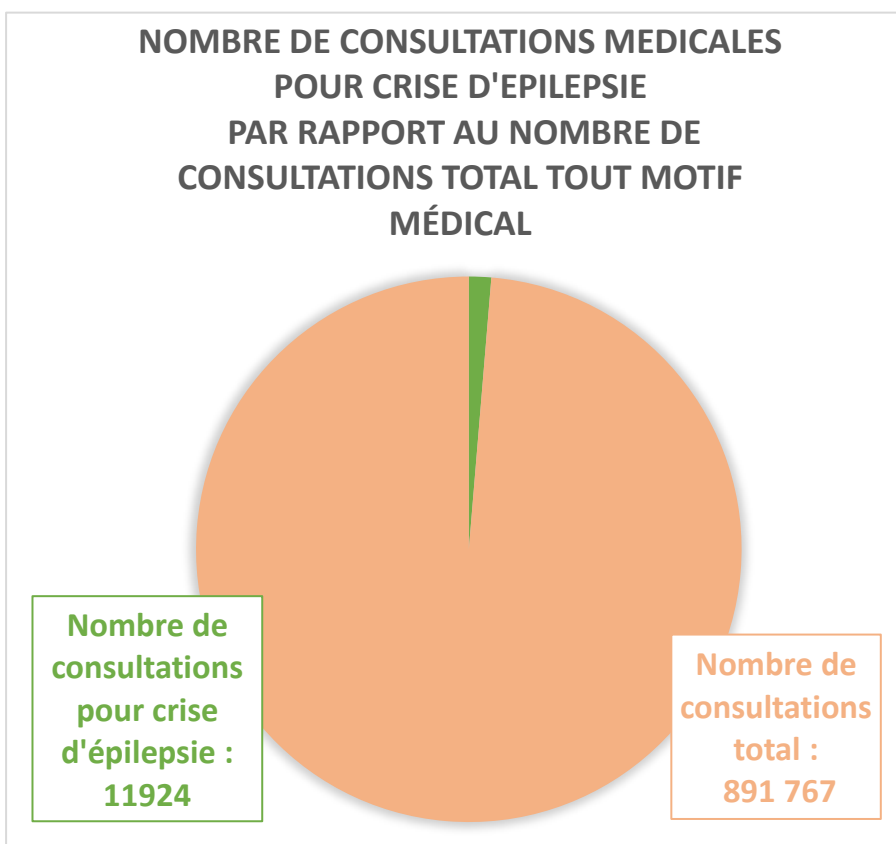
Consultations médicales pour crise d'épilepsie (addition des codes G40 et R56)

Sur la période d'étude, 11924 consultations médicales pour crise d'épilepsie sur un total de 891 767 consultations pour tout motif médical confondu ont été répertoriées aux Urgences Adultes et Enfants, dont 8346 consultations pour les adultes et 3578 pour les enfants (*cf. graphe 1*). Ce qui représente environ 1.34% du nombre de consultations médicales total pour tout motif médical confondu aux urgences (*cf. graphe 2*). La répartition de la population selon le genre est la suivante : 44.7 % de femme (5326 consultations) et 53,3% d'homme (6598 consultations) (*cf.*

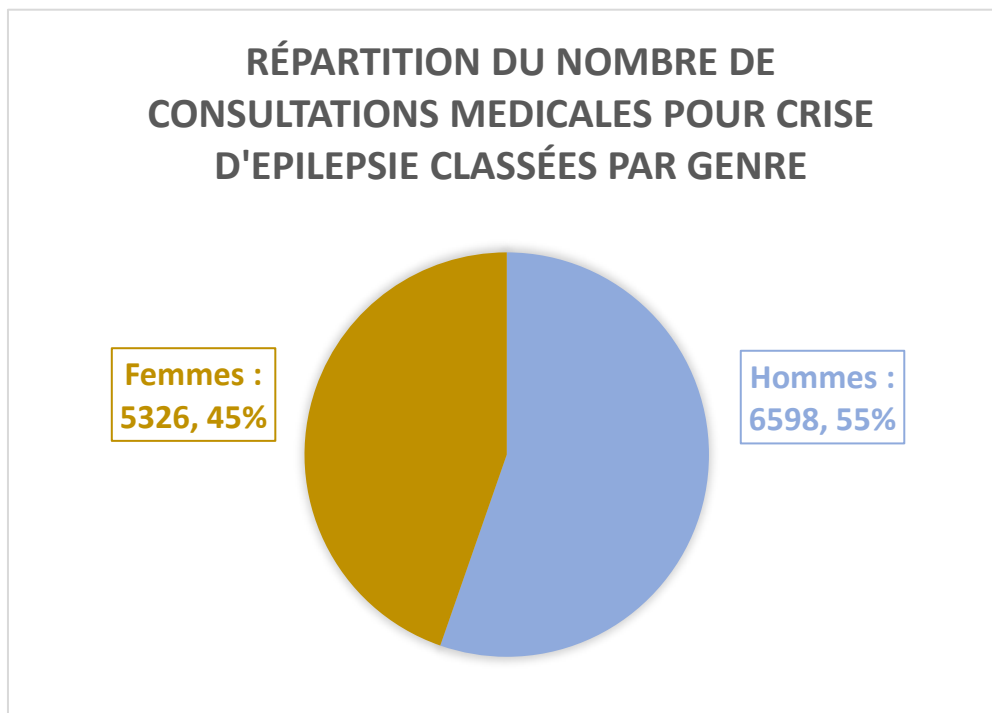
graphe 3). L'âge moyen de la population est de 34,37 ans. Les valeurs extrêmes d'âge varient entre 0 à 101 ans.



Grappe 1



Grappe 2



Graphe 3

2) Données de l'activité solaire

Les valeurs remarquables de l'activité solaire sur la période sont reprises dans le *tableau 1*.

Tableau 1.

Distribution quotidienne des données de l'activité solaire sur la période d'étude	Indice Ap	Nombre d'éruptions solaires	Nombre de taches solaires
Valeurs minimales	0	0	0
Valeurs maximales	108	23	296
Moyenne	8.8	2.6	60.7
Médiane	6	1	53
1 ^{er} quartile	4	0	20.5
3 ^{ème} quartile	10	4	92

3) Calculs et analyses des coefficients de corrélation de Pearson

Le *tableau 2* regroupe les différents calculs de coefficients de corrélation de Pearson (r) avec leurs p -value associées entre les données de l'activité solaire et celles de la population.

Concernant les taches solaires, il est montré une corrélation positive statistiquement significative entre le nombre de ces taches avec l'ensemble de la population [$r = 0.2484$; p -value = $0.0101 < 0.05$]. Concernant les sous-ensembles au sein de la population, il est retrouvé une corrélation positive statistiquement significative avec la population adulte [$r = 0.3140$; p -value = $0.0010 < 0.05$], pour le genre masculin et féminin [$r = 0.2509$; p -value = $0.0096 < 0.05$]. La corrélation la plus forte se retrouve avec les crises d'épilepsies partielles [$r = 0.5467$; p -value = $1.597 \cdot 10^{-9} < 0.05$]. Il n'est pas retrouvé de corrélation statistiquement significative pour les enfants, les diagnostics de convulsion fébrile et d'épilepsie généralisée.

Concernant les éruptions solaires, il est retrouvé des résultats quasiment similaires avec une corrélation positive statistiquement significative avec l'ensemble de la population [$r = 0.2364$; p -value = $0.0147 < 0.05$].

Concernant les sous-ensembles au sein de la population, il est retrouvé une corrélation positive statistiquement significative avec la population adulte [$r = 0.2652$; p -value = $0.0060 < 0.05$], pour le genre masculin et féminin [$r = 0.2449$; p -value = $0.0015 < 0.05$]. La corrélation la plus forte se retrouve avec les crises d'épilepsie partielles [$r = 0.4462$; p -value = $1.832 \cdot 10^{-6} < 0.05$].

Il n'est pas retrouvé de corrélation statistiquement significative pour les enfants, les diagnostics de convulsion fébrile et d'épilepsie généralisée.

Concernant l'indice géomagnétique A_p , il n'est retrouvé aucune corrélation statistiquement significative avec la population globale ainsi que pour les différents sous-groupes

Tableau 2.

		Données de l'activité Solaire ⁽³⁾		
		Taches solaires ⁽¹⁾	Eruptions solaires ⁽¹⁾	Indice Ap ⁽²⁾
Population consultante pour crise d'épilepsie ⁽³⁾	Tous patients	r = 0.2484* p = 0.0101	r = 0.2364* p = 0.0147	r = 0.0410 p = 0.6764
	Hommes	r = 0.2503* p = 0.0096	r = 0.2449* p = 0.015	r = 0.0598 p = 0.059
	Femmes	r = 0.2503* p = 0.0096	r = 0.2449* p = 0.015	r = 0.0598 p = 0.0590
	Adultes	r = 0.3140* p = 0.0010	r = 0.2652* p = 0.0060	r = 0.0800 p = 0.0892
	Enfants	r = - 0.0296 p = 0.7634	r = - 0.0366 p = 0.7091	r = 0.0231 p = 0.8141
	Convulsion fébrile	r = - 0.1172 p = 0.2335	r = - 0.0789 p = 0.4235	r = 0.0177 p = 0.8576
	Epilepsie partielle	r = 0.5467* p = 1.597.10 ⁻⁹	r = 0.4462* p = 1.832.10 ⁻⁶	r = 0.0100 p = 0.9070
	Epilepsie généralisée	r = 0.1640 p = 0.0963	r = 0.1065 p = 0.2816	r = -0.1700 p = 0.7295

r = coefficient de corrélation de Pearson

p = *p*-value

* résultats significatifs

⁽¹⁾ avec un temps de latence de 7 jours

⁽²⁾ sans temps de latence

⁽³⁾ valeurs mensuelles sur la période d'étude.

4) Description annuelle des paramètres

Le *tableau 3* résume les données annuelles cumulées, sur la période d'étude, de l'activité solaire et de la population consultante pour les motifs de crise d'épilepsie ainsi que le pourcentage du nombre de consultations pour crises d'épilepsie par rapport au nombre total global des consultations tous motifs confondus. Le cycle solaire numéro 24 est défini par la variation annuelle de taches solaires de 2008 à 2020. Les éruptions solaires considérés sont celles à partir de la classe C. Les tempêtes géomagnétiques sont définies lorsque l'indice Ap quotidien est ou égal à 16.

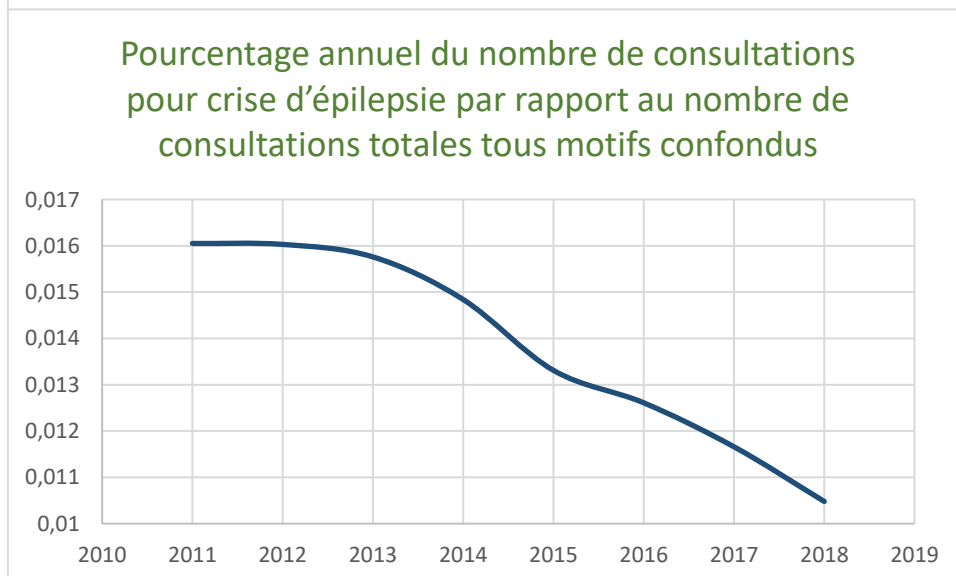
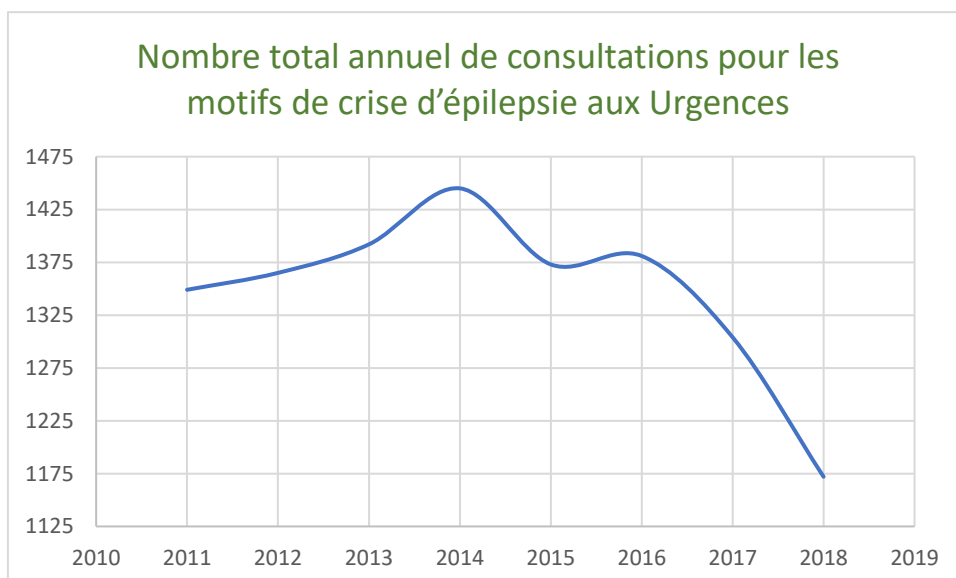
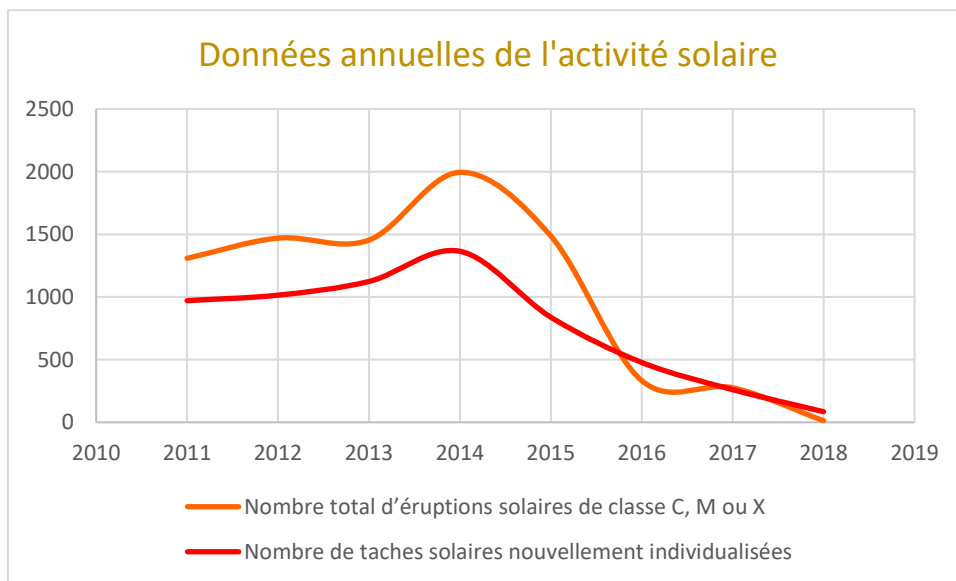
Les *graphes 4* mettent en perspective l'évolution temporelle annuelle des paramètres de l'activité solaire avec le nombre total de consultations pour crise d'épilepsie ainsi que le ratio de ces dernières par rapport au nombre total de consultations tous motifs confondus.

Une superposition des courbes entre les données de l'activité solaire et celles relatives aux crises d'épilepsies est aisément identifiable, notamment pour les années 2014, 2015, 2017 et 2018 correspondantes au déclin du cycle numéro 24. Lorsque l'activité solaire est la plus faible, le ratio du nombre de consultations pour crises d'épilepsies par rapport au nombre de consultations totales est le plus faible. On en déduit une tendance d'évolution partiellement similaire de ces deux paramètres sur une partie de cycle 24. Cependant, aucun test statistique sur ces données annuelles n'a pu être réalisé, ces résultats sont donc justes descriptifs.

Tableau 3.

ANNEE * à partir du 16 Mars	*2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
DONNEES DE L'ACTIVITE SOLAIRE									
Nombre total d'éruptions solaires de classe C, M ou X	102	1309	1470	1454	1995	1487	333	276	13
Nombre de taches solaires nouvellement individualisées	400	971	1015	1124	1365	839	478	261	85
Nombre total de tempêtes géomagnétiques (jours où l'activité magnétique à un indice Ap>ou égal à 16)	15	34	52	30	23	69	65	53	20
NOMBRE DE CONSULTATIONS POUR CRISE D'EPILEPSIE									
Nombre total de consultations pour les motifs de convulsions aux Urgences	1144	1349	1365	1392	1445	1373	1381	1304	1172
Pourcentage du nombre de consultations convulsions par rapport au nombre de consultations totales	0,01601	0,01605	0,01603	0,01576	0,01484	0,01331	0,01261	0,01166	0,01048
Nombre de consultations totales aux urgences	68023	84035	85151	88310	97331	103084	109542	111828	111776

Graphes 4.



D) DISCUSSION

1) Originalité et force

Cette étude est, à notre connaissance, la première examinant la relation entre risque convulsif et variation de l'activité solaire sur la base du cycle solaire numéro 24 ; et portant sur l'analyse de trois paramètres simultanés que sont le nombre de taches solaires, le nombre d'éruptions solaires et sur l'indice géomagnétique avec des sous-groupes de populations convulsants (notamment avec un classement par genre et type de crise d'épilepsie). C'est la seule étude réalisée sur le sujet depuis plus de vingt ans et portant sur une population d'étude française. La grande population étudiée (avec près de 12 000 consultations) sur une longue période de plus de huit ans comportait des patients convulsants épileptiques connus ou primo-convulsants. De plus, les données de l'activité solaire étaient précises et fournies à partir de sources fiables.

Les résultats suggèrent une corrélation positive statistiquement significative entre la fréquence de survenue mensuelle de crises épileptiques et la variation d'activité solaire représentée par le nombre d'éruptions solaires et de taches solaires. La corrélation la plus forte étant retrouvée entre nombre mensuel de taches solaires et nombre mensuel de crises d'épilepsies partielles.

La corrélation n'étant pas synonyme de causalité, il faut analyser avec précaution les résultats retrouvés. De plus, l'activité solaire ne pourrait en aucun cas expliquer à elle seule la survenue de crises, c'est un potentiel facteur environnemental favorisant celles-ci parmi d'autres.

Taches solaires

Les résultats significatifs et positifs portant sur la corrélation positive avec le nombre de taches solaires et celui des crises d'épilepsie sont en accord avec le peu d'études publiées sur le sujet (*cf. chapitre V.*), en particulier avec celle de *Rajaram & Mitra*⁴¹. Dans cette étude, le coefficient

de corrélation retrouvé était plus élevé ($r = 0.53$; $p < 0.05$) que dans mon étude ($r = 0.25$ $p < 0.01$), mais les populations d'inclusion étaient différentes, là où seuls les patients effectuant leur première crise d'épilepsie étaient inclus dans leur étude. De plus, le cycle solaire étudié (numéro 20) était beaucoup plus actif que le cycle étudié lors de notre étude (cycle solaire 24) qui est l'un des plus faibles, en termes d'activité, enregistré depuis le début des mesures.

La corrélation statistiquement significative négative entre genre masculin et admissions pour crise d'épilepsie dans l'étude de *Stoupe*⁴³ ($r = -0.54$; $p = 0.089$) n'est pas retrouvée dans notre étude ($r = 0.23$; $p = 0.0096$), cependant l'effectif d'inclusion était beaucoup plus réduit dans son étude (762 patients consultants) que dans la nôtre (hommes = 6598).

Concernant la plus forte corrélation avec l'activité solaire retrouvée, à savoir sur les épilepsies partielles ($r = 0.5467$; $p = 1.597.10^{-9}$), aucune étude ne retrouve une telle observation. Aucune explication physio-pathologique spécifique à ce résultat ne pourra y être proposée (pour les autres explications, cf. *chapitre VII. D. 3.*).

Eruptions solaires

Les résultats portant sur la corrélation entre le nombre d'éruptions solaires et de crises épileptique sont en accord avec l'unique étude sur le sujet, celle de *Venkataram*⁴⁰ (cf. *chapitre V.*). Mais, dans son étude aucune mesure statistique n'avait été réalisée.

Activité géomagnétique

Concernant l'activité géomagnétique, aucune corrélation significative n'a été retrouvée avec la fréquence des crises épileptiques, ce qui est en désaccord avec la plupart des études (cf. *chapitre V.*), notamment celles de *Venkataram*⁴⁰, *Rajaram et Mitra*⁴¹, *Stoupe*⁴³ et *Spottiswoode*⁴⁴ où, une association significative et positive est retrouvée sauf dans l'étude de *Stoupe*⁴³ où une association négative entre ces deux paramètres est retrouvée chez les hommes.

Dans la littérature, seules les études de *Rajaram et Mitra*⁴¹ et de *Spottiswoode*⁴⁴ ont utilisé l'indice Ap comme témoin de cette activité. Dans l'étude de *Spottiswoode*⁴⁴, il est retrouvé une association positive significative entre jours aux forts taux d'Ap et nombres de crises d'épilepsies. Cependant, la population d'étude est différente de notre étude car ne comportait que des personnes épileptiques connues. Dans celle de *Rajaram et Mitra*⁴¹, la population comportait un effectif quasiment double du notre, mais ne comportait uniquement des personnes ayant effectué leur première crise.

Dans l'étude de *Stoupe*⁴³, le marqueur de l'activité géomagnétique utilisé était le flux radio de longueur d'onde 10.7cm. Les données de ce marqueur n'ont pas pu être utilisées lors de notre étude par difficulté d'accès à des données publiques.

Concernant l'activité géomagnétique, dans notre étude, il n'a pas été retrouvé de corrélation significative avec les données de toute la population confondue. Comme décrit précédemment, il existe de nombreux indices mesurant l'activité géomagnétique. Il n'en a été utilisé qu'un seul dans l'étude par facilité d'accès à ces données. En effet, il était difficile de récupérer des données quotidiennes des autres indices faute de bases de données disponibles en ligne. Cet indice Ap provient de la somme d'indice de 13 magnétomètres répartis sur le globe (*cf. chapitre III. B. 4.*). Cependant, aucun des magnétomètres utilisés pour la création de cet indice n'est situé sur le territoire français. Il existe, pourtant bien, un magnétomètre en France métropolitaine à Chambon-la-Forêt dans le Loiret mais les données issues de ce dernier ne sont disponibles que par le biais de l'indice Dst (Disturbance Storm index) qui représente une variation temporelle quotidienne en nanoteslas de l'activité magnétique et ne comporte pas de valeur absolue. Ce qui aurait compliqué l'analyse dans mon étude. De plus, comme décrit précédemment (*cf. chapitre III.*), l'activité géomagnétique est en majeure partie influencée par l'activité solaire mais pas uniquement. En effet, le champ magnétique propre à notre terre, par exemple, modifie cette activité. De plus, le cycle solaire 24 est le cycle le plus faible en termes d'activité par rapport aux

autres cycles. Ces trois éléments pourraient, en partie, expliquer l'absence de résultats significatifs.

Enfin, des études [*Randall*¹⁰⁰, 1990 ; *Palmer et al.*¹², 2006] ont montré que l'influence de la perturbation de l'activité magnétique sur la santé humaine est corrélée aux latitudes magnétiques. Au plus les latitudes sont proches des pôles (90°), au plus l'effet sur la santé humaine serait important. On pourrait alors penser, en extrapolant, que la latitude pourrait aussi intervenir dans le risque de crise convulsif en fonction de cette activité magnétique. Or, notre étude est monocentrique et ne comporte, à priori, un recrutement de personnes vivant, peu ou prou, à la même latitude centrée autour de celle de la ville de Lille (50.63°) et le recensement précis du lieu de crises n'a pu être réalisé. L'effet de la latitude sur le risque convulsif en fonction de l'activité géomagnétique n'a donc pas pu être mesuré dans l'étude.

Résultats des données annuelles : *Tableau 3.*

Ces résultats, étant juste descriptif, sont à prendre avec précaution d'interprétation. On peut y observer une tendance des données des consultations mimant la variation cyclique solaire (numéro 24) notamment lors de la fin du cycle où l'activité est la plus faible. Une telle superposition annuelle de ces paramètres a déjà été retrouvée pour le cycle solaire 20 dans l'étude de *Rajaram et Mitra*⁴¹ ainsi dans celle de *Stoupe*⁴³ sur les cycles 21 et 22.

De plus, des études ont montré l'absence de périodicité naturelle au long cours des crises épileptiques chez des épileptiques connus, ce qui limite un éventuel facteur de confusion [*Milton et al.*¹⁰¹, 1987 ; *Taubøll et al.*¹⁰², 1991 ; *Ruegg et al.*¹⁰³, 2008]. A court terme, une périodicité circadienne a déjà été décrite [*Quigg et al.*¹⁰⁴, 2004 ; *Gurkas et al.*¹⁰⁵, 2016] avec un pic en milieu de journée et un creux en début de nuit [*Hofstra et al.*¹⁰⁶, 2009]. Les explications proposées par les auteurs sont en lien avec le niveau de vigilance et d'alerte des patients qui fluctue au cours de la journée et qui semble être moindre en milieu-fin d'après-midi car correspondant aux fins de

jours de travail. En effet, une baisse de vigilance semble être associée à une baisse du seuil épileptogène [*Amzica*¹⁰⁷, 2002].

2) Limites et biais

Population

La population comportait des personnes qui consultaient pour crise d'épilepsie dans le cadre de leur première crise ou dans le cadre d'une maladie épileptique connue. Ces derniers avaient ou non un traitement de fond antiépileptique. Cependant, il n'a pas été possible, pour raison technique et temporelle, de quantifier ces caractéristiques. Seule l'étude de *Rajaram et Mitra*⁴¹ comportait un effectif plus grand avec près de 22 000 patients différents mais consultants uniquement pour leur première crise ; seule l'étude de *Stoupe*⁴³ comportait cette population mixte regroupant des primo-convulsants et des patients convulsants le cadre d'une épilepsie maladie. Dans les études de *Venkataram*⁴⁰ et de *Spottiswoode*⁴⁴ la population incluse était faite de patients épileptiques connus.

Un biais de classement a pu se rencontrer lors de la constitution de l'échantillon. En effet, le diagnostic final étant codé informatiquement lors de la finalisation du dossier patient, une erreur de codage n'est pas à exclure. De plus, il y a pu avoir une sur-représentation de la population « convulsante » chez les patients ayant pour diagnostic final le code G40.9 : « épilepsies sans précisions ». En effet, sous ce terme diagnostic, n'est peut-être que classé les personnes ayant une maladie épileptique connue évolutive mais n'ayant pas convulsées. Or, cet effectif représente environ 32 % de l'effectif global. De même, il n'a pas été possible de vérifier, pour raison technique, le contenu de chaque dossier médical des patients. De ce fait, il n'y avait donc pas de critère d'exclusion lors de la constitution de l'échantillon.

La population choisie n'est pas représentative de la population générale car elle a été incluse à l'hôpital du Centre Hospitalier Universitaire de Lille qui est référent en matière de prises en charges d'épilepsie dans les Hauts de France. De ce fait, il y a pu y avoir un biais de recrutement dans la mesure où des patients ayant une épilepsie plus lourde en termes de traitements ou dans l'évolution même de la maladie, par exemple, auraient pu être sur-représentés.

Données de l'activité solaire

Lors de la constitution des données de l'activité solaire, il n'y avait pas à ma disposition de tables préremplies des trois paramètres (éruptions solaires, taches solaires et indice Ap) sur la durée de notre étude. Pour les besoins de l'analyse statistique, il a donc été réalisé, par mes soins, un tableau de recueil quotidien de ces paramètres depuis des données de l'internet. Ce qui correspondait à plus de 9500 données à rentrer sur tableur, une par une. De ce fait, il a pu se glisser des erreurs de reproduction.

Toutes les éruptions solaires n'atteignent pas la terre. En effet, les conditions pour que celles-ci touchent notre planète dépendent de la position orbitale de la terre ainsi que de la face du soleil exposée à la terre lors d'une éruption¹. Dans notre analyse, toutes les éruptions solaires confondues sont prises en compte sans distinction. Par conséquent, il a pu y avoir, de façon abusive, des corrélations retrouvées avec certaines éruptions solaires et le nombre de crises alors que ces éruptions n'avaient pas forcément atteint la terre.

Durée d'étude

Les neuf années d'étude sont représentatives du cycle solaire numéro 24 car couvrent la période où l'activité solaire fut la plus forte (de 2011 à 2015) et la plus faible (de 2017 à 2018). L'étude n'a, cependant, pas débuté de façon concomitante au début de ce cycle (2008) car les données

de la population antérieures à mars 2010, n'étant pas informatisées, n'ont pu être utilisées. Ce qui a pu baisser la puissance de notre étude. Dans les anciennes études sur le sujet (*cf. chapitre V.*), la période d'étude couvrait au minimum la totalité du cycle solaire contemporain de l'année de réalisation de l'étude.

Méthode statistique

La modification de l'activité géomagnétique est la conséquence d'une éruption solaire ayant débuté 3 à 4 jours (selon *Comins*¹), à plusieurs jours (selon *Menze*⁶⁵) auparavant. En suivant ce modèle, aucun temps de latence n'a été pris en compte pour l'analyse de l'activité géomagnétique (indice Ap) contrairement à l'analyse du nombre de taches et d'éruptions solaires où le laps de temps entre la visualisation de ces deux paramètres et la répercussion sur la probable crise épileptique est donc de plusieurs jours. Cependant, la durée précise de ce laps de temps n'est pas claire dans les référentiels d'astrophysique et dépend de la vitesse de propagation des particules qui varient au cours de leur trajet.

De plus, l'heure précise de survenue de la crise épileptique pour chaque patient consultant dans notre échantillon n'étant pas connue, il a été estimé que le délai entre la survenue de la crise d'épilepsie et consultation aux urgences ne devait excéder 48 heures (l'heure de passage aux urgences est connue dans notre population mais il n'était techniquement pas possible de connaître l'heure précise de la crise). Dans ce sens, un temps de latence de 7 jours a été appliqué pour limiter ce biais de sélection. Ce temps de latence peut être considéré comme trop long au vu des données de la science et des fausses corrélations ont alors pu être retrouvées dans notre étude.

Cependant, lors d'essais statistiques lors de la mise en place de la méthode de l'étude, des mesures statistiques entre nombre d'éruptions et de taches solaires avec la population convulsante ont initialement été réalisées sans temps de latence. Sans temps de latence, Il avait été retrouvé une corrélation positive et statistiquement significative du même ordre de grandeur

qu'avec un temps de latence de 7 jours [Pour les données mensuelles des éruptions solaires : $r = 0.229$; $p = 0.017$; pour les taches solaires $r = 0.228$; $p = 0.013$]. Ce qui peut signifier qu'une erreur de quelques jours sur le choix du temps de latence n'a, finalement, que peu d'effet sur les résultats.

Le choix de données de la population mensuelle et non quotidienne permettait de limiter un éventuel biais de sélection. En effet, un patient consultant aux urgences un jour J aurait pu avoir convulsé le jour auparavant J-1.

Une autre limite était que le type d'étude rétrospectif et monocentrique.

3) Hypothèses physio-pathologiques

Pour rappel, l'activité solaire engendre une modification importante du champ magnétique terrestre par le biais de sa magnétosphère qui n'est pas totalement étanche aux particules solaires.

Il a été prouvé par des enregistrements électroencéphalographiques (EEG) chez des humains que la modification d'activité magnétique induit une modification de l'activité neuronale. En effet, *Belov et al.*¹⁰⁸, en 1998, ont réalisé une étude qui a montré que des enregistrements EEG semblent refléter la sensibilité du système nerveux humain au champ magnétique terrestre.

Pour cela, des enregistrements EEG chez 26 volontaires ont été pratiqués. Les paramètres de synchronisation des EEG ont été comparés à l'activité géomagnétique et solaire le jour de l'expérience. Une corrélation positive des données des EEG avec l'activité géomagnétique a été révélée, notamment dans les zones cérébrales frontales et centrales.

De plus, il a été montré que la génération d'un champ magnétique artificiel peut déclencher des crises d'épilepsies. En effet, deux études [*Sandyk et Amminos*¹⁰⁹, 1992 et *Michon et Persinger*¹¹⁰, 1997] ont montré, chez des rats soumis à un champ magnétique artificiel, une augmentation de la fréquence des crises d'épilepsies nocturnes.

Concernant les mécanismes biologiques liant la modification du champ magnétique et la survenue de crise d'épilepsie, différentes hypothèses sont avancées, sans certitude scientifique. L'hypothèse la plus décrite dans la littérature est celle concernant le rôle central de l'hormone mélatonine ainsi que celle du facteur de libération de la corticotrophine. D'un point de vue moléculaire, ce sont le Cryptochrome ainsi que la protéine codée par le gène CG8198 qui semblent être impliqués. D'autres suppositions proposent le rôle direct des ondes magnétiques sur le déclenchement de crises d'épilepsies. Ci-après sont détaillées ces différentes hypothèses.

A) Hypothèses biologiques

1) Mélatonine

La mélatonine est une hormone synthétisée à partir d'un neurotransmetteur, la sérotonine, dérivée elle-même d'un acide aminé, le tryptophane. Sa sécrétion depuis l'épiphyse (ou glande pinéale) est stimulée par l'activité du noyau suprachiasmatique de l'hypothalamus. Cette dernière est dépendante de la lumière. L'absence de lumière agit comme facteur stimulant. Ce noyau est connu pour intervenir dans la fonction d'horloge biologique chez les vertébrés. La libération de mélatonine se synchronise avec les cycles lumière/obscurité, diminuant le jour et augmentant la nuit. Cette régularité cyclique régule les cycles repos/activité et les cycles de température chez l'homme [*Raven*¹¹¹, 2008].

En 1980, *Semm et al.*¹¹², ont montré que l'activité électrique de certaines cellules de la glande pinéale pouvaient être modifiée par un champs magnétique artificiel. En 1983, *Welker et al.*¹¹³, ont montré que les taux de mélatonine dans la glande pinéale de rats sont sensibles aux modifications de l'activité magnétique. De plus, Il a été montré par de nombreux auteurs que l'augmentation soudaine de l'activité géomagnétique était associée à une baisse du taux de

mélatonine nocturne. [*Persinger*⁴⁵, 1988 ; *Michon et Persinger*¹¹⁰, 1997 ; *Weydahl et al.*¹¹⁴, 2001]. Dans deux études, *Burch et al.*^{95,115}, en 1999 et en 2008, ont montré que le métabolite urinaire 6-hydroxymélatonine sulphate (6-OHMS) de la mélatonine variait de manière négative à l'augmentation de l'activité magnétique. Or, *Lapin et al.*⁴⁶ en 1998 avaient justement montré que les métabolites urinaires de la mélatonine, dont le 6-OHMS, étaient anticonvulsants. De plus, le taux de mélatonine chez des patients épileptiques sont très élevés juste après une crise [*Bazil et al.*¹¹⁶, 2000] évoquant la possibilité que la mélatonine produite serait un mécanisme endogène anti-convulsant [*Chao et al.*¹¹⁷, 2001]. En conséquence, la mélatonine par le biais de ses métabolites urinaires est neuroprotectrice. La variation soudaine de l'activité géomagnétique précipiterait alors la survenue de crises d'épilepsies.

Dans le domaine cardio-vasculaire, le rôle de la mélatonine comme facteur médiateur de la variation de l'activité géomagnétique est aussi le mécanisme le plus avancé dans la littérature. En effet, sa variation de taux est impliquée dans la modification de nombreux paramètres cardio-vasculaire comme l'hypertension artérielle ou la variation de la fréquence cardiaque [*Holmes et Sugden*¹¹⁸, 1976 ; *Sewerynek*¹¹⁹, 2002 ; *Dominguez-Rodriguez et al.*¹²⁰, 2010].

Au niveau moléculaire, les mécanismes sensibles aux fluctuations de l'activité géomagnétique seraient le Cryptochrome et la protéine codée par le gène CG8198 [*Krylov*³⁵, 2017]. Les Cryptochromes font partie de la classe des flavoprotéines sensibles à la lumière bleue. Ils sont codés par les gènes Cry 1 et Cry 2 [*Raven*¹¹¹, 2008].

D'une part, ils sont bien connus comme étant un des mécanismes clef de l'orientation et la navigation des oiseaux par rapport au champ magnétique. Ce sont des magnéto-récepteurs [*Ritz et al.*¹²⁵, 2000 ; *Kishkinev et Chernetsov*¹²⁶, 2014]. D'autre part, ils sont impliqués dans les rythmes circadiens [*Van der Host et al.*¹²⁷, 1999] et agiraient comme des photo-récepteurs sensibles aux variations de lumière et aux alternances jour-nuit [*Miyamoto and Sanca*¹²⁸, 1998]. Or, il a été montré que la mélatonine est biochimiquement liée à ces Cryptochromes [*Yamanaka et al.*¹²⁹, 2010]. La protéine codée par le gène CG8198 serait l'intermédiaire permettant la

transduction entre l'information magnétique et les Cryptochromes [*Hore and Mouritsen*¹³⁰, 2016]. De plus, il a été montré que le maintien des rythmes circadiens impliquait cette protéine [*Mandilaras et Missirlis*¹³¹, 2012].

2) Sérotonine

Il a été montré que l'activité géomagnétique modifie la perméabilité membranaire cellulaire au calcium qui modifie le système sérotonergique [*Kay*²⁹, 1994]. Pour mémoire, la sérotonine est le précurseur de la mélatonine. C'est un des mécanismes proposés pour expliquer le lien entre dépression et modification de l'activité géomagnétique.

3) Facteur de Libération de la Corticotrophine (CRF ou CRH)

Le facteur de libération de la corticotrophine (CRF, pour corticotrophin-releasing-factor ou CRH pour corticotrophin-releasing-hormone) est un peptide de 41 résidus, sécrété par l'hypothalamus [*Raven*¹¹¹, 2008]. Cette dernière stimule la sécrétion de adéno-corticotrophine (ACTH) au niveau de l'hypophyse en réponse à une stimulation stressante [*Vale et al.*¹²¹, 1983].

Il a été montré que des faibles doses du CRF administrées par voie intra-cérébro-ventriculaire chez les rats ont provoqué des modifications de l'activité électro graphique suggérant une augmentation de l'excitation neuronale [*Ehlers*¹²², 1983]. Le CRF est donc un facteur pro-convulsant [*Valentino et al.*¹²³, 1983]. De plus, *Foley et al.*¹²⁴, en 2011 ont montré que la variation d'intensité géomagnétique altère la production du CRF.

B) Hypothèses physiques

*Venkatraman*⁴⁰ en 1976 avance l'hypothèse que pour être affecté par une crise d'épilepsie de par

une perturbation géomagnétique, cela nécessite au corps humain de répondre à un certain niveau de fréquence qui rentrerait en phase avec celle du géomagnétisme. Une conversion de l'énergie magnétique en énergie électrique (telle une dynamo) au niveau cérébral créerait une impulsion électrique, qui chez des personnes prédisposées aux crises, participerait à un environnement favorable à déclencher des crises.

*Ossenkopp and Cain*¹⁶³ ont montré, en 1988, que le champs magnétique artificiel intense abaisserait le seuil convulsif chez les rats.

*Michon and Persinger*¹⁴⁸ en 1997 avancent que l'activité géomagnétique excite ou inhibe les neurones, avec des impulsions répétitives de basse fréquence, produisant un effet inhibiteur pouvant théoriquement réduire l'excitabilité corticale associée à l'épilepsie.

C) Démonstration empirique

Une étude de *Keshavan et al.*⁴², en 1981, montre de manière empirique et indirecte le rôle de l'activité solaire sur le niveau de seuil convulsif. En effet, ils ont montré que chez 26 patients psychiatriques traités par sismothérapie (dans un service psychiatrique de l'hôpital indien de Bangalore) le 16 février 1980, journée où une éclipse solaire totale s'est déroulée, il existait une diminution de leur seuil convulsif par rapport à un jour témoin de nouvelle Lune, le 17 mars 1980 chez ses mêmes patients. Ceci fut expliqué par le blocage par la Lune de toute propagation vers la terre de vent solaire et ainsi de toute activité géomagnétique.

Aucune des hypothèses physio-pathologiques sus-citées n'expliquent spécifiquement nos résultats concernant la plus forte corrélation, à savoir sur les épilepsies partielles. De même qu'aucune donnée existe dans la littérature sur ce point précis.

4) Autres facteurs environnementaux favorisant les crises

Plusieurs études ont cherché un lien entre fréquence de survenue de crises et d'autres facteurs environnementaux tels que ceux concernant la météorologie atmosphérique (température moyenne quotidienne, saison, pression atmosphérique, humidité de l'air) et l'influence lunaire. Bien que des corrélations aient été retrouvées, aucune tendance générale unanime n'est retenue.

a) Température atmosphérique ambiante

Même si d'un point de vue biologique, de hautes températures corporelles sont des facteurs précipitants de survenue de crise en abaissant le seuil épiléptogène, il semblerait d'après plusieurs études, que de hautes températures atmosphériques protègeraient de la survenue de crises.

En 2017, *Kim et al*³⁹ ont analysé rétrospectivement 3 484 consultations pour crises d'épilepsies aux Urgences pédiatriques d'un hôpital Sud-Coréen entre 2005 et 2015 aux données de la météorologie terrestre. Considérant, un décalage maximal de 15 jours entre température atmosphérique mesurée et survenue de crise d'épilepsie, ils ont montré que seules les crises convulsives fébriles étaient significativement influencées par la variation des températures atmosphériques moyennes quotidiennes. En effet, une température moyenne quotidienne basse était associée à une augmentation de la fréquence de survenue des crises et inversement pour une température moyenne quotidienne haute.

L'explication physio-pathologique, avancée par les auteurs, est que, chez les enfants, la variation quotidienne de température affecterait les défenses immunitaires humorales et cellulaires qui sont encore peu développées comparé à celles d'adultes. Les enfants sont donc plus sujets aux variations de températures. Leur thermorégulation ne pourrait donc pas supporter le changement

de pression induit par la variation de température [*Xu et al.*¹³², 2012 ; *Xu et al.*¹³³, 2013].

*Rakers et al.*³⁸ en 2017, dans une étude allemande incluant 604 patients admis pour crise d'épilepsie, ont montré que des températures ambiantes élevées > 20°C semblaient être facteur protecteur de survenue de crises d'épilepsies alors que des températures moyennes basses n'influaient pas sur le risque de crise.

Leurs résultats semblent en désaccord avec leur mécanisme sous-jacent proposé par les auteurs. En effet, ils avaient anticipé, compte tenu de la fréquence élevée des crises fébriles chez les enfants qui sont déclenchées par une alcalose respiratoire induite par l'hyperthermie et l'augmentation successive de l'activité neuronale, que si la température était associée à un risque de crise d'épilepsie, un temps particulièrement chaud serait un facteur de risque majeur. De plus, une température corporelle plus élevée augmente également l'activité neuronale hippocampique impliquée dans l'épilepsie du lobe temporal temporal²⁰⁴.

Les mêmes résultats ont été retrouvés dans une étude suisse¹⁴¹ réalisée, sur 184 patients admis dans un service d'Urgences, sur une période de 4 ans, où une température élevée semble être facteur protecteur de crises.

Les explications proposées par les auteurs seraient en lien avec une humidité de l'air élevée. Elle pourrait diminuer l'apport hydrique des patients et ainsi prévenir l'hypo-osmolarité et les hyponatrémies, facteurs connus comme favorisant les crises¹⁴¹.

b) Pression atmosphérique

*Doherty et al.*¹³⁵, en 2007, ont montré, dans une étude finlandaise, que chez les patients aux antécédents d'épilepsie, une augmentation de la fréquence des crises d'épilepsies est associée à un changement de pression atmosphérique notamment lors de variation journalière supérieure à 5,5 mBar. Les auteurs proposent comme mécanisme le fait que la pression atmosphérique

influe sur la pression partielle en oxygène du corps humain. Or, une baisse de ce taux de pression partiel (hyperventilation, haute altitude) est associée à une augmentation de risque de survenue de crises [*Salvati et Beenhakker*¹³⁴, 2017].

Dans l'étude de *Rakers et al.*³⁸, de 2017, leurs résultats ont montré que la pression atmosphérique était négativement corrélée à la fréquence de survenue de crises et inversement pour de hautes pressions. Les auteurs citent, comme explication du mécanisme, une expérience chez les rats, qui a montré qu'une baisse de la pression atmosphérique dans une chambre pressurisée augmentaient l'activité neuronales chez ces animaux¹⁶⁴.

Cependant, d'autres études ne montrent aucun lien. Les études de *Asensi et al.*¹³⁶, 1977 et *Ruegg et al.*¹⁴¹, 2008 n'ont montré aucune corrélation entre la fréquence des crises et la variation des pressions atmosphériques quotidiennes et de l'humidité de l'air ambiante.

c) Humidité de l'air

Dans l'étude de *Rakers et al.*³⁸, ils ont montré qu'une augmentation de 18.4% du taux quotidien moyen d'humidité de l'air ambiante était associée à un risque accru de crise d'épilepsie avec un décalage de trois jours. Cependant, une valeur relativement basse de l'humidité de l'air n'était pas liée à une augmentation du risque de crise.

Les auteurs proposent comme mécanisme que les infections à courte période d'incubation, par exemple les infections respiratoires, déclenchées par l'humidité de l'air pourraient contribuer à l'accroissement du risque de crises³⁸.

Cette étude est en désaccord avec celle réalisée par *Ruegg et al.*¹⁴¹ en 2007 où un taux relativement élevé d'humidité est facteur protecteur de crises car l'humidité pourrait diminuer

l'apport hydrique des patients et ainsi prévenir l'hypo-osmolarité et les hyponatrémies, facteurs connus comme favorisant les crises¹⁴¹.

d) Météorologie terrestre

Toujours selon l'étude de *Ruegg et al.*¹⁴¹, les journées où le ciel est non nuageux et avec la plus longue durée d'ensoleillement sont associées avec une augmentation de fréquence de survenue de crise. Il n'est pas proposé de mécanisme par les auteurs sur ce point.

Cependant dans une étude de *Baxendale*¹³⁷, de 2009, menée sur un an et portant sur 1 715 consultations pour crise d'épilepsie, il a été retrouvé que la forte exposition à la lumière solaire était un facteur protecteur de survenue de crise d'épilepsie partielle.

Leur mécanisme proposé est en lien avec la mélatonine. En effet, la lumière du soleil intervient dans les processus de fabrication et régulation de la mélatonine. Tandis que la lumière du soleil supprime l'expression diurne de la mélatonine, elle stimule son expression nocturne. Les auteurs¹³⁷ expliquent que leurs résultats sont probablement liés à la protection offerte par l'expression nocturne adéquate de la mélatonine après l'exposition à la lumière du soleil, ceci car il a été montré que la mélatonine est une molécule anti-convulsivante endogène^{46,116}.

Il est alors proposé par les auteurs la luminothérapie comme nouvelle alternative thérapeutique pour les formes résistantes d'épilepsies aux traitements médicamenteux et chirurgicaux. De plus, les auteurs proposent la médiation de l'humeur, en lien avec l'exposition à la lumière, comme facteur intermédiaire. En effet, des études ont montré des liens réciproques entre crise d'épilepsie et dépression [*Mazza et al.*, 2007]¹⁶⁵ et que cette dernière pourrait être facteur de risque de survenue de crises [*Hesdorffer et al.*, 2006]¹⁶⁶. Cependant aucune explication spécifique n'est apportée quant à la corrélation significative ne touchant que le type d'épilepsie partielle.

Par ailleurs, il ne semble pas y avoir d'association entre jours pluvieux et risque de crise

d'épilepsie [*Ruegg et al.*¹⁴¹,2007 ; *Baxendale*¹³⁷, 2009].

e) Saisonnalité

L'hiver est associé à une augmentation de l'incidence de convulsions fébriles chez les enfants car cette période se situe en épidémie de bronchiolite [*Manfredini et al.*¹³⁸, 2004], à une augmentation des morts subites liées à l'épilepsie car cette saison est associée à plus grand risque d'anomalies cardiaques [*Scorza et al.*¹³⁹, 2007] ainsi qu'à l'augmentation de l'apparition de spasme infantile ceci en lien, d'une part, avec les niveaux sériques élevés de mélatonine à cette période que les auteurs¹⁴⁰ citent, pour leurs part, comme substance pro-convulsante et d'autre part, en lien avec la variation saisonnière des taux d'ACTH [*Cortez et al.*¹⁴⁰, 1997].

f) Influence lunaire

Il s'agit sans doute du plus ancien facteur environnemental discuté associé à l'épilepsie. Depuis l'ancien temps, les croyances populaires font état que les phases lunaires seraient un facteur déclenchant, d'aggravation de maints pathologies psychiatriques, cardiaques ainsi qu'elles auraient une influence sur le taux de natalité [*Vance*¹⁴¹, 1995 ; *Raison et al.*¹⁴², 1999].

Visant à démystifier la légende que les phases lunaires influeraient sur les crises épileptiques, plusieurs études ont été réalisées à ce sujet.

Une étude de *Polychronopoulos et al.*¹⁴³, en 2006, a retrouvé une effet pro-convulsant de la pleine Lune chez 859 patients consultants pour motif de crise d'épilepsie aux urgences.

Les auteurs¹⁴³ émettent plusieurs hypothèses. La première est celle que la privation de sommeil, induite par une plus haute luminosité nocturne en cas de pleine Lune, abaisse le seuil convulsif. Les autres hypothèses avancées demeurent plus floues et seraient en lien avec l'influence gravitationnelle qu'exerce la Lune sur la Terre. En effet, la Lune, qui exerce un effet sur les

masses d'eau terrestre (Théorie des marées), exercerait un effet sur les masses d'eau du corps humain et par un mécanisme encore non élucidé pourrait avoir un impact sur la survenue de crise d'épilepsie. La troisième serait en lien avec la perturbation du champ électromagnétique terrestre causée par les changements gravitationnels lunaires pendant la période de la pleine Lune qui entraînerait des effets sur le comportement humain.

Dans l'étude de *Ruegg et al.*¹⁴¹, de 2008, une augmentation de la fréquence de crises épileptiques trois jours après la pleine Lune est retrouvée. Les mécanismes proposés sont d'une part en lien avec une luminosité accrue lors de la pleine Lune provoquant un sommeil non réparateur car discontinu avec plus de temps de ce dernier en phase superficielle. En résulte une fatigue diurne augmentée, abaissant ainsi le seuil épileptogène. D'autre part, le rôle de la mélatonine est avancé. Lors de phase de pleine Lune, son taux est abaissé. De ce fait son rôle anti-convulsant se retrouve diminué. Cependant, aucune explication n'est apportée concernant le délai de trois jours retrouvé dans leurs résultats.

En 2010, *Hadzic et al.*¹⁴⁴, a montré sur une étude portant chez les enfants que la fréquence des crises d'épilepsies était significativement plus importante aux troisièmes et quatrièmes phases lunaires.

En 2015, un travail de thèse français a montré qu'au travers d'une étude rétrospective portant sur une cohorte de 39 patients épileptiques vivant dans une Maison d'Accueil Spécialisée, une recrudescence statistiquement significative des crises lors des phases de pleine Lune [*Éloïse Lalanne-Azidrou*¹⁴⁵, 2015]. Les hypothèses discutées sont en rapport avec la mélatonine, les modifications des phases du sommeil ainsi que l'effet gravitationnel qu'exerce la Lune sur la Terre.

E) IMPLICATION

L'évolution de l'activité solaire peut être prévisible à l'avance par le biais de modélisation. On parle alors de météorologie spatiale. Cette dernière est fréquemment utilisée pour limiter l'impact économique que peut avoir une forte activité solaire sur les réseaux de communications, électriques ou sur le fonctionnement de satellites par exemples. De plus, disposant de quelques jours entre l'objectivation d'une éruption solaire et des conséquences sur la Terre. Il pourrait paraître judicieux, pour éviter les risques traumatiques liées aux crises d'épilepsies pouvant être graves [Tan et D'souza¹⁴⁶, 2013], d'élaborer un plan de prévention qui reste à définir. La mélatonine pourrait en être une piste. Son taux semblant s'abaisser lors de forte activité magnétique [Persinger⁴⁵, 1988 ; Michon et Persinger¹¹⁰, 1996 ; Weydahl et al.¹¹⁴, 2001], une supplémentation préventive par cette hormone pourrait s'envisager en cas de forte activité solaire. Dans ce sens, une étude de 2010, de Elkhayat et al.¹⁴⁷, montrait que dans une population pédiatrique composée d'épileptiques pharmaco-résistants, une prise adjuvante de mélatonine était associée à une amélioration de la sévérité de leurs épilepsies. Le mécanisme intermédiaire passerait par la récupération des phases normales du sommeil [Fauteck et al.¹⁴⁸, 1999].

CONCLUSION

La présente étude actualise les données du potentiel facteur environnemental, qu'est l'activité solaire, sur la survenue de crise d'épilepsie. La corrélation n'étant pas synonyme de causalité, l'activité solaire ne pourrait en aucun cas expliquer à elle seule la survenue de crises, c'est un potentiel facteur environnemental favorisant celles-ci parmi d'autres.

En conséquence, des études pluri-centriques, de plus grande ampleur et utilisant des paramètres de l'activité solaire plus nombreux sont à entreprendre pour étayer les résultats retrouvés. Même si la mélatonine semble être le facteur physio-pathologique clef, des études doivent affiner le mécanisme moléculaire causal. Ces informations pourront alors déboucher sur une nouvelle stratégie de prévention des crises épileptiques.

L'année 2020 marquera le début du cycle solaire numéro 25 qui sera, sans doute, plus intense que le cycle précédant. Cette période s'avère propice pour la réalisation de telles études.

Comme aperçu dans ce travail, l'activité solaire aurait des conséquences multiples dans différents domaines de la science. Une étude¹⁴⁹ a même montré que cette activité pourrait influencer de manière négative sur le bonheur. Or, selon un auteur¹⁵⁰, ce dernier serait en parti lié à l'amour. Dans ce contexte, bien que peu connue du grand public, pouvant paraître ésotérique et ne conditionnant pas le style vestimentaire du lendemain, la compréhension de la météorologie spatiale s'avère primordiale.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Comins. A la découverte de l'univers. Introduction à l'astronomie et à l'astrophysique. De Boeck; 2016. (2e édition).
2. Foukal, P.V. Astrophysics, 2nd edition. John Wiley & Sons; 2008.
3. Wyper PF, Antiochos SK, DeVore CR. A universal model for solar eruptions. Nature. 26 2017;544(7651):452-5.
4. Éruption solaire — Wikipédia [Internet]. [cité 5 mars 2019]. Disponible sur: https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89ruption_solaire
5. Geomagnetic storm. In: Wikipedia [Internet]. 2019 [cité 7 nov 2019]. Disponible sur: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Geomagnetic_storm&oldid=921072846
6. Geomagnetic Storms | NOAA / NWS Space Weather Prediction Center [Internet]. [cité 27 mai 2019]. Disponible sur: <https://www.swpc.noaa.gov/phenomena/geomagnetic-storms>
7. Progression du cycle du Soleil | Activité solaire [Internet]. SpaceWeatherLive.com. [cité 7 mars 2019]. Disponible sur : <https://spaceweatherlive.com/fr/>
8. Solar cycle. In: Wikipedia [Internet]. 2019 [cité 8 mars 2019]. Disponible sur: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Solar_cycle&oldid=885262192
9. Solar Cycle Progression | NOAA / NWS Space Weather Prediction Center [Internet]. [cité 17 mars 2019]. Disponible sur: <https://www.swpc.noaa.gov/products/solar-cycle-progression>
10. Solar flare. Wikipedia [Internet]. 2019 [cité 8 mars 2019]. Disponible sur: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Solar_flare&oldid=883319584
11. Sunspots and Solar Flares | NASA Space Place – NASA [Internet]. [cité 7 mars 2019]. Disponible sur: <https://spaceplace.nasa.gov/solar-activity/en/>
12. Palmer SJ, Rycroft MJ, Cermack M. Solar and geomagnetic activity, extremely low frequency magnetic and electric fields and human health at the Earth's surface. Surv Geophys. 1 sept 2006;27(5):557-95
13. Persinger MA. Wars and Increased Solar-Geomagnetic Activity: Aggression or Change in Intraspecies Dominance? Percept Mot Skills. 1 juin 1999;88(3_suppl):1351-5
14. Larkin TS, Keeton WT. Bar magnets mask the effect of normal magnetic disturbances on pigeon orientation. J Comp Physiol. 1 janv 1976;110(3):227-31.
15. Ertel S. Cosmophysical correlation of creative activity in the history of culture. Biofizika. 1998;43(4):736-41.
16. Grigoryev P, Rozanov V, Vaiserman A, Vladimirov B. Heliogeophysical factors as possible triggers of suicide terroristic acts. Health. 2009;01(04):294-7.
17. Keeton WT, Larkin TS, Windsor DM. Normal fluctuations in the earth's magnetic field influence pigeon orientation. J Comp Physiol. 1 juin 1974;95(2):95-103.
18. Kowalski U, Wiltschko R, Füller E. Normal fluctuations of the geomagnetic field may affect initial orientation in pigeons. J Comp Physiol. 1 sept 1988;163(5):593-600.
19. Tchijevsky, A. L. Physical Factors of the Historical Process. Cycles. 1971;22:11-27.

20. Krivelyova A, Robotti C. Playing the field: Geomagnetic storms and international stock markets [Internet]. Working Paper; 2003 [cité 31 mai 2019]. Report No.: 2003-5a. Disponible sur: <https://www.econstor.eu/handle/10419/100979>
21. Mikulecký M. Solar activity, revolutions and cultural prime in the history of mankind. *Neuro Endocrinol Lett.* déc 2007;28(6):749-56.
22. Avdonina EN, Samovichev EG. [Some heliogeophysical characteristics of a series of especially dangerous crimes]. *Biofizika.* 1995;40(5):1060-3.
23. Ertel, S. Space weather and revolutions: Chizhevsky's heliobiological claim scrutinized. *Studia Psychologica.* 1996;39:3–22.
24. Halberg, Franz. Time Structures (Chronomes) of the Blood Circulation, Populations' Health, Human Affairs and Space Weather. *World Heart Journal.* 2011;3(1):73-114.
25. Palmer SJ, Rycroft MJ, Cermack M. Solar and geomagnetic activity, extremely low frequency magnetic and electric fields and human health at the Earth's surface. *Surv Geophys.* 1 sept 2006;27(5):557-95.
26. Papathanasopoulos P, Preka-Papadema P, Gkotsinas A, Dimisianos N, Hillaris A, Katsavrias C, et al. The possible effects of the solar and geomagnetic activity on multiple sclerosis. *Clin Neurol Neurosurg.* juill 2016;146:82-9.
27. Rosenbaum BP, Weil RJ. Aneurysmal subarachnoid hemorrhage: relationship to solar activity in the United States, 1988-2010. *Astrobiology.* juill 2014;14(7):568-76.
28. Kuritzky A, Zoldan Y, Hering R, Stoupel E. Geomagnetic Activity and the Severity of the Migraine Attack. *Headache: The Journal of Head and Face Pain.* 1987;27(2):87-9.
29. Kay RW. Geomagnetic storms: association with incidence of depression as measured by hospital admission. *Br J Psychiatry.* mars 1994;164(3):403-9.
30. Gordon C, Berk M. The effect of geomagnetic storms on suicide. *African Journal of Psychiatry* [Internet]. 1 janv 2003 [cité 29 mai 2019];6(3). Disponible sur: <https://www.ajol.info/index.php/ajpsy/article/view/96384>
31. Ghione S, Mezzasalma L, Del Seppia C, Papi F. Do geomagnetic disturbances of solar origin affect arterial blood pressure? *J Hum Hypertens.* nov 1998;12(11):749-54.
32. Vencloviene J, Babarskiene R, Slapikas R, Sakalyte G. The association between phenomena on the sun, geomagnetic activity, meteorological variables, and cardiovascular characteristic of patients with myocardial infarction. *Int J Biometeorol.* sept 2013;57(5):797-804.
33. Stoupel E. Cardiac arrhythmia and geomagnetic activity. *Indian Pacing Electrophysiol J.* 1 janv 2006;6(1):49-53.
34. Becker RO. The Effect of Magnetic Fields upon the Central Nervous System. In: Barnothy MF, éditeur. *Biological Effects of Magnetic Fields: Volume 2* [Internet]. Boston, MA: Springer US; 1969 [cité 26 juin 2019]. p. 207-14.
35. Krylov VV. Biological effects related to geomagnetic activity and possible mechanisms. *Bioelectromagnetics.* oct 2017;38(7):497-510.
36. Fisher RS, van Emde Boas W, Blume W, Elger C, Genton P, Lee P, et al. Epileptic seizures and epilepsy: definitions proposed by the International League Against Epilepsy (ILAE) and the International Bureau for Epilepsy (IBE). *Epilepsia.* avr 2005;46(4):470-2.
37. Aird RB. The Importance of Seizure-Inducing Factors in the Control of Refractory Forms of Epilepsy. *Epilepsia.* 1983;24(5):567-83.

38. Rakers F, Walther M, Schiffner R, Rupprecht S, Rasche M, Kockler M, et al. Weather as a risk factor for epileptic seizures: A case-crossover study. *Epilepsia*. 2017;58(7):1287-95.
39. Kim SH, Kim JS, Jin MH, Lee JH. The effects of weather on pediatric seizure: A single-center retrospective study (2005-2015). *Sci Total Environ*. 31 déc 2017;609:535-40.
40. Venkataraman K. Epilepsy and solar activity--an hypothesis. *Neurol India*. sept 1976;24(3):148-52.
41. Rajaram M, Mitra S. Correlation between convulsive seizure and geomagnetic activity. *Neurosci Lett*. 2 juill 1981;24(2):187-91.
42. Keshavan MS, Gangadhar BN, Gautam RU, Ajit VB, Kapur RL. Convulsive threshold in humans and rats and magnetic field changes: observations during total solar eclipse. *Neurosci Lett*. 10 mars 1981;22(2):205-8.
43. Stoupel E, Martfel J, Rotenberg Z. Admissions of patients with epileptic seizures (E) and dizziness (D) related to geomagnetic and solar activity levels: differences in female and male patients. *Med Hypotheses*. déc 1991;36(4):384-8.
44. Spottiswoode SJP, Park M, Taubøll E, Duchowny M, Neppe V. Possible Effect of Geomagnetic Fluctuations on the Timing of Epileptic Seizures. 1993;13.
45. Persinger MA. Increased geomagnetic activity and the occurrence of bereavement hallucinations: Evidence for melatonin-mediated microseizuring in the temporal lobe? *Neuroscience Letters*. 7 juin 1988;88(3):271-4.
46. Lapin IP, Mirzaev SM, Ryzov IV, Oxenkrug GF. Anticonvulsant activity of melatonin against seizures induced by quinolinate, kainate, glutamate, NMDA, and pentylentetrazole in mice. *J Pineal Res*. mai 1998;24(4):215-8.
47. Space Weather NASA [Internet]. NASA. [cité 13 nov 2019]. Disponible sur: <https://www.nasa.gov/subject/3165/space-weather/>
48. Sunspots and Solar Flares | NASA Space Place – NASA Science for Kids [Internet]. [cité 7 mars 2019] . Disponible sur: <https://spaceplace.nasa.gov/solar-activity/en/>
49. Stephenson Francis Richard, Clark David H. Applications of Early Astronomical Records. 1979;23-4.
50. Nesme-Ribes É, Thuillier G. Histoire Solaire et Climatique. Belin; 2000.
51. Scheiner C. Rosa Vrsina, sive, Sol ex admirando facvlarvm & macularum suarum phoenomeno varivs, necnon circa centrum suum & axem fixum ab occasu in ortum annua, circaq[ue]. alium axem mobilem ab ortu in occasum conuersione quasi menstrua, super polos proprios, libris quatuor mobilis ostensus [Internet]. Bracciani: Apud Andream Phaeum typographum Ducalem; 1630 [cité 1 avr 2019]. 36 p. Disponible sur: <https://bibdig.museogalileo.it/Teca/Viewer?an=000000367767>
52. Scheiner C. Tres epistolae de maculis Solaribus scriptae ad Marcum Velsorum...: cum observationum iconismis. 1612.
53. Christoph Scheiner. Disponible sur: www.fr.wikipedia.org/wiki/Christoph_Scheiner
54. Carrington RC. Description of a Singular Appearance seen in the Sun on September 1, 1859. *Mon Not R Astron Soc*. 11 nov 1859;20(1):13-5.
55. Menzel, Whipple. Survey of the Universe [Internet]. 1970 [cité 3 oct 2019]. Disponible sur: https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:4041620
56. Solar flare. In: Wikipedia [Internet]. 2019 [cité 8 mars 2019]. Disponible sur: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Solar_flare&oldid=883319584

57. Solar Flares (Radio Blackouts) | NOAA / NWS Space Weather Prediction Center [Internet]. [cité 27 mai 2019]. Disponible sur: <https://www.swpc.noaa.gov/phenomena/solar-flares-radio-blackouts>
58. Progression du cycle du Soleil | Activité solaire [Internet]. SpaceWeatherLive.com. [cité 7 mars 2019]. Disponible sur: <https://spaceweatherlive.com/fr/activite-solaire/cycle-solaire>
59. Chapman. A New Theory of Magnetic Storms. *Nature*. 1930;126:123-30.
60. Le champ magnétique de la Terre | INSTITUT DE PHYSIQUE DU GLOBE DE PARIS . [cité 29 mars 2019]. Disponible sur: <http://www.ipgp.fr/fr/obsmag/champ-magnetique-de-terre>
61. Mayaud P.N. Derivation, Meaning, and Use of Geomagnetic indices. American Geophysical Union. 1980.
62. Kp Index [Internet]. [cité 27 mars 2019]. Disponible sur: <https://www.gfz-potsdam.de/en/kp/index/>
63. Geomagnetic Storms | NOAA / NWS Space Weather Prediction Center [Internet]. [cité 27 mai 2019]. Disponible sur: <https://www.swpc.noaa.gov/phenomena/geomagnetic-storms>
64. Jacobs JA, Kato Y, Matsushita S, Troitskaya VA. Classification of Geomagnetic Micropulsations. *Geophys J Int*. 1 févr 1964;8(3):341-2.
65. Chapman. A New Theory of Magnetic Storms. *Nature*. 1930;126:123-30.
66. Muller C. The Carrington solar flares of 1859: consequences on life. *Orig Life Evol Biosph*. sept 2014;44(3):185-95.
67. Astronomy. How a 1967 Solar Storm Nearly Led to Nuclear War [Internet]. Space.com. [cité 8 mars 2019]. Disponible sur: <https://www.space.com/33687-solar-storm-cold-war-false-alarm.html>
68. Comprendre l'électricité | Panne de mars 1989 | Hydro-Québec [Internet]. [cité 7 mars 2019]. Disponible sur: <http://www.hydroquebec.com/comprendre/notions-de-base/tempete-mars-1989.html>
69. Papathanasopoulos P, Preka-Papadema P, Gkotsinas A, Dimisianos N, Hillaris A, Katsavrias C, et al. The possible effects of the solar and geomagnetic activity on multiple sclerosis. *Clin Neurol Neurosurg*. juill 2016;146:82-9.
70. Krone B, Grange JM. Is a hypothetical melanoma-like neuromelanin the underlying factor essential for the aetiopathogenesis and clinical manifestations of multiple sclerosis? *BMC Neurol*. 18 juill 2013;13:91.
71. Feigin VL, Parmar PG, Barker-Collo S, Bennett DA, Anderson CS, Thrift AG, et al. Geomagnetic storms can trigger stroke: evidence from 6 large population-based studies in Europe and Australasia. *Stroke*. juin 2014;45(6):1639-45.
72. Stoupel, E. et al. Twenty years study of solar, geomagnetic, cosmic ray activity links with monthly deaths number. *J Biomedical Science and Engineering*. 2011;4(426).
73. De Matteis G, Vellante M, Marrelli A, Villante U, Santalucia P, Tuzi P, et al. Geomagnetic activity, humidity, temperature and headache: is there any correlation? *Headache*. janv 1994;34(1):41-3.
74. Stienen MN, Smoll NR, Battaglia M, Schatlo B, Woernle CM, Fung C, et al. Intracranial aneurysm rupture is predicted by measures of solar activity. *World Neurosurg*. 2015;83(4):588-95.
75. Dimitrova S, Stoilova I, Cholakov I. Influence of local geomagnetic storms on arterial blood pressure. *Bioelectromagnetics*. sept 2004;25(6):408-14.
76. Gavryuseva E, Kroussanova N. Human state in connection with helio and geospheric perturbations. *Proceedings of the Second Solar Cycle and Space Weather Euroconference*, 24 -

29 September 2001. 2002;

77. Azcárate T, Mendoza B. Influence of geomagnetic activity and atmospheric pressure in hypertensive adults. *Int J Biometeorol.* sept 2017;61(9):1585-92.
78. Alabdulgader A, McCraty R, Atkinson M, Dobyns Y, Vainoras A, Ragulskis M, et al. Long-Term Study of Heart Rate Variability Responses to Changes in the Solar and Geomagnetic Environment. *Sci Rep.* 8 févr 2018;8(1):2663.
79. Feinleib M, Rogot E, Sturrock PA. Solar activity and mortality in the United States. *Int J Epidemiol.* sept 1975;4(3):227-9.
80. Knox EG, Armstrong E, Lancashire R, Wall M, Haynes R. Heart attacks and geomagnetic activity. *Nature.* 18 oct 1979;281(5732):564-5.
81. Malin SR, Srivastava BJ. Correlation between heart attacks and magnetic activity. *Nature.* 22 févr 1979;277(5698):646-8.
82. Messner T, Häggström I, Sandahl I, Lundberg V. No covariation between the geomagnetic activity and the incidence of acute myocardial infarction in the polar area of northern Sweden. *Int J Biometeorol.* mai 2002;46(2):90-4.
83. Berk M, Dodd S, Henry M. Do ambient electromagnetic fields affect behaviour? A demonstration of the relationship between geomagnetic storm activity and suicide. *Bioelectromagnetics.* 2006;27(2):151-5
84. Tada H, Nishimura T, Nakatani E, Matsuda K, Teramukai S, Fukushima M. Association of geomagnetic disturbances and suicides in Japan, 1999-2010. *Environ Health Prev Med.* janv 2014;19(1):64-71.
85. Qu J. Is sunspot activity a factor in influenza pandemics? *Rev Med Virol.* 2016;26(5):309-13.
86. Lucock M, Glanville T, Yates Z, Walker J, Furst J, Simpson N. Solar cycle predicts folate-sensitive neonatal genotypes at discrete phases of the first trimester of pregnancy: a novel folate-related human embryo loss hypothesis. *Med Hypotheses.* août 2012;79(2):210-5.
87. Gilbert M, Slingenbergh J, Xiao X. Climate change and avian influenza. *Revue Scientifique et Technique* 2008; 27(2): 459–466.
88. Melnikov VN. Reduced solar activity favors twin maternities. *Twin Res Hum Genet.* févr 2012;15(1):133-7.
89. O'Connor RP, Persinger MA. Geophysical variables and behavior: LXXXII. A strong association between sudden infant death syndrome and increments of global geomagnetic activity--possible support for the melatonin hypothesis. *Percept Mot Skills.* avr 1997;84(2):395-402.
90. Skjærvø GR, Fossøy F, Røskaft E. Solar activity at birth predicted infant survival and women's fertility in historical Norway. *Proc Biol Sci [Internet].* 22 févr 2015 [cité 10 mars 2019];282(1801). Disponible sur: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4308994/>
91. Stoupel E, Abramson E, Israelevich P, Sulkes J, Harell D. Dynamics of serum C-reactive protein (CRP) level and cosmophysical activity. *European Journal of Internal Medicine.* 1 mars 2007;18(2):124-8.
92. Stoupel, E. et al. Human blood coagulation and geomagnetic activity. 1996;7:217-20.
93. Persinger MA, Psych C. Sudden unexpected death in epileptics following sudden, intense, increases in geomagnetic activity: prevalence of effect and potential mechanisms. *Int J Biometeorol.* mai 1995;38(4):180-7.

94. Bergiannaki J-D, Paparrigopoulos TJ, Stefanis CN. Seasonal pattern of melatonin excretion in humans: relationship to daylength variation rate and geomagnetic field fluctuations. *Experientia*. 1 mars 1996;52(3):253-8.
95. Burch JB, Reif JS, Yost MG. Geomagnetic activity and human melatonin metabolite excretion. *Neurosci Lett*. 13 juin 2008;438(1):76-9.
96. Keeton WT, Larkin TS, Windsor DM. Normal fluctuations in the earth's magnetic field influence pigeon orientation. *J Comp Physiol*. 1 juin 1974;95(2):95-103.
97. German Research Centre for Geosciences [Internet]. [cité 13 nov 2019]. Disponible sur: <https://www.gfz-potsdam.de/en/home/>
98. Solar and Heliospheric Observatory Homepage [Internet]. [cité 13 nov 2019]. Disponible sur: <https://sohowww.nascom.nasa.gov/>
99. SDO | Solar Dynamics Observatory [Internet]. [cité 13 nov 2019]. Disponible sur: <https://sdo.gsfc.nasa.gov/>
100. Randall W. The solar wind and human birth rate: a possible relationship due to magnetic disturbances. *Int J Biometeorol*. mai 1990;34(1):42-8.
101. Milton JG, Gotman J, Remillard GM, Andermann F. Timing of Seizure Recurrence in Adult Epileptic Patients: A Statistical Analysis. *Epilepsia*. 1987;28(5):471-8.
102. Taubøll E, Lundervold A, Gjerstad L. Temporal distribution of seizures in epilepsy. *Epilepsy Research*. 1 mars 1991;8(2):153-65.
103. Ruegg S, Hunziker P, Marsch S, et al. Association of environmental factors with the onset of status epilepticus. *Epilepsy Behav*. 2008;12:66-73.
104. Quigg M, Straume M, Menaker M, Bertam EH. Temporal distribution of partial seizures: Comparison of an animal model with human partial epilepsy. *Annals of Neurology*. 1998;43(6):748-55.
105. Gurkas E, Serdaroglu A, Hirfanoglu T, Kartal A, Yilmaz U, Bilir E. Sleep-wake distribution and circadian patterns of epileptic seizures in children. *European Journal of Paediatric Neurology*. 1 juill 2016;20(4):549-54.
106. Hofstra WA, Grootemarsink BE, Dieker R, Palen JVD, Weerd AWD. Temporal distribution of clinical seizures over the 24-h day: A retrospective observational study in a tertiary epilepsy clinic. *Epilepsia*. 2009;50(9):2019-26.
107. Amzica F. Physiology of sleep and wakefulness as it relates to the physiology of epilepsy. *J Clin Neurophysio*. 2002;19:488-503.
108. Belov DR, Kanunikov IE, Kiselev BV. [Dependence of human EEG spatial synchronization on the geomagnetic activity on the day of experiment]. *Russ Fiziol Zh Im I M Sechenova*. août 1998;84(8):761-74.
109. Sandyk R, Anninos PA. Magnetic fields alter the circadian periodicity of seizures. *Int J Neurosci*. avr 1992;63(3-4):265-74.
110. Michon AL, Persinger MA. Experimental simulation of the effects of increased geomagnetic activity upon nocturnal seizures in epileptic rats. *Neurosci Lett*. 7 mars 1997;224(1):53-6.
111. Raven, Johnson, Losos, Singer. *Biologie*. De boeck. 2008.
112. Semm P, Schneider T, Vollrath L. Effects of an Earth-strength magnetic field on electrical activity of pineal cells. *Nature*. déc 1 980;288(5791):607.

113. Welker HA, Semm P, Willig RP, Commentz JC, Wiltshko W, Vollrath L. Effects of an artificial magnetic field on serotonin N-acetyltransferase activity and melatonin content of the rat pineal gland. *Exp Brain Res.* 1 mai 1983;50(2):426-32.
114. Weydahl A, Sothorn RB, Cornélissen G, Wetterberg L. Geomagnetic activity influences the melatonin secretion at latitude 70 degrees N. *Biomed Pharmacother.* 2001;55 Suppl 1:57s-62s.
115. Burch JB, Reif JS, Yost MG. Geomagnetic disturbances are associated with reduced nocturnal excretion of a melatonin metabolite in humans. *Neurosci Lett.* 14 mai 1999;266(3):209-12.
116. Bazil and al. Patients with intractable epilepsy have low melatonin, which increases following seizures. *Neurology.* 2000;55:1746-8.
117. Chao D-M, Chen G, Cheng J-S. Melatonin Might be One Possible Medium of Electroacupuncture Anti-Seizures [Internet]. 2001 [cité 10 juill 2019]. Disponible sur: <https://www.ingentaconnect.com/content/cog/aetr/2001/00000026/F0020001/art00004>
118. Holmes SW, Sugden D. Proceedings: The effect of melatonin on pinealectomy-induced hypertension in the rat. *Br J Pharmacol.* mars 1976;56(3):360P-361P
119. Sewerynek E. Melatonin and the cardiovascular system. *Neuro Endocrinol Lett.* avr 2002;23 Suppl 1:79-83.
120. Dominguez-Rodriguez A, Abreu-Gonzalez P, Sanchez-Sanchez JJ, Kaski JC, Reiter RJ. Melatonin and circadian biology in human cardiovascular disease. *J Pineal Res.* août 2010;49(1):14-22.
121. Vale W, Rivier C, Brown MR, Spiess J, Koob G, Swanson L, et al. Chemical and biological characterization of corticotropin releasing factor. *Recent Prog Horm Res.* 1983;39:245-70.
122. Ehlers CL, Henriksen SJ, Wang M, Rivier J, Vale W, Bloom FE. Corticotropin releasing factor produces increases in brain excitability and convulsive seizures in rats. *Brain Res.* 14 nov 1983;278(1-2):332-6.
123. Valentino RJ, Foote SL, Aston-Jones G. Corticotropin-releasing factor activates noradrenergic neurons of the locus coeruleus. *Brain Res.* 4 juill 1983;270(2):363-7.
124. Foley LE, Gegear RJ, Reppert SM. Human cryptochrome exhibits light-dependent magnetosensitivity. *Nat Commun.* 21 juin 2011;2:356.
125. Ritz T, Adem S, Schulten K. A model for photoreceptor-based magnetoreception in birds. *Biophys J.* févr 2000;78(2):707-18.
126. Kishkinev DA, Chernetsov NS. Magnetoreception systems in birds: A review of current research. *Biol Bull Rev.* 1 janv 2015;5(1):46-62.
127. Van der Horst GT, Muijtjens M, Kobayashi K, Takano R, Kanno S, Takao M, et al. Mammalian Cry1 and Cry2 are essential for maintenance of circadian rhythms. *Nature.* 15 avr 1999;398(6728):627-30.
128. Miyamoto Y, Sancar A. Vitamin B2-based blue-light photoreceptors in the retinohypothalamic tract as the photoactive pigments for setting the circadian clock in mammals. *PNAS.* 26 mai 1998;95(11):6097-102.
129. Yamanaka Y, Suzuki Y, Todo T, Honma K, Honma S. Loss of circadian rhythm and light-induced suppression of pineal melatonin levels in Cry1 and Cry2 double-deficient mice. *Genes Cells.* oct 2010;15(10):1063-71.
130. Hore PJ, Mouritsen H. The Radical-Pair Mechanism of Magnetoreception. *Annual Review of Biophysics.* 2016;45(1):299-344.

131. Mandilaras K, Missirlis F. Genes for iron metabolism influence circadian rhythms in *Drosophila melanogaster*. *Metallomics*. août 2012;4(9):928-36.
132. Xu Z, Etzel RA, Su H, Huang C, Guo Y, Tong S. Impact of ambient temperature on children's health: A systematic review. *Environmental Research*. 1 août 2012;117:120-31.
133. Xu Z, Huang C, Su H, Turner LR, Qiao Z, Tong S. Diurnal temperature range and childhood asthma: a time-series study. *Environmental Health*. 1 févr 2013;12(1):12.
134. Salvati KA, Beenhakker MP. Out of thin air: Hyperventilation-triggered seizures. *Brain Research*. 15 janv 2019;1703:41-52.
135. Doherty MJ, Youn C, Gwinn RP, Haltiner AM. Atmospheric Pressure and Seizure Frequency in the Epilepsy Unit: Preliminary Observations. *Epilepsia*. 2007;48(9):1764-7.
136. Asensi F, Devesa F, Fillol M. Meteorotropism of seizures in children from birth to seven years (author's transl). *An Esp Pediatr*. 1977;10(6-7):506-13.
137. Baxendale S. Seeing the light? Seizures and sunlight. *Epilepsy Res*. mars 2009;84(1):72-6
138. Manfredini R, Vergine G, Boari B, Faggioli R, Borgna-Pignatti C. Circadian and seasonal variation of first febrile seizures. *The Journal of Pediatrics*. 1 déc 2004;145(6):838-9.
139. Scorza FA, Albuquerque M de, Arida RM, Cavalheiro EA. Sudden unexpected death in epilepsy: Are winter temperatures a new potential risk factor? *Epilepsy Behav*. 1 mai 2007;10(3):509-10.
140. Cortez MA, McIntyre Burnham W, Hwang PA. Infantile spasms: Seasonal onset differences and zeitgebers. *Pediatric Neurology*. 1 avr 1997;16(3):220-4.
141. Vance DE. Belief in lunar effects of human behaviour. *Psychol Rep*. 1995;76(32):4.
142. Raison CL, Klein HM, Steckler M. The moon and madness reconsidered. *Journal of Affective Disorders*. 1 avr 1999;53(1):99-106.
143. Polychronopoulos et al. Lunar phases and seizure occurrence: just an ancient legend? *Neurology*. 2006;66:1442-3.
144. Hadzic D, Mladina N, Hadzic BC, Numanovic A. The lunar cycle and seizures in children. *Med Glas (Zenica)*. août 2010;7(2):137-42.
145. Éloïse Lalanne-Azidrou. Influence du cycle lunaire sur les crises d'épilepsie. *Médecine humaine et pathologie*. 2015. <dumas- 01248003>. 2015.
146. Tan M, D'Souza W. Seizure-Related Injuries, Drowning and Vehicular Crashes – A Critical Review of the Literature. *Curr Neurol Neurosci Rep*. 21 mai 2013;13(7):361.
147. Elkhayat HA, Hassanein SM, Tomoum HY, Abd-Elhamid IA, Asaad T, Elwakkad AS. Melatonin and Sleep-Related Problems in Children With Intractable Epilepsy. *Pediatric Neurology*. 1 avr 2010;42(4):249-54.
148. Fauteck J-D, Schmidt H, Lerchl A, Kurlemann G, Wittkowski W. Melatonin in Epilepsy: First Results of Replacement Therapy and First Clinical Results. *NSG*. 1999;8(1-2):105-10.
149. Kristoufek L. Does solar activity affect human happiness? *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 1 mars 2018;493:47-53.
150. « *Le soleil est rare et le bonheur aussi, l'amour s'égaré au long de la vie* » Parole de la musique « Valse de Melody » écrite par Serge Gainsbourg. Album : Histoire de Melody Nelson. 1971. Mercury®.

151. Stoupel E. The effect of geomagnetic activity on cardiovascular parameters. *Biomed Pharmacother.* 2002;56 Suppl 2:247s-56s.
152. Laniado S. 7-th International Death Sea Symposium on Cardiac Arrhythmia and Device Therapy. Tel Aviv. 2004. Book of Abstracts. 2004. Novel nonpharmacologic noninvasive technique for modulating the ECG; p. 41.
153. Stoupel E. Relationship of magnetic field and electron splitting to electrical heart instability and sudden death.(a hypothesis) *Europace.* 2002;(Suppl 1):A17:68.
154. Stoupel E, Shimshoni M, Keret R, Silbergeld A, Zoldan Y, Assa , Gilad I, Raps A, Hod M, Merlob P, Laron Z, Kuritzky A, Agmon J. Some clinical cosmobiological correlations in solar cycle 21. *Solar Terrestrial Predictions: Proceedings of a Workshop at Leura, Australia, October 16-20, 1989 Air Force Geophysics Laboratory, Bedford, Mass., USA. IPS Radio and Space Services Chatswood NSW2057 Australia. U.S. Department of Commerce, National Oceanic Atmospheric Administration, Boulder, Co., USA. 1990. p. 152–7.*
155. Sajadieh, A. *et al.* Increased heart rate and reduced heart-rate variability are associated with subclinical inflammation in middleaged and elderly subjects with no apparent heart disease. *European heart journal* **25**, 363–370, <https://doi.org/10.1016/j.ehj.2003.12.003> (2004).
156. Stoupel E, Shimshoni M, Agmon J. Is the localization of myocardial infarction time related? *Clinical Cardiology* 1988;11:45–9.
157. Ertel S. Influenza pandemics and sunspots-- easing the controversy. *Naturwissenschaften* 1994; 81(7): 308–311.
158. Hoyle F, Wickramasinghe NC. *Diseases from Space.* J.M. Dent & Sons Ltd.: London, 1979.
159. Domingo E. Mechanisms of viral emergence. *Veterinary Research* 2010; 41(6): 38.
160. Sturner WQ, Lynch HJ, Deng MH, Gleason RE, Wurtman RJ. Melatonin concentrations in the sudden infant death syndrome. *Forensic Sci Int. mars* 1990;45(1-2):171-80.
161. Stoupel E. Sudden cardiac deaths and ventricular extrasystoles on days with four levels of geomagnetic activity. *J Basic Clin Physiol Pharmacol. déc* 1993;4(4):357-66.
162. Stoupel E, Shimshoni M, Agmon J. Is localization of acute myocardial infarction time related? *Clin Cardiol. janv* 1988;11(1):45-9.
163. Ossenkopp KP, Cain DP. Inhibitory effects of acute exposure to low-intensity 60-Hz magnetic fields on electrically kindled seizures in rats. *Brain Res.* 1 mars 1988;442(2):255-60.
164. Messlinger K, Funakubo M, Sato J, et al. Increases in neuronal activity in rat spinal trigeminal nucleus following changes in barometric pressure—relevance for weather-associated headaches? *Headache* 2010;50:1449–1463.
165. Mazza, M., Di Nicola, M., Della, M.G., Janiri, L., Bria, P., Mazza, S., 2007. Bipolar disorder and epilepsy: a bidirectional relation? *Neurobiological underpinnings, current hypotheses, and future research directions. Neuroscientist* **13**, 392—404.
166. Hesdorffer, D.C., Hauser, W.A., Olafsson, E., Ludvigsson, P., Kjartansson, O., 2006. Depression and suicide attempt as risk factors for incident unprovoked seizures. *Ann. Neurol.* **59**, 35—41.
167. Brzezinski A. Melatonin in Humans. *New England Journal of Medicine.* 16 janv 1997;336(3):186-95.

AUTEUR : Nom : TORILLIOUX	Prénom : Morgan
Date de soutenance : Jeudi 12 Mars 2020	
Titre de la thèse : Impact de l'Activité Solaire en Médecine : Etude sur la crise d'épilepsie	
Thèse - Médecine - Lille - 2020	
Cadre de classement : Doctorat en Médecine	
DES + spécialité : Médecine Générale	
Mots-clés : Activité solaire, activité géomagnétique, éruptions solaires, taches solaire, crise d'épilepsie, neurologie, cardiologie, psychiatrie, mélatonine.	
Résumé :	
<p>Introduction : L'activité solaire, représentée par la variation temporelle et cyclique du nombre de taches solaires et d'éruptions solaires, provoque une modification de l'activité géomagnétique. De nombreuses études ont montré l'influence de cette activité solaire dans différentes pathologies médicales. Parallèlement, la survenue de crise d'épilepsie pourrait, en partie, être liée à des facteurs de risques environnementaux tels que ceux liés à la météorologie terrestre par exemple.</p> <p>Objectif : Après avoir défini la notion d'activité solaire puis réalisé une revue de littérature sur l'impact de cette activité sur des pathologies médicales et dans d'autres domaines non médicaux dans laquelle il sera discuté des mécanismes physio-pathologiques appliqués à chacun de ces éléments ; il s'agissait de déterminer, par le biais d'une étude dédiée, si l'activité solaire pouvait représenter un facteur de risque environnemental sur la survenue de crise d'épilepsie.</p> <p>Méthode : Au travers d'une étude rétrospective menée sur plus de huit ans, nous avons corrélé de façon quotidienne, 11924 consultations médicales aux Urgences Adultes et Enfants du CHU de Lille pour motif de crises d'épilepsies, aux données de l'activité solaire représentée par le nombre de taches solaires, d'éruptions solaires et par l'indice d'activité géomagnétique Ap.</p> <p>Résultats : Il a été retrouvé des corrélations statistiquement significatives entre le nombre de taches solaires et le nombre total de consultations médicales pour crise d'épilepsie [$r = 0.2484$; $p\text{-value} = 0.0101 < 0.05$] et entre le nombre d'éruptions solaires et le nombre total de consultations médicales pour crise d'épilepsie [$r = 0.2364$; $p\text{-value} = 0.0147 < 0.05$]. La corrélation statistiquement significative la plus forte est retrouvée entre le nombre de taches solaires et le nombre de consultations médicales pour crise d'épilepsie partielle [$r = 0.5467$; $p\text{-value} = 1.597 \cdot 10^{-9} < 0.05$].</p> <p>Discussion : Le mécanisme biologique physio-pathologique sous-jacent, le plus discuté dans la littérature, serait en lien avec l'hormone mélatonine qui serait affectée négativement par la forte activité solaire. Or, cette hormone serait anti-convulsante.</p> <p>Conclusion : La forte activité solaire pourrait représenter un facteur de risque environnemental sur la survenue de crise d'épilepsie. Cependant, d'autres études sont nécessaires pour étayer les présents résultats avant d'adopter de possibles stratégies de prévention basées sur la météorologie spatiale.</p>	
Composition du Jury :	
Président :	Monsieur le Professeur Eric WIEL
Assesseurs :	Monsieur le Professeur Philippe DERAMBURE Monsieur le Docteur Jean-Marie RENARD Madame le Docteur Leslie CHARBONNIER
Directrice de thèse :	Madame le Docteur Marie GIROT

