

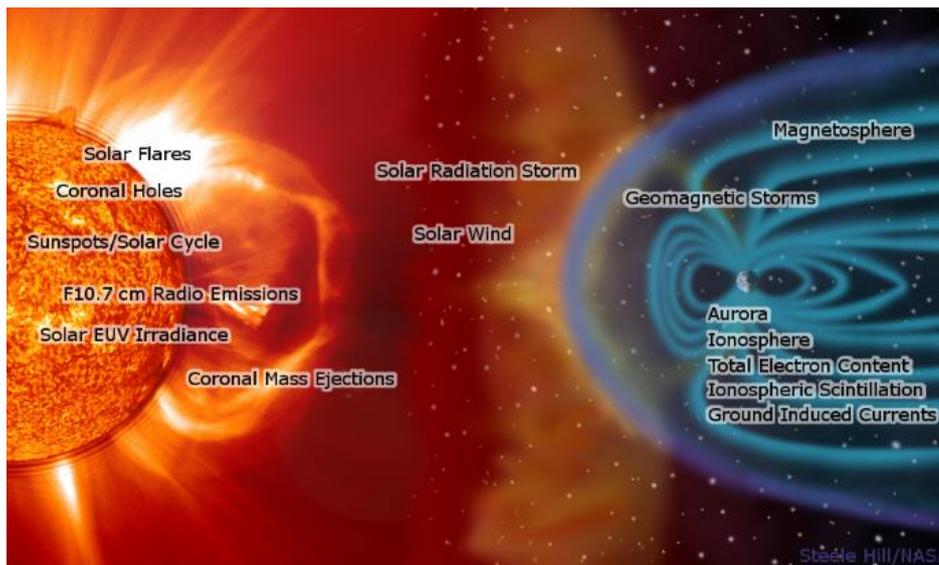
Diplôme d'Université « Structuration de l'Univers »  
Année 2023-2024

*Présenté par*  
Philippe Cetier

# **La Météorologie de l'espace**

*Sous la direction de*  
Christian Bizouard

---



*Vue d'artiste, Space Weather Phenomena – Steel Hill (NASA / NOAA-Space Weather prediction center)*

## Résumé

Depuis plus d'un siècle et demi (événement Carrington-1859) nous savons que nos technologies peuvent être sensibles aux émissions transitoires du soleil (électromagnétiques et particulaires). Les technologies les plus sensibles sont les satellites, la distribution électrique, les communications, la navigation par GNSS (Global Navigation Satellite System), l'aviation, l'exploration spatiale et d'autres dans une moindre mesure.

Pour les rayonnements électromagnétiques transitoires, ils arrivent directement dans l'atmosphère terrestre où ils sont en partie absorbés. Pour les particules leurs parcours dépendent des champs magnétiques, héliosphérique et magnétosphérique, ceux-ci ont un rôle majeur dans l'avènement de ces perturbations.

Le vent solaire, plasma froid non collisionnel issu de la couronne solaire, en est le médiateur. Il s'écoule continuellement dans le milieu interplanétaire et il interagit avec les environnements planétaires. Son extrême variabilité (vitesse, « densité », champ magnétique propre, température) dépend à la fois du cycle solaire, du lieu d'émission et des interactions avec les émissions transitoires solaires de particules.

Notre « bouclier » magnétique va réagir en fonction de l'orientation du vent solaire et de ses caractéristiques. Les particules peuvent être stockées, accélérées et donner naissance à des courants internes ou périphériques. Ceci aura pour conséquence la modification des caractéristiques de l'ionosphère. Qui engendra à son tour la majorité des perturbations sur nos technologies.

Une nouvelle discipline opérationnelle est née de ces constats, la Météorologie de l'Espace. Discipline qui évolue avec la connaissance scientifique de notre étoile, du milieu interplanétaire et de l'environnement proche de notre planète. Des mesures au sol ou satellitaires sont réalisées, des indices sont calculés, et des prévisions sont établies pour prévenir les domaines professionnels qui seront impactés.

## Abstract

For more than a century and a half (Carrington event-1859) we have known that our technologies can be sensitive to transient solar emissions (electromagnetic and particulate). The most sensitive technologies are satellites, electricity distribution, communications, GNSS (Global Navigation Satellite System) navigation, aviation, space exploration and others to a lesser extent.

Transient electromagnetic radiation reaches the Earth's atmosphere directly, where it is partly absorbed. The path of particles depends on the heliospheric and magnetospheric magnetic fields, which play a major role in causing these disturbances.

The solar wind, a collisionless cold plasma from the solar corona, is the mediator. It flows continuously through the interplanetary medium and interacts with the planetary environments. Its extreme variability (speed, density, magnetic field and temperature) depends on the solar cycle, the place of emission and interactions with transient solar particle emissions.

Our magnetic "shield" will react according to the orientation of the solar wind and its characteristics. Particles can be stored, accelerated and give rise to internal or peripheral currents. The result will be a change in the characteristics of the ionosphere. This in turn will cause most of the disruption to our technologies.

A new operational discipline has emerged from these observations: Space Weather. This discipline is evolving with our scientific knowledge of our star, the interplanetary medium and our planet's immediate environment. Measurements are taken on the ground or by satellite, indices are calculated, and forecasts are drawn up to warn of the professional fields that will be impacted.

## Liste des abréviations

|         |  |
|---------|--|
| ACE     | Advanced Composition Explorer  |
| ARTEMIS | Acceleration, Reconnection, Turbulence and Electrodynamic of Moon's Interaction with the sun                                 |
| ASCA    | Advanced Satellite for Cosmology and Astrophysics  |
| CIR     | Co-rotating Interaction Region (SIR : Stream Interaction Region)   |
| CME     | Coronal Mass Ejection (EMC : Ejection de Masse Coronale)   |
| DKIST   | Daniel K. Inouye Solar Telescope   |
| DSCOVR  | Deep Space Climate Observatory   |
| DST     | Disturbance Storm-time index   |
| EISN    | Estimated International Sunspot Number   |
| ESA     | European Space Agency ( <i>Agence Spatiale Européenne</i> )  |
| EUV     | Extrême Ultra-Violet   |
| GCR     | Galactic Cosmic Rays   |
| GIC     | Geomagnetically Induced Current ( <i>Courant Induit Géomagnétiquement</i> )  |
| GNSS    | Global Navigation Satellite System ( <i>Système de Navigation Global par Satellite</i> )                                     |
| GOES    | Geostationary Operational Environmental Satellite  |
| GONG    | Global Oscillations Network Group  |
| GSE     | Geocentric Solar Ecliptic  |
| HR      | <i>Hertzprung-Russel (Diagramme)</i>   |
| IMF     | Interplanetary Magnetic Field ( <i>Champ magnétique Interplanétaire</i> )  |
| IMP     | Interplanetary Monitoring Platform   |
| IR      | Infra-Rouge  |
| IRSN    | Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire   |
| ISES    | International Space Environment Service  |
| MHD     | MagnetoHydroDynamics   |
| NASA    | National Aeronautics and Space Administration  |
| NOAA    | National Oceanic and Atmospheric Administration  |
| OECD    | Organisation for Economic Co-operation and Development ( <i>Organisation de Coopération et de Développement Economique</i> ) |
| PFU     | Proton Flux Units  |
| PROBA-2 | PRoject for On-Board Autonomy  |
| SDO     | Solar Dynamics Observatory   |
| SEP     | Solar Energetic Particles ( <i>PSE : Particules Solaires Energétiques</i> )  |
| SFU     | Solar Flux Units   |
| SILSO   | Sunspot Index and Long-term Solar Observations   |
| SOHO    | Solar and Heliospheric Observatory   |
| STEREO  | Solar Terrestrial Relation Observatory   |
| SWPC    | Space Weather Prediction Center  |
| TEC     | Total Electron Content   |
| TRACE   | Transition Region And Coronal Explorer   |
| UA      | Unité Astronomique   |
| UN      | United Nations ( <i>ONU : Organisation des Nations Unies</i> )   |
| UV      | Ultra-Violet   |

## SOMMAIRE

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>POURQUOI LA METEOROLOGIE DE L'ESPACE ?</b>                              | <b>7</b>  |
| 1.1      | EVENEMENTS MAJEURS DU PASSE.   | 7         |
| 1.2      | LES DANGERS  | 7         |
| 1.3      | LES RISQUES  | 9         |
| 1.4      | LES PREVISIONS   | 10        |
| <b>2</b> | <b>ORIGINES ET DESCRIPTIONS DES PHENOMENES PHYSIQUES</b>                   | <b>11</b> |
| 2.1      | LE SOLEIL  | 11        |
| 2.1.1    | <i>Nature</i>  | 11        |
| 2.1.2    | <i>Fonctionnement</i>  | 11        |
| 2.1.3    | <i>Champ magnétique et cycle d'activité</i>                                | 12        |
| 2.1.4    | <i>La surface du soleil, la photosphère</i>                                | 15        |
| 2.2      | L'ATMOSPHERE DU SOLEIL   | 16        |
| 2.2.1    | <i>La chromosphère</i>   | 16        |
| 2.2.2    | <i>La couronne</i>   | 18        |
| 2.2.3    | <i>En résumé</i>   | 19        |
| 2.3      | LES EMISSIONS SOLAIRES   | 20        |
| 2.3.1    | <i>Les émissions continues</i>   | 20        |
| 2.3.2    | <i>Les émissions transitoires</i>  | 21        |
| <b>3</b> | <b>LE VENT SOLAIRE</b>   | <b>25</b> |
| 3.1      | ORIGINE  | 25        |
| 3.2      | VENT LENT, VENT RAPIDE   | 26        |
| 3.3      | VARIATIONS DE LA VITESSE DU VENT SOLAIRE EN FONCTION DE L'ACTIVITE SOLAIRE | 28        |
| 3.4      | SPIRALES DE PARKER   | 29        |
| 3.5      | INTERACTIONS ENTRE LE VENT LENT ET LE VENT RAPIDE                          | 31        |
| 3.6      | LES AJOUTS AU VENT SOLAIRE   | 32        |
| 3.7      | LA CIRCULATION JUSQU'À LA TERRE  | 34        |
| 3.8      | BILAN EN MASSE   | 35        |
| 3.9      | BILAN EN ENERGIE AU NIVEAU DE LA TERRE                                     | 35        |
| <b>4</b> | <b>L'IMPACT AVEC LA TERRE</b>  | <b>36</b> |
| 4.1      | LA MAGNETOSPHERE   | 36        |
| 4.1.1    | <i>Zone externe de la magnétosphère terrestre</i>                          | 38        |
| 4.1.2    | <i>Zone interne de la magnétosphère terrestre</i>                          | 40        |
| 4.2      | L'IONOSPHERE   | 41        |
| 4.3      | LES AURORES POLAIRES   | 43        |
| 4.4      | POUR RESUME,   | 44        |
| <b>5</b> | <b>DE LA METROLOGIE A LA METEOROLOGIE OPERATIONNELLE</b>                   | <b>44</b> |
| 5.1      | ACTIVITE SOLAIRE   | 46        |
| 5.1.1    | <i>Tâches solaires</i>   | 46        |
| 5.1.2    | <i>Flux solaire radio à la longueur d'onde 10,7 cm</i>                     | 46        |
| 5.1.3    | <i>Flux solaire X pour des longueurs d'onde entre 0,1 nm et 0,8 nm</i>     | 47        |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 5.1.4    | Les données d'imagerie solaire .....  | 47        |
| 5.1.5    | Le flux de protons .....  | 49        |
| 5.1.6    | Emissions UV et EUV.....  | 50        |
| 5.1.7    | Oscillation solaire .....   | 50        |
| 5.2      | LE VENT SOLAIRE.....  | 51        |
| 5.3      | LA MAGNETOSPHERE INTERNE .....  | 52        |
| 5.3.1    | Le flux d'électrons.....  | 52        |
| 5.4      | L'IONOSPHERE .....  | 52        |
| 5.4.1    | Le contenu total en électron (TEC) .....  | 52        |
| 5.4.2    | Scintillation ionosphérique .....   | 53        |
| 5.5      | L'ACTIVITE GEOMAGNETIQUE .....  | 53        |
| 5.6      | LA DOSIMETRIE .....   | 55        |
| 5.7      | LES PREVISIONS EN METEOROLOGIE DE L'ESPACE.....                                       | 56        |
| 5.7.1    | Exemples de prévisions.....   | 56        |
| <b>6</b> | <b>CONCLUSIONS.....</b>   | <b>58</b> |
| 6.1      | DERNIERES MINUTES .....   | 59        |
| <b>7</b> | <b>ANNEXES.....</b>   | <b>61</b> |
|          | ANNEXE 1 PERTURBATIONS DIRECTES ET SECONDAIRES SUR LES INFRASTRUCTURES CRITIQUES..... | 61        |
|          | ANNEXE 2 EVOLUTION DU CYCLE SOLAIRE SUIVANT DEUX INDICES .....                        | 62        |
|          | ANNEXE 3 LE PLASMA.....   | 63        |
|          | ANNEXE 4 LES EQUATIONS DE LA MHD .....  | 64        |
|          | ANNEXE 5 PARAMETRE PLASMA B .....   | 65        |
|          | ANNEXE 6 EXTENSION DU VENT SOLAIRE .....  | 66        |
|          | ANNEXE 7 DIMENSIONS COMPAREES DES MAGNETOSPHERES PLANETAIRES .....                    | 67        |
|          | ANNEXE 8 L'ONDE DE CHOC TERRESTRE.....  | 68        |
|          | ANNEXE 9 LA FORCE DE LORENTZ.....   | 69        |
|          | ANNEXE 10 LIMITE DE LA MAGNETOPOUSE .....   | 70        |
|          | ANNEXE 11 GIRATION, REBOND ET DERIVE DANS LES CEINTURES DE RADIATIONS .....           | 71        |
|          | ANNEXE 12 RECONNEXION MAGNETIQUE DANS LA MAGNETOSPHERE TERRESTRE .....                | 72        |
|          | ANNEXE 13 COUCHES ATMOSPHERIQUES ET IONOSPHERIQUES .....                              | 74        |
|          | ANNEXE 14 EXEMPLE DE COMPTAGE DE TACHES SOLAIRES .....                                | 76        |
|          | ANNEXE 15 ECHELLES NOAA .....   | 77        |
|          | ANNEXE 16 INFOGRAPHIE, FICHES SYNTHETIQUES .....                                      | 79        |
| <b>8</b> | <b>REFERENCES.....</b>  | <b>83</b> |
| 8.1      | SITOGRAPHIE .....   | 83        |
| 8.2      | BIBLIOGRAPHIE .....   | 86        |

# 1 Pourquoi la météorologie de l'espace ?

---

## 1.1 Evènements majeurs du passé.

Depuis l'avènement de notre société industrielle, il est apparu des dysfonctionnements en relation directe avec l'activité solaire, citons :

- Nous sommes dans la soirée du **28 août 1859** (Cycle solaire 10), des aurores boréales sont visibles à des latitudes très basses (Caraïbe), aux États-Unis les communications télégraphiques sont perturbées voire interrompues, des équipements sur ces lignes télégraphiques prennent feu spontanément. Les observations magnétiques terrestres font état de très fortes perturbations. Richard Carrington et Richard Hodgson qui observaient le soleil à la même époque constatent que le soleil est couvert de tâches. Ils furent les premiers à faire le rapprochement entre ces événements, le nombre de tâches et l'activité solaire.
- **En septembre 1909** (cycle solaire 14) Des stations de télégraphe à Tokyo sont perturbées par des Courants Induit Géomagnétiquement (CIG)
- Le **13 mars 1989** (Cycle solaire 22) au Québec la panne d'un transformateur de puissance de distribution électrique priva d'électricité 6 millions d'habitants pendant 9 h. Les causes sont aussi liées à un enchaînement d'évènements dont l'origine est l'activité solaire.
- Le **16 août** de la même année, le système informatique de la bourse de Toronto tomba en panne pendant 3h pour la même origine.
- **En 2000**, (cycle solaire 23) des satellites tels que ASCA ont rencontrés des dysfonctionnements causés par des décharges électrostatiques et par du freinage atmosphérique.
- **Le 30 octobre 2003** (cycle solaire 23) la distribution électrique en Afrique du Sud et en Suède subissent des avaries majeures. Par ailleurs, les systèmes de navigation et de communications radio sont très perturbés.
- **En 2012** (cycle solaire 24) une Ejection de Masse Coronale (EMC) a parcouru une distance de 1UA en 21h, fort heureusement cette EMC n'était pas en direction de la terre. Une évaluation des courants induits a montré qu'ils auraient pu être du même ordre de grandeur que ceux de 1989 et 2003.
- Le **3 février 2022** (cycle solaire 25) l'augmentation inattendue de la trainée atmosphérique causa la perte de 40 satellites sur 49 de la société Space X.

Ces perturbations et beaucoup d'autres sont en lien avec l'activité solaire. (H.Koskinen,et Coll.), (Bernoux, 2022), (Perri, 2019), (Odenwald, 2009), (J.Lilensten, F. Pitout, M.Gruet, J.P. Marques, 2021).

## 1.2 Les dangers

Nos sociétés de plus en plus technologiques ont leur « talon d'Achille », des événements directs ou en cascades liés à l'activité solaire et aux rayonnements cosmiques peuvent mettre en danger les activités humaines systémiques. La figure 1 image les impacts de l'activité solaire.

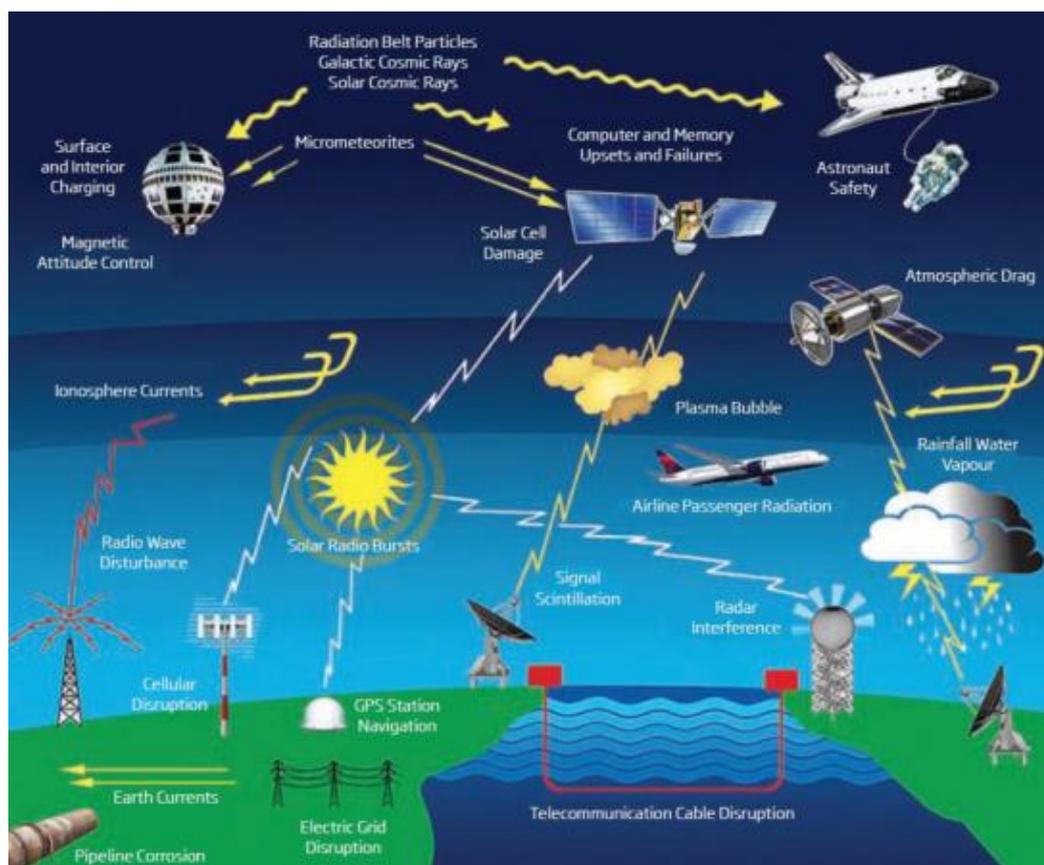


Fig.1 Schéma résumant l'impact des événements solaires sur les systèmes technologiques de la terre. (Cédits : Louis J. Lanzerotti, Bell Laboratories, Lucent Technologies, Inc)

Les domaines sensibles aux « émissions solaires » sont pour la partie technologique : le spatial, les télécommunications, la navigation par GNSS (Global Navigation Satellite System), l'aviation commerciale, la distribution électrique de puissance, les ouvrages industriels longs tels que les pipelines et les rails. Pour la partie humaine : la dosimétrie des personnels navigants et des passagers dans des avions survolant les pôles. Ainsi que la dosimétrie des personnels du spatial (astronautes).

Nous colonisons de plus en plus notre environnement spatial proche et hors de nos protections naturelles que sont l'atmosphère et la magnétosphère. Les astronautes et les satellites évoluent dans un milieu plus ou moins irradiant (électromagnétique ou particulaire) et chargé de débris technologiques à forte énergie cinétique. Les débits d'équivalents de dose peuvent être très importants en cas de sortie extravéhiculaire et de même, les impacts avec des débris peuvent être fatals.

Pour les mêmes raisons les satellites subissent un vieillissement accéléré ainsi que des défauts de fonctionnement, qui nécessitent à la conception et à leur construction des dispositions très spécifiques. En opération c'est un contrôle permanent par les équipes au sol (corrections ou modifications d'orbite, arrêt préventif de capteurs, ...) qui est nécessaire et qui doit tenir compte des événements solaires. Leur bon fonctionnement est devenu essentiel à nos modes de vie pour le travail et les loisirs (navigation, transmission, mesures terrestres diverses, météorologie atmosphérique, ...).

Les propriétés de l'ionosphère pour les ondes radios (absorption, réflexion, modification des trajectoires, délai, scintillation) peuvent évoluer brusquement et perturber les systèmes de navigation et les liaisons satellites.

Le personnel de l'aviation est exposé à des débits d'équivalent de dose aussi importante que les travailleurs du nucléaire (ex : aux altitudes de vol conventionnel, 20  $\mu\text{Sv/h}$ ) ceci hors événement solaire.

Dans le cas d'évènement solaire majeur, la modélisation donne une valeur  $10^3$  plus importante (J.Lilensten, F. Pitout, M.Gruet, J.P. Marques, 2021). Ceux qui concernent le personnel navigant concernent dans une moindre mesure les passagers.

Nous sommes dans un milieu magnétique naturel et artificiel, les perturbations importantes de ce milieu créent des courants géomagnétiques induits (CIG), courants continus faiblement variables dans le sol qui vont induire à leur tour des courants dans toutes les structures métalliques de grandes longueurs et conductrices : ligne de distribution électrique, rails, pipeline. Les transformateurs en bout de ligne peuvent être détruits, si leur dimensionnement n'a pas pris en compte ces phénomènes. Les pipelines sont soumis à une corrosion plus importante limitant leur durée d'utilisation du fait des courants induits. Les différents effets ont été catalogués dans le document ESA « Space Weather Effects Catalogue (Koskinen et al., 2001).

Il est à noter qu'il n'a pas eu d'évènement connu (documenté) avec perte humaine, c'est avant tout des pertes de matérielles ou des dysfonctionnements temporaires, mais qui laissent craindre des coûts sociaux économiques très importants. Coûts étudiés par les compagnies d'assurance avec l'aide des institutions scientifiques (Maynard et al., 2013)



Fig. 2 Résumé des impacts

### 1.3 Les risques

Les risques de ces événements dépendent de leur probabilité d'occurrence ainsi que de leurs prévisions et des contre-mesures qui pourront être mises en place. Un évènement comme celui de mars 1989 a une probabilité de se reproduire tous les 50 ans et un évènement comme août 1859 tous les 150 ans pour certains, tous les 1000 ans pour d'autres. Les statistiques sont trop faibles et font l'objet de **questions ouvertes et donc de recherche, par exemple sur les traces du passé** (Miyake et al., 2021) .

Ce qui semble plus certain ce sont les conséquences d'un évènement majeur : 2000 G\$ d'après une étude de l'académie japonaise. L'OCDE classe les tempêtes géomagnétiques parmi les cinq risques planétaires, à l'égal des risques financiers systémiques, des cyber-risques, des troubles sociaux et des pandémies (J.Lilensten, F. Pitout, M.Gruet, J.P. Marques, 2021).

Le risque est d'autant plus élevé que nos sociétés sont de plus en plus complexes avec des structures interdépendantes. Les évènements pouvant arriver par effet domino (Cf. Fig. 3).

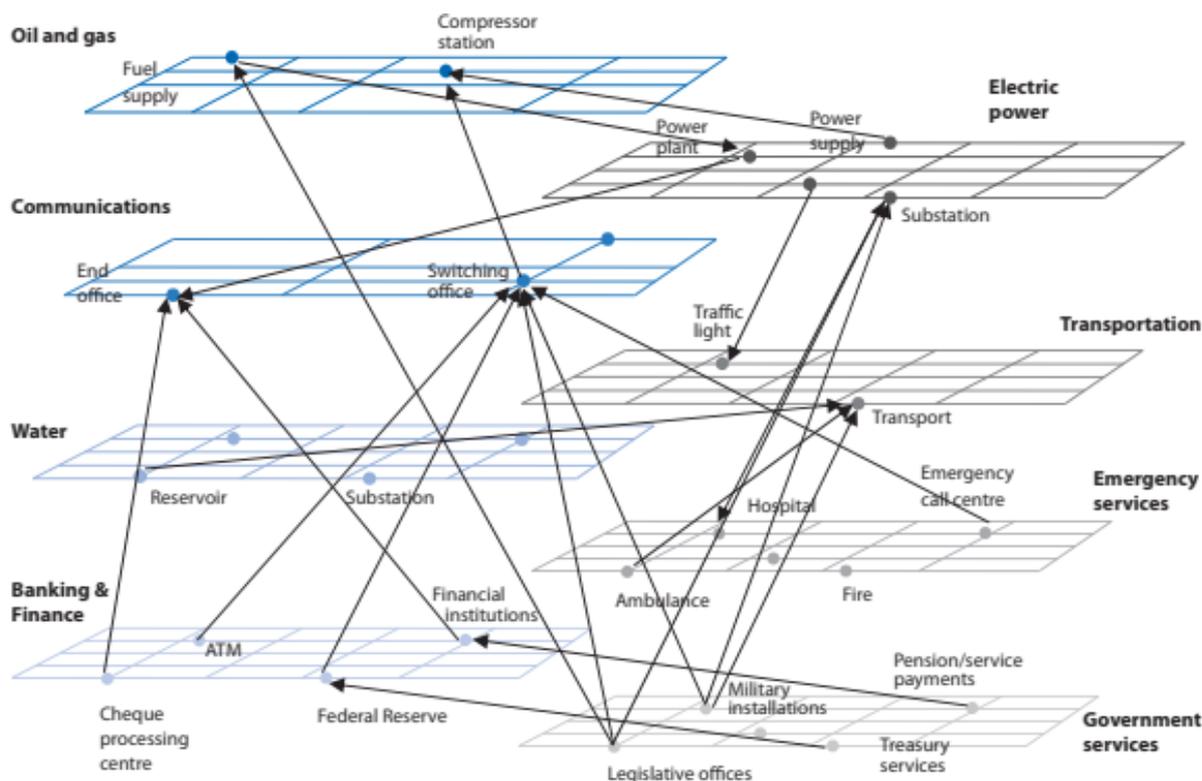


Fig.3 Interdépendance des infrastructures, Source (Futur Global Shocks - Improving risk governance - OECD Review of Risk Management Policies, 2011)

Il existe cinq causes principales (Futur Global Shocks - Improving risk governance - OECD Review of Risk Management Policies, 2011) qui augmentent la vulnérabilité et amplifient les conséquences rendant ainsi les futurs chocs mondiaux plus probables,

- La mobilité accrue, des flux d’humains, des matériels et des capitaux.
- L’interdépendance des systèmes de production, de livraison et de leurs infrastructures.
- La centralisation et la concentration des systèmes.
- L’urbanisation et la concentration des populations et des actifs.
- Le comportement grégaire et « pensée de groupe » dans les entreprises et les professions, ainsi que parmi les régulateurs.

## 1.4 Les prévisions

Depuis quelques décennies un consensus international existe pour développer nos capacités prévisionnelles. Une nouvelle discipline opérationnelle est apparue faisant suite à l’aéronomie<sup>1</sup>, La météorologie de l’espace.

<sup>1</sup> **Aéronomie** : Etude des propriétés physiques et chimiques des parties de l’atmosphère où les réactions d’ionisation et de dissociation deviennent prédominantes par opposition à l’aérodynamique qui étudie les portions de l’atmosphère où les phénomènes de turbulences ont une importance majeure.

La définition donnée par l'organisation mondiale de la météorologie de l'ONU est :

« **La météorologie de l'espace est la discipline qui traite de l'état physique et phénoménologique des environnements spatiaux naturels. Au moyen de l'observation, de la surveillance, de l'analyse et de la modélisation, elle vise à plusieurs objectifs : d'une part comprendre et prévoir l'état du Soleil et des environnements interplanétaires ou planétaires, ainsi que les perturbations qui les affectent, qu'elles soient d'origine solaire ou non. D'autre part, analyser en temps réel ou prévoir d'éventuels effets sur les systèmes biologiques et technologiques** ».

Elle englobe trois domaines de recherche très spécifiques qui sont :

- Le Soleil avec l'héliosphère.
- La Magnétosphère terrestre.
- L'Atmosphère et l'ionosphère terrestre.

L'ensemble formant un système complexe. Elle est donc à la croisée de l'héliophysique, de la géophysique spatiale et de l'aéronomie.

La météorologie de l'espace s'inspire des méthodes de la météorologie atmosphérique classique. Mais la physique de l'atmosphère terrestre concerne la mécanique des fluides, la thermodynamique tandis que la météorologie de l'espace concerne la physique des plasmas (Cf. annexe 4, la MagnétoHydroDynamique).

Dans l'atmosphère au niveau de la mer nous avons  $3.10^{19}$  particules.cm<sup>-3</sup> et majoritairement des molécules neutres. Dans le milieu interplanétaire, nous avons de 0,1 particules à 1000 particules.cm<sup>-3</sup>, électrons, protons, noyau d'Hélium et ions, particules essentiellement chargées (constituant un plasma), sans compter les nano particules de matière (poussières) (Le Chat and Issautier, 2015), ainsi que le rayonnement électromagnétique et les particules de hautes énergies. S'il fallait résumer, peu de matière dans beaucoup d'espace et avec des conditions extrêmes.

Autres différences notables, le maillage des mesures physiques est important dans un cas et dans l'autre cas, le maillage est très faible. Une dizaine de mesures par satellites pour une quinzaine de satellites et des mesures directes ou indirectes au sol, donc des mesures peu nombreuses comparativement. Autre point important la météorologie de l'espace est une discipline naissante (< 40 ans).

Dans les deux disciplines la modélisation est largement utilisée pour aider les prévisionnistes, mais les modèles en météorologie de l'espace sont loin d'avoir les mêmes incertitudes qu'en météorologie atmosphérique.

## 2 Origines et descriptions des phénomènes physiques

---

### 2.1 Le soleil

Il est à l'origine de tous les évènements qui concernent la météo de l'espace.

#### 2.1.1 Nature

Le soleil est une étoile de type naine jaune, de spectre G2V, sa composition : H 92,1 %, He 7,8 %, autres éléments (O, C, N, Fe, Mg, Ca, ...) en trace 0,1%. (Malherbe).

#### 2.1.2 Fonctionnement

Les réactions thermonucléaires de fusion ont lieu dans le cœur, l'hydrogène est transformé continuellement en hélium. Le soleil est une sphère de plasma (Cf. annexe 3) en équilibre hydrostatique entre la pression de radiation des réactions nucléaires et la gravité. Il est formé de plusieurs couches au-

dessus du cœur (Fig. 4), radiative et convective et d'une atmosphère complexe siège d'un vent continu et de phénomènes éruptifs. Le soleil est à mi-vie, il est dans la séquence principale du diagramme Hertzsprung-Russel (HR).

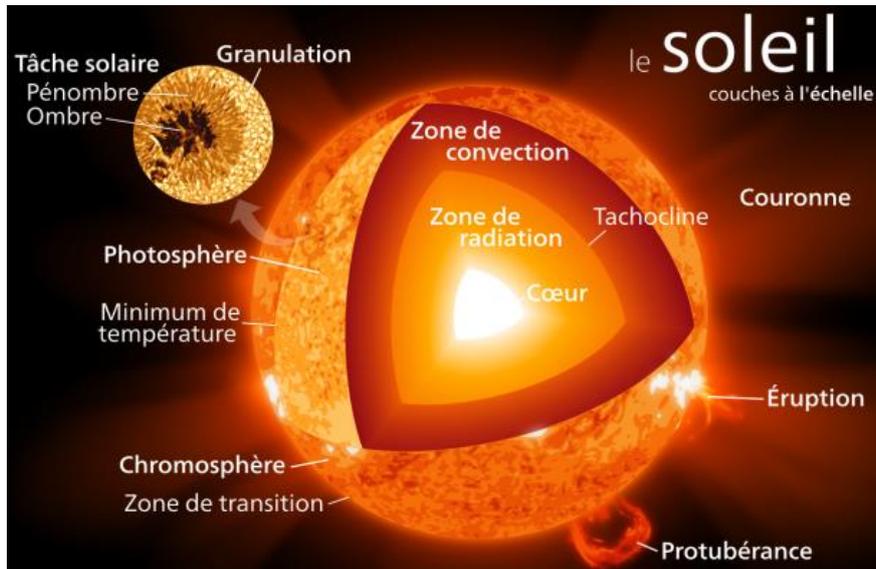


Fig.4 Schéma de la structure en couches du soleil  
(Bernoux, 2022) Source : Wikimedia Commons

|   | « Densité »<br>( $m^{-3}$ ) | Pression<br>(Pa)    | Température<br>(K) | Altitude<br>(km) |
|---|-----------------------------|---------------------|--------------------|------------------|
| Interface zones Convective et Radiative | $1,7 \cdot 10^{28}$         | $6 \cdot 10^{11}$   | $1,3 \cdot 10^6$   | -1500            |
| Interface zones Radiative/Coeur         | $1,4 \cdot 10^{31}$         | $3 \cdot 10^{15}$   | $8 \cdot 10^6$     | -500000          |
| Coeur                                   | $5 \cdot 10^{31}$           | $2,2 \cdot 10^{16}$ | $15 \cdot 10^6$    | -700000          |

Tab.1 Caractéristiques des couches internes du soleil (Robert, 2023)

### 2.1.3 Champ magnétique et cycle d'activité

(Perri, 2019) (Noraz, 2022)

#### ➤ Rotation différentielle

Le soleil possède un champ magnétique (évolutif et cyclique) créé par la rotation différentielle de ses différentes couches, radialement au-dessus de la tachocline<sup>2</sup> (effet dynamo). Le champ est poloïdal en début et fin de cycle, il est toroïdal à mi-cycle. La couche externe tourne en 35 jours aux pôles et 25 jours à l'équateur. Le champ magnétique global s'inverse en fin de cycle. Ce champ est de l'ordre du Gauss. (Celui de la terre  $\sim 0,5$  G).

<sup>2</sup> Tachocline : C'est la zone de transition entre la zone centrale en rotation uniforme et la zone périphérique en rotation différentielle, concrètement entre la zone radiative et la zone convective. (Wikipédia)

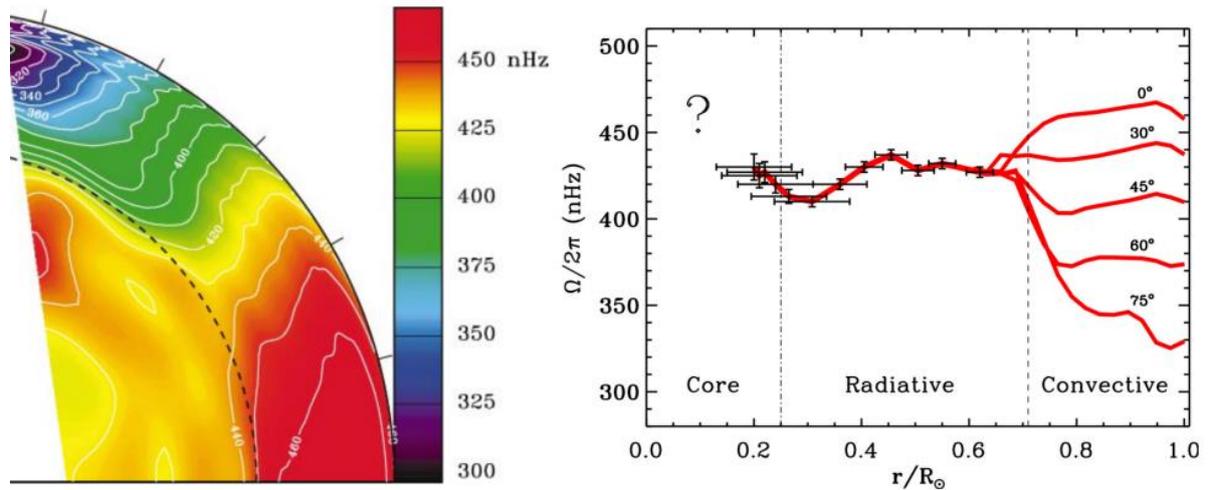


Fig. 5 Rotation différentielle du soleil. (Noraz, 2022) Crédit : Thompson et al (2003).

La figure 5 (Noraz, 2022) donne, à gauche le profil méridien de la rotation différentielle du soleil dans l'hémisphère Nord. L'échelle de couleur indique la vitesse angulaire de rotation en nHz. Soit de 300 à 470 nHz équivalent respectivement à 38,5 j et 24,6 j. À droite Les profils radiaux de la vitesse angulaire pour des latitudes particulières. On remarque la transition à la tachocline, d'une rotation solide (zone radiative) à une rotation différentielle (zone convective).

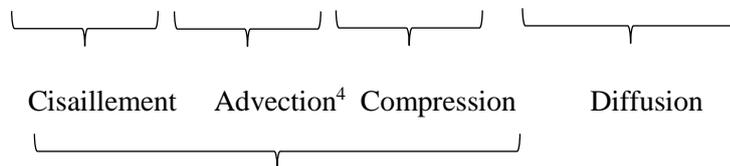
➤ Génération du champ magnétique (Noraz, 2022)

Les équations de Maxwell prévoient qu'un champ magnétique se crée lors de la présence d'un courant électrique. Dans un plasma, la matière est constituée de particules chargées. Lorsqu'elles sont en mouvement, elles sont un courant électrique qui va être lui-même à l'origine d'un champ magnétique. La théorie qui fait référence est celle de la « dynamo fluide » (Moffatt, 1978 ; Parker, 1993). L'équation d'induction en donne son principe, elle décrit l'évolution du champ magnétique.

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \nabla \times (v \times B) - \nabla \times (\eta_m \nabla \times B)$$

Si l'on développe le premier terme<sup>3</sup>

$$= (B \cdot \nabla)v - (v \cdot \nabla)B - B \cdot (\nabla \cdot v) - \nabla \times (\eta_m \nabla \times B)$$



Induction

$B, v$  et  $\eta_m$  sont respectivement le champ magnétique, la vitesse de l'écoulement et la diffusivité magnétique.

<sup>3</sup> Rappel mathématique : [https://www.methodemaths.fr/divergence\\_gradient\\_rotationnel\\_laplacien/#recapitulatif](https://www.methodemaths.fr/divergence_gradient_rotationnel_laplacien/#recapitulatif)

<sup>4</sup> L'advection est le transport de chaleur, de matière, etc. (d'une propriété du milieu) ... à la vitesse du milieu environnant

Le champ magnétique est créé par un terme d'induction, propre à la vitesse, et détruit par la diffusion. L'induction magnétique a trois composantes qui sont le cisaillement, l'advection et la compression. L'effet dynamo est donc la possibilité d'un plasma à créer et maintenir un champ magnétique contre sa dissipation.

➤ Mécanismes en jeu

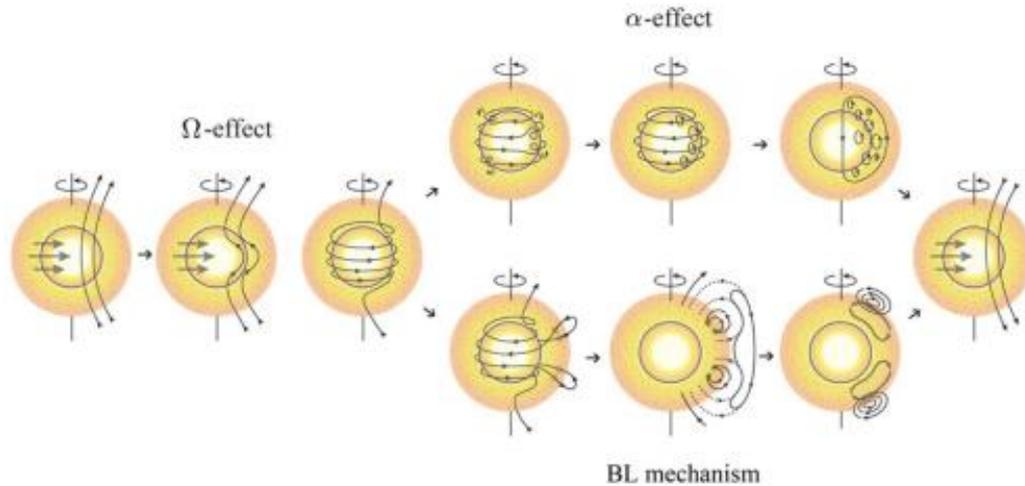


Fig.6 Schéma des différents mécanismes physiques d'une boucle dynamo jusqu'à l'inversion du champ solaire. A gauche, l'effet  $\Omega$  ; à droite, l'effet  $\alpha$  et en bas l'effet Babcock-Leighton. La zone interne (jaune-orange foncée) est la zone radiative. La zone externe (jaune-orange clair) est la zone convective. Crédits : Sanchez et al. 2014

La Fig. 6 image les mécanismes en jeu :

- Effets  $\Omega$  : Il y a cisaillement des lignes de champs magnétiques poloïdales par les écoulements toroïdaux à grande échelle du fait de la rotation différentielle.
- Effets  $\alpha$  : Il découle de la manifestation de la turbulence magnétique à petites échelles, dont la cause est principalement les mouvements hélicoïdaux de la convection turbulente, cet effet a été proposé par Parker (1955).
- Effets Babcock-Leighton (BL) : Il met en jeu la force de Coriolis agissant sur les tubes de flux émergeant de la zone convective. Il transforme la composante toroïdale des tubes de flux en composante poloïdale. Il est à l'origine de l'apparition des tâches solaires et de leur migration.

L'explication de ces phénomènes est analysée par la théorie MagnétoHydroDynamique (MHD) (Cf. annexe 4), créée par le Suédois Alfvén en 1970. Elle combine la dynamique des milieux continus et compressibles et l'électromagnétisme de Maxwell. Les points d'achoppement de ces théories sont les limites de leurs domaines de validité ainsi que la véracité par rapport aux observations. Observations qui sont de plus en plus détaillées, grâce aux mesures et images par satellites. **Cela reste des questions ouvertes.**

➤ Conséquences

Il apparaît au fur et mesure du déroulement du cycle solaire des structures magnétiques actives locales avec des champs magnétiques complexes et très variés, jusqu'à des valeurs de plusieurs milliers de Gauss. Elles remontent de la zone de convection après avoir été générées au niveau de la tachocline. Celles-ci subissent des torsions de leurs lignes de champ et donnent naissance aux boucles magnétiques

<sup>5</sup>  $\Omega$  et  $\alpha$  car il y a identité avec les formes des lignes de champ.

et aux structures plus complexes qui peuvent apparaître ensuite : Ce sont les tâches solaires, les facules, les protubérances, les filaments.

Le cycle d'activité est en relation avec le nombre de tâches solaires. Il est en moyenne de 11ans (Cf. annexe 2), le cycle magnétique est de 22 ans puisqu'il s'inverse à chaque cycle de 11 ans.

Quant aux cycles de 100 ans voire 400 ans, ils pourraient être corrélés avec la précession de l'axe magnétique du Soleil par rapport à son axe de rotation (Acker, 2013), **c'est une question ouverte**.

#### 2.1.4 La surface du soleil, la photosphère

La photosphère est la couche qui sépare l'intérieur de l'extérieur de l'étoile de 500 km d'épaisseur, elle a un aspect granulaire correspondant aux cellules convectives inférieures (Cf. Fig.7), les granules sont dynamiques : la matière monte au centre des granules et descend aux frontières (inter granules) avec une vitesse inférieure à  $1 \text{ km.s}^{-1}$ , le temps de retournement convectif est de l'ordre de 5 à 10 min. Il existe aussi des structures convectives plus grandes : les méso-granules ( $5 \text{ à } 10^4 \text{ km}$ ), les super-granulations ( $3 \text{ à } 5 \cdot 10^4 \text{ km}$ ) et les cellules géantes ( $2 \cdot 10^5 \text{ km}$ ) (Noraz, 2022).

La photosphère a une température proche de la température effective du soleil. La température diminue en fonction de l'altitude. L'hydrogène est essentiellement sous forme neutre. Elle est le lieu d'apparition des tâches solaires et des facules, et le lieu d'émergence des champs magnétiques locaux<sup>6</sup> et par là même des éruptions solaires (Malherbe and Roudier, 2010) (Perri, 2019).

|                          | Moyenne                  | Variation de 0 à 500 km                                      |
|--------------------------|--------------------------|--|
| Pression moyenne         | $10^3 \text{ Pa}$        | $1,3 \cdot 10^4 \text{ Pa}$ à $10^2 \text{ Pa}$              |
| Température              | 5000 K                   | 6400 K à 4170 K  |
| « Densité » $\text{H}^+$ | $10^{22} \text{ m}^{-3}$ | $3 \cdot 10^{-4} < \rho < 3 \cdot 10^{-6} \text{ kg m}^{-3}$ |
| « Densité » $\text{e}^-$ | $10^{19} \text{ m}^{-3}$ | $5 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$ à $10^{17} \text{ m}^{-3}$  |

Tab. 2 Caractéristiques de la photosphère (J.M. Malherbe, T. Roudier, 2010)

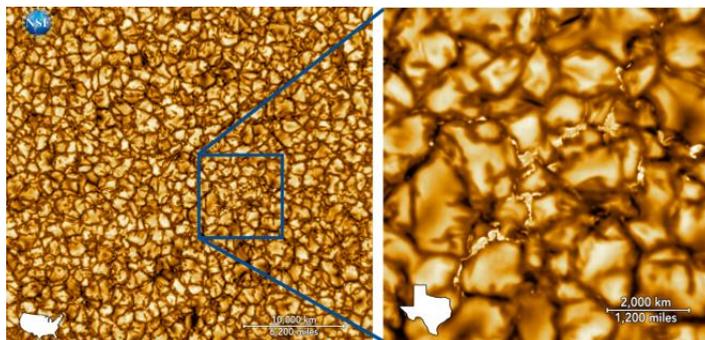


Fig.7 Granulation solaire (Noraz, 2022). Credit: DKIST/NSO/NSF/AURA

Commentaires de la figure 7 : A gauche image prise à  $\approx 705 \text{ nm}$ , de la granulation solaire (téléscope DKIST<sup>7</sup>), un côté représente 30000 km, une comparaison à la taille des Etats-Unis est proposé. A droite, un zoom de la photographie précédente, un côté représente 8000 km, une comparaison à la taille du Texas est proposée.

<sup>6</sup> <https://observations-solaires.obspm.fr/>

<sup>7</sup> Film NSO : <https://nso1.b-cdn.net/wp-content/uploads/2016/04/Solar-Gran-DKIST.mp4?autoplay=1>

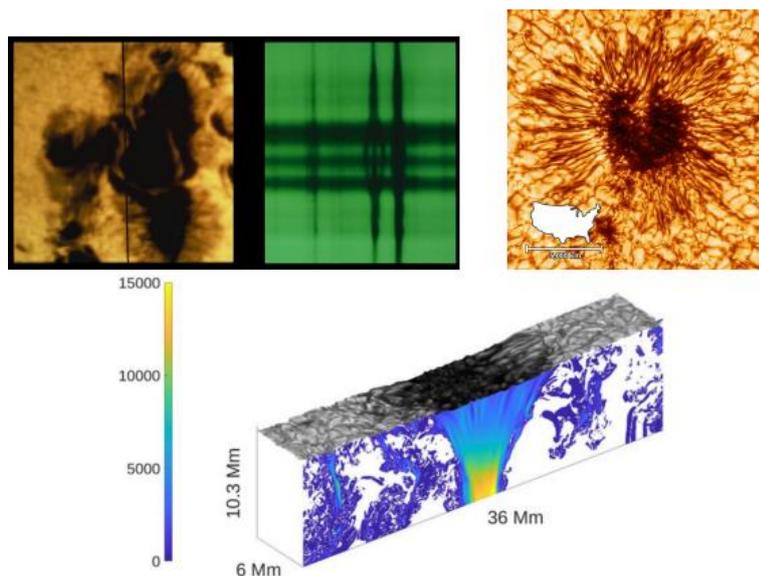


Fig. 8 Taches solaires (Noraz, 2022). Crédit : DKIST/NSO/AURA/NSF ; Panja et al (2020)

Commentaires de la Figure 8 : A gauche, Une image dans le visible d'une tache solaire et de son spectre, prise le 4/07/1974 au Kitt Peak National Observatory. On distingue l'effet Zeeman subdivisant en 3 une raie du Fe à 525 nm, correspondant à un champ magnétique de 4,13 kG.

A droite, Une image à  $\approx 705$  nm d'une tache solaire au niveau de la photosphère, le 28/01/2020 avec le télescope DKIST. Un côté représente environ 18 000 km. En bas, simulation en 3D d'une tache solaire. Les niveaux de gris de la surface supérieure représentent l'intensité bolométrique, c'est-à-dire de la luminosité qui serait observée, tandis que les couleurs de la tranche verticale donnent la composante verticale  $B_z$  (Cf. nota important § 5.2) en Gauss.

## 2.2 L'atmosphère du soleil

(Malherbe and Roudier, 2010) (Robert, 2023) (Noraz, 2022)

### 2.2.1 La chromosphère

La Chromosphère est au-dessus de la photosphère. La densité continue à décroître. L'hydrogène n'est plus essentiellement neutre. L'environnement de la chromosphère est dominé par les spicules qui s'échappent de la photosphère et par les fibrilles qui sont les structures horizontales de matière plus froide qui conduisent la matière vers l'extérieur. La source d'énergie principale est le rayonnement de la photosphère. Le rayonnement de la chromosphère est composé des raies d'émission du Mg II, Ca II, K, H (séries Lyman et Balmer).

D'autres structures prennent naissance dans la chromosphère, par exemple les filaments (protubérances sur le limbe)

|                   | Moyenne                  | Variation de 500 à 2000 km  |
|-------------------|--------------------------|---|
| Pression          | 1 Pa                     | $10^2$ à $10^{-2}$ Pa   |
| Température       | 8000 K                   | 4170 à 10000 K  |
| « Densité » $H^+$ | $10^{19} \text{ m}^{-3}$ | $1,8 \cdot 10^{-10} < \rho < 3,6 \cdot 10^{-6} \text{ kg m}^{-3}$ |
| « Densité » $e^-$ | $10^{17} \text{ m}^{-3}$ | $10^{17}$ à $4 \cdot 10^{16} \text{ m}^{-3}$                      |

Tab. 3 Caractéristiques de la chromosphère (J.M. Malherbe, T. Roudier, 2010)

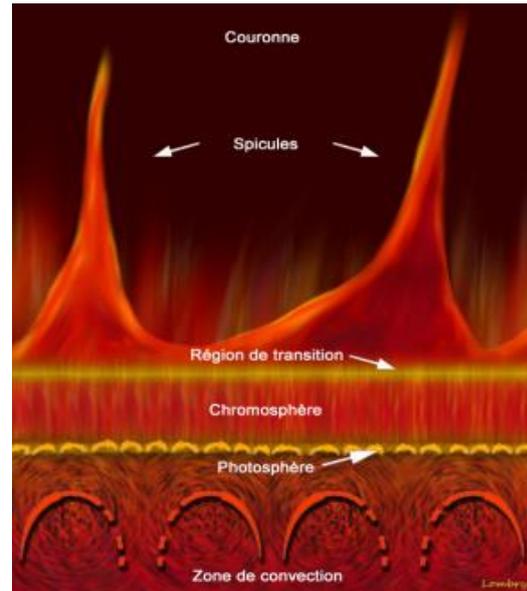
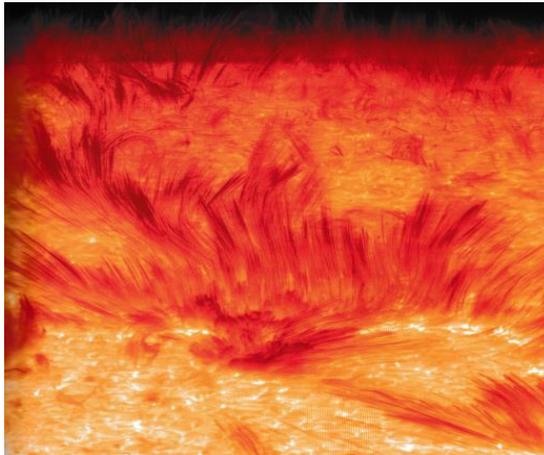


Fig.9 les spicules (Janvier and Garcin, 2023; Robert, 2023). Crédit : T. Lombry.

La structure en « gazon », les spicules, sont de petits jets de matière minces allongés situés entre les granulations et pouvant atteindre quelques dizaines de milliers de Km, les spicules (Janvier and Garcin, 2023), Cf. Fig. 9. Les spicules participent à l’alimentation du vent solaire lent.

Il existe une zone de transition entre la chromosphère et la couronne solaire (Fig.9), elle est caractérisée par un changement de température brutal de  $2 \cdot 10^3$  à  $10^6$  K (Fig. 10)

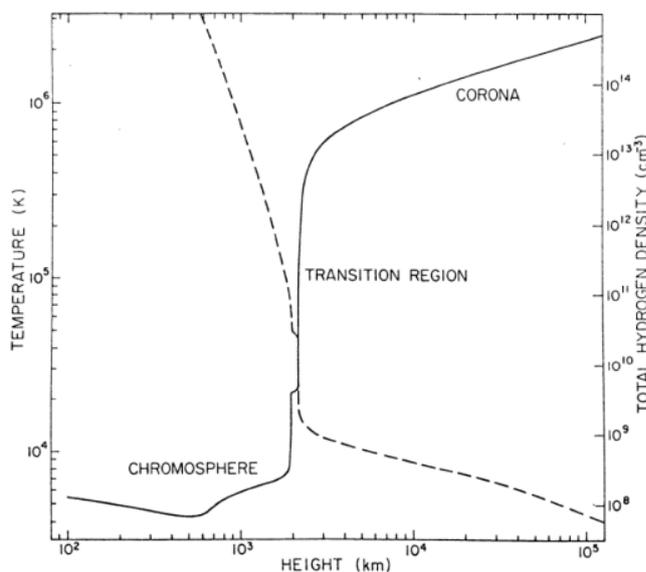


Fig. 10 Evolution de  $T$  et de la « densité »  $H$  en fonction de la hauteur (Noraz, 2022) (Whithbroe, 1981)

Il existerait plusieurs mécanismes en compétition pour expliquer ce chauffage, la dissipation par effet Joules des courants et des champs magnétiques présents, la dissipation de l’énergie par ondes turbulentes (ondes d’Alfvén) et la reconnexion magnétique coronale (Zhelyazkov and Ramesh, 2021). **Ce chauffage est une question ouverte.**

L’influence du champ magnétique sur le plasma est donnée par le rapport de la pression thermique (cinétique) du plasma et de la pression magnétique.

La chromosphère est une région de transition dans laquelle le paramètre  $\beta$  du plasma (Cf. annexe 5).

$$\beta = \frac{P_{\text{cinétique}}}{P_{\text{magnétique}}} < 1$$

La pression magnétique devient dominante, pour la photosphère c'était l'inverse.

### 2.2.2 La couronne

La couronne solaire est caractérisée par une température élevée, température qui monte à quelques millions de degrés en quelques centaines de kilomètres dans la zone de transition précédente, qui monte moins rapidement ensuite (Cf. Fig.10) pour atteindre un maximum vers  $10^5$  km et diminuer ensuite.

La « densité » continue de diminuer,  $n_e = 10^{14} \text{ m}^{-3}$  dans la basse couronne à la « densité » du vent solaire interplanétaire,  $10^7 \text{ m}^{-3}$ . L'hydrogène est sous forme de protons, les autres atomes sont fortement ionisés. La couronne varie énormément en fonction du temps, c'est-à-dire en fonction des cycles de l'activité solaire comme le montre la figure 11.

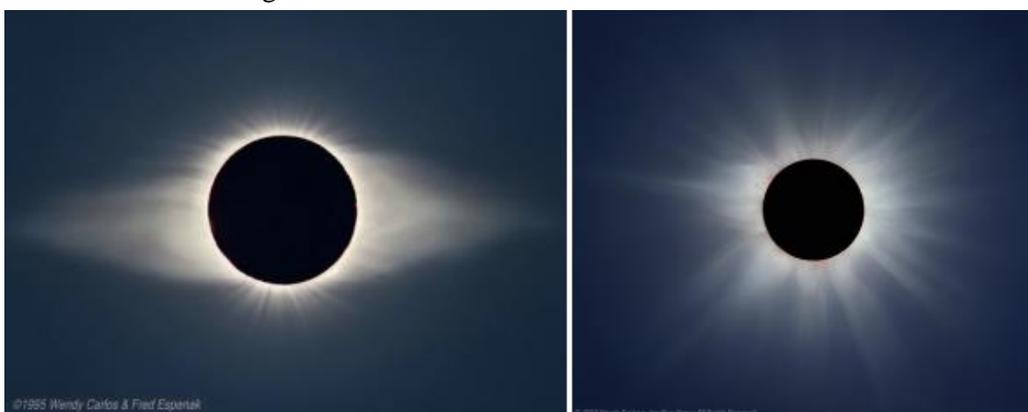


Fig. 11 Images de la couronne solaire obtenue lors d'éclipses totales. A gauche lors du minimum d'activité en 1995 ; A droite lors du maximum d'activité en 2001 (B. Perri, 2019). Credits : [www.wendycarlos.com](http://www.wendycarlos.com)

C'est dans la couronne que nous trouvons des structures telles que les boucles magnétiques qui contiennent du plasma chaud. Elles peuvent durer de quelques secondes à quelques jours. Elles peuvent se transformer en éruptions solaires ou /et en Ejection de Masse Coronale (EMC). Il existe d'autres structures particulières, par exemple les trous coronaux.

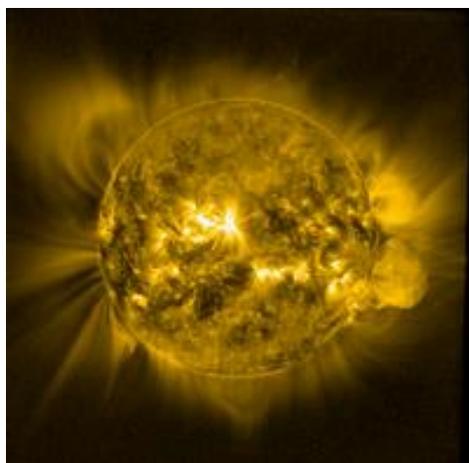


Fig.12 Exemple de structures diverses dans la couronne (Empilement d'images). Credits: Proba2/SWAP – EAS and Royal Observatory of Belgium

Vidéo de la couronne pendant une rotation Carrington issue de l'instrument SWAP du satellite Proba-2 (© Proba2/SWAP - ESA et Observatoire royal de Belgique).

[https://proba2.sidc.be/swap/data/mpg/movies/carrington\\_rotations/latest\\_cr\\_movie\\_yellow.mp4](https://proba2.sidc.be/swap/data/mpg/movies/carrington_rotations/latest_cr_movie_yellow.mp4)

### 2.2.3 En résumé

Le schéma ci-dessous (Fig. 13) fait état de la complexité des phénomènes physiques dans les couches basses de l'atmosphère solaire. Pour se convaincre de cette complexité, il suffit de suivre la couche représentée par la ligne pointillée rouge qui est la limite où  $\beta = 1$  (Cf. Annexe 5).

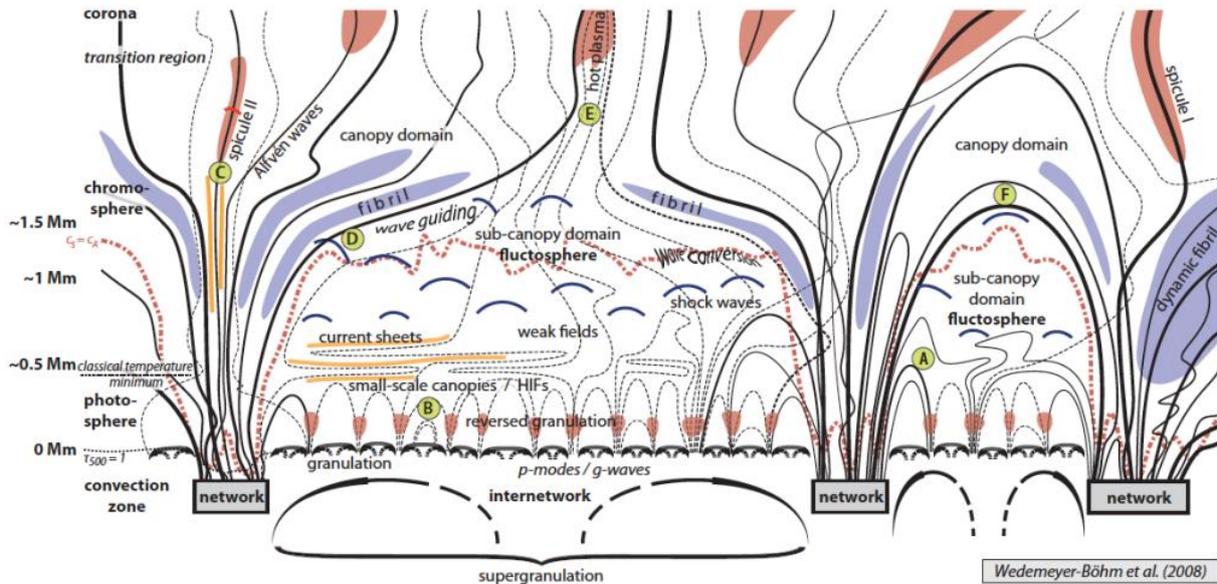


Fig. 13 Image globale de la basse atmosphère solaire, les lignes noires représentent les lignes de champ (Poirier, 2022) (Perri, 2019). (Wedemeyer-Böhm et al -2008)

Les différentes structures temporaires et leurs lieux d'émissions sont donnés dans la Fig.14.

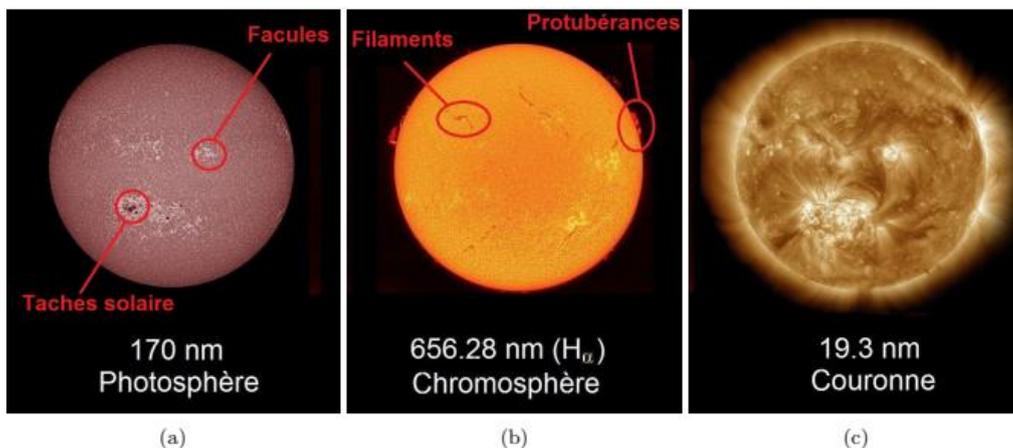


Fig.14 Observation du soleil à trois longueurs d'onde : (a) 170 nm raie de Fe IX/X, (b) 656,28 nm raie  $H_{\alpha}$  et (c) 19,3 nm raie Fe XII. Crédits : NASA

## 2.3 Les émissions solaires

Les émissions sont permanentes et/ou transitoires (éruptives) elles concernent tout le spectre du rayonnement électromagnétique (EOM) ainsi que l'émission de particules,  $H^+$ ,  $e^-$ , noyau He et ions divers. Elles évoluent en fonction de l'activité solaire.

### 2.3.1 Les émissions continues

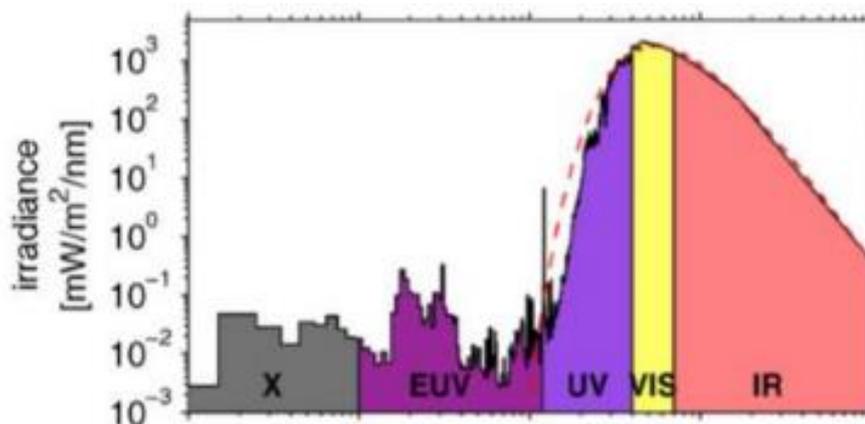
➤ *Le rayonnement électromagnétique continu*

Le plus important est dans le visible, le proche IR et UV, dans cette partie du spectre le soleil peut être assimilé à un corps noir (Cf. Fig. 15). L'énergie totale émise par seconde  $E_0$  est donnée par la loi de Stefan – Boltzmann :

$$E_0 = \sigma \cdot T^4$$

Où  $\sigma$  est la constante de Stefan ( $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ ) et T la température efficace.

Le soleil rayonne au total  $3,86 \cdot 10^{26} \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}$  (l'humanité consomme  $10^{21} \text{ J} \cdot \text{an}^{-1}$  soit  $3,2 \cdot 10^{13} \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}$ ). C'est le domaine prépondérant de l'énergie solaire reçue par la terre (Cf. § 3.9), soit un éclairage total dans cette partie du spectre au-dessus de l'atmosphère terrestre et pour une irradiation normale de  $1361 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \pm 0,2 \%$ . C'est la Constante Solaire ou Irradiance Solaire totale.



*Fig.15 Irradiance en fonction de la longueur d'onde, la courbe Planck (tiret rouge) correspond à la température effective solaire. (Jouandou, 2017) (Budok de Wit, Watermann, 2009)*

Notons qu'il existe aussi une émission micro-onde et radio du soleil calme.

➤ *Les flux de particules permanentes*

Il existe aussi des flux solaires de particules permanentes

- le vent solaire lent (Cf. §3).
- Le flux de neutrinos provenant des réactions nucléaires.

### 2.3.2 Les émissions transitoires

(Perri, 2019b),(Bernoux, 2022), (Pariat, 2019a)

Elles correspondent à un violent transport d'énergie, sous forme de rayonnements électromagnétiques ou/et particulaires. L'énergie libérée pouvant atteindre jusqu'à  $10^{26}$  J. Les taches solaires sont le siège principal des phénomènes actifs de par la présence de champs magnétiques intenses ( $> 0,1$  T).

Ces phénomènes sont potentiellement géo-effectifs<sup>8</sup>. Nous distinguons parmi les phénomènes transitoires les plus importants : les éruptions solaires, les événements solaires à particules et les éjections de masse coronale.

Le vent solaire rapide peut être aussi considéré comme une émission transitoire car son lieu d'émission, les trous coronaux, changent constamment, mais lentement (Cf. §3).

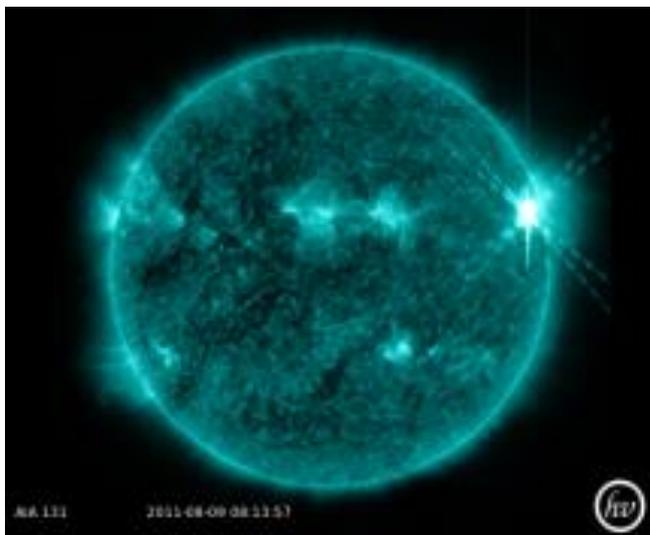
#### ➤ Les Eruptions Solaires<sup>9</sup>

Une éruption solaire (ou embrillancement) correspond à une augmentation brusque de la luminosité à la surface du soleil accompagnée d'émission de rayonnements électromagnétiques dans un large spectre, radio, micro-onde, IR, Visible, UV, EUV, X et  $\gamma$  (Cf. Fig.15). Elles peuvent être suivies d'éjection de particules, Cf. § suivants. Leurs durées vont de plusieurs minutes à quelques heures.

Elles se présentent en trois phases, de quelques secondes à plusieurs heures :

- Phase précurseur, émission de rayon X,
- Phase impulsive où la luminosité s'accroît,
- Phase de déclin, émission de rayon X mou

Elles surviennent le plus souvent dans des régions actives en présence de tâches. L'énergie libérée est importante :  $10^{17}$  à  $10^{25}$  J (Bernoux, 2022). Les phénomènes à l'origine seraient la reconnexion magnétique et la réorganisation du champ magnétique local, les lignes de champ s'emmêlent et explosent. Au maximum d'activité solaire, elles peuvent survenir plusieurs fois par jour, au minimum d'activité, moins d'une fois par semaine. C'est une **question ouverte**.



*Fig. 16 Image du soleil à la longueur d'onde de 13,1 nm prise le 9/8/2011 dans laquelle une éruption est visible.*

*Crédits : SDO (NASA). Image générée via Heliowiewer.*

<sup>8</sup> La géo-effectivité définit la capacité d'un événement solaire à perturber l'environnement terrestre tel que par exemple la brusque variation du champ magnétique terrestre (Orage magnétique).

<sup>9</sup> En anglais, Solar Flares

➤ *Les évènements à Particules Solaires Energétiques (PSE)<sup>10</sup>*

Les éruptions solaires précédentes, comme les Ejections de Masse Coronale ci-après peuvent provoquer, pour les plus intenses, un échauffement du plasma jusqu'à plusieurs dizaines de millions de Kelvin et donc une accélération des particules environnantes ( $e^-$ ,  $p^+$ , ions) jusqu'à des vitesses relativistes. A ces vitesses, les protons peuvent parcourir les  $150.10^6$  km qui séparent la terre du soleil en moins d'une dizaine de minutes.

Les particules éjectées sont des électrons, des protons et des ions très ionisés, avec des énergies de quelques dizaines de keV à plusieurs GeV. Elles vont créer des évènements en cascade lors de leurs entrées dans l'atmosphère terrestre.

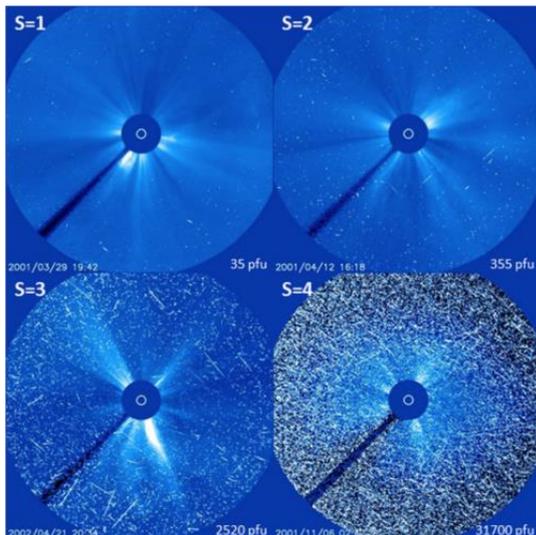


Fig. 17 Illustration de la classification des évènements solaires à particules à partir du coronographe LASCO/C3 de SOHO.

Commentaires de la figure 17: Plus le nombre S est grand, plus le flux de particules énergisées est important, ce qui se traduit par des points et traits blancs de plus en plus nombreux sur l'image et qui correspondent à l'impact de protons sur le détecteur CCD. Pour des évènements extrêmes ( $S > 4$ ), le détecteur est saturé. Crédits : Observatoire Royal de Belgique.

➤ *Les Ejections de Masse Coronales (EMC)<sup>11</sup>*

Elles sont en général issues de protubérances (filaments). Ces protubérances sont des structures magnétisées situées dans la couronne, dont les caractéristiques sont : hauteur jusqu'à  $10^5$  km, longueur  $> 10^6$  km, température inférieure à la température de la couronne et densité cent fois supérieure à la couronne (Malherbe, 2008). Elles sont en équilibre, soutenues par deux forces opposées (si l'on exclut la pression gazeuse) :

- La force de Laplace  $f = j \wedge B$  (par unité de volume,  $j$  est la densité de courant électrique et  $B$  le champ magnétique).
- La force de gravité  $f = \rho . g$  ( $\rho$  la masse volumique et  $g$  l'accélération de la pesanteur,  $275 \text{ m.s}^{-2}$ ).

Elles peuvent s'effondrer ou s'échapper (Cf. Fig. 18 et 19), dans ce cas elles constituent une EMC. Si elles sont dirigées en direction de la terre, elles peuvent provoquer en interagissant avec le champ magnétique terrestre des orages magnétiques majeurs.

<sup>10</sup> En anglais, SEP : Solar Energetic Particle

<sup>11</sup> En anglais, CME : Coronal Mass Ejection

Elles sont bien corrélées au cycle solaire. Elles sont à l'origine de nombreuses émissions dans tous les domaines électromagnétiques et des particules associées (ions, protons et  $e^-$ ) sont éjectées par phénomène de reconnexion (Cf. Fig. 19 et 20) avec des énergies de 100 eV à 1 GeV.

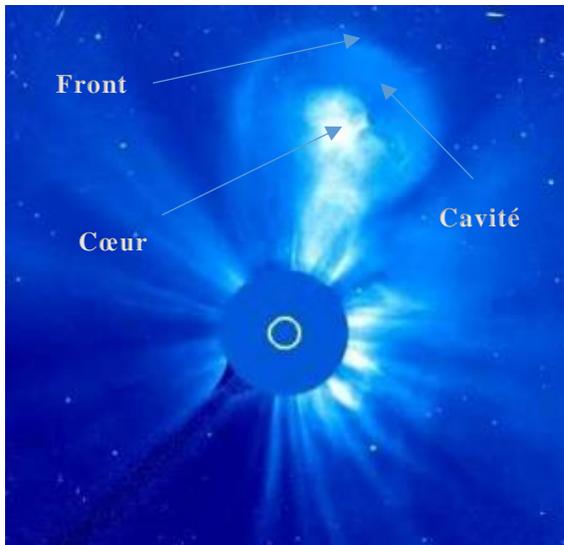


Fig. 18 Ejection de masse coronale vue par le coronographe C3 de SOHO en lumière blanche. SOHO/LASCO-C3 ESA/NASA

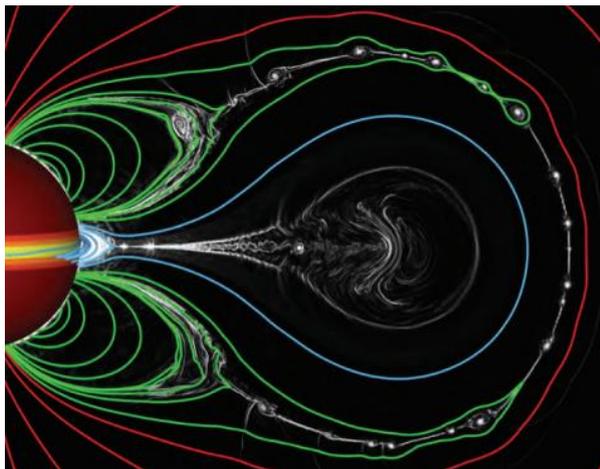


Fig.19

La figure 19 est une simulation numérique ultra haute résolution d'une éjection de masse coronale initiée par une reconnexion et d'une éruption solaire. Credits: J.T. Karpen, S.K. Antiochos, and C.R. DeVore.

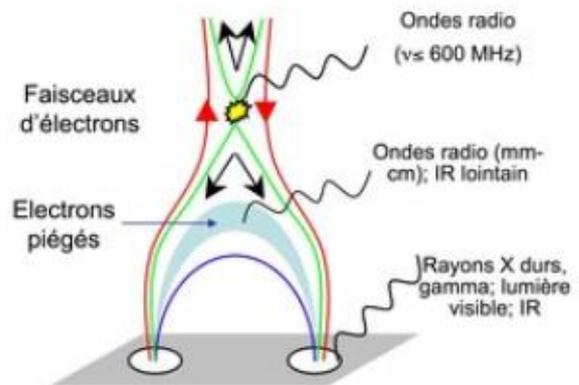


Fig.20

La figure 20 est le schéma d'une configuration magnétique éruptive<sup>12</sup> Les courbes en bleu, vert et rouge sont des lignes de champ, ancrés dans deux zones de polarités opposées dans la photosphère. La surface bleue claire indique la région de piégeage de particules énergétiques, la zone jaune est la reconnexion magnétique. Les ondes noires sont les émissions électromagnétiques diverses.

<sup>12</sup> Reconnexion magnétique, accélération et transport des particules : <https://lesia.obspm.fr/Reconnexion-magnetique.93.html?artpage=2-2>

➤ *En résumé pour les émissions transitoires*

Le diagramme de la figure 21 donne la fréquence des trois types d'évènements transitoires majeurs pour le cycle 23 (Odenwald, 2009).

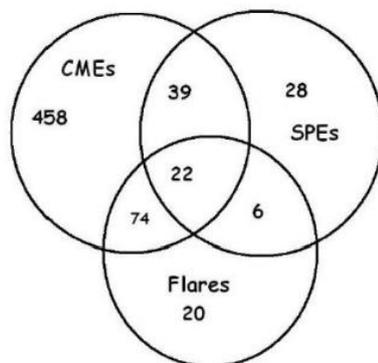


Fig. 21 Diagramme de Venn simple montrant la fréquence des EMC type « Halo » (CMEs), des Eruptions Solaires (Flares) de classe X et des événements de PSE (SPEs - protons) pendant le Cycle 23.

Dans le cycle 23, il y a eu un total de 593 EMC dirigés vers la Terre (type « Halo »), 95 événements de PSE (protons solaires) et 122 Eruptions Solaires de classe X. D'après les statistiques d'intersection de la figure 21, la grande majorité des EMC ne donnent pas lieu à des PSE, ou ne sont pas associées à des événements de type Eruption Solaire de classe X (Cf. § 5.1.3). Cependant, il est également vrai que la majorité des Eruptions Solaires de classe X sont associées à des EMC, et que la majorité des PSE sont également associés à des EMC.

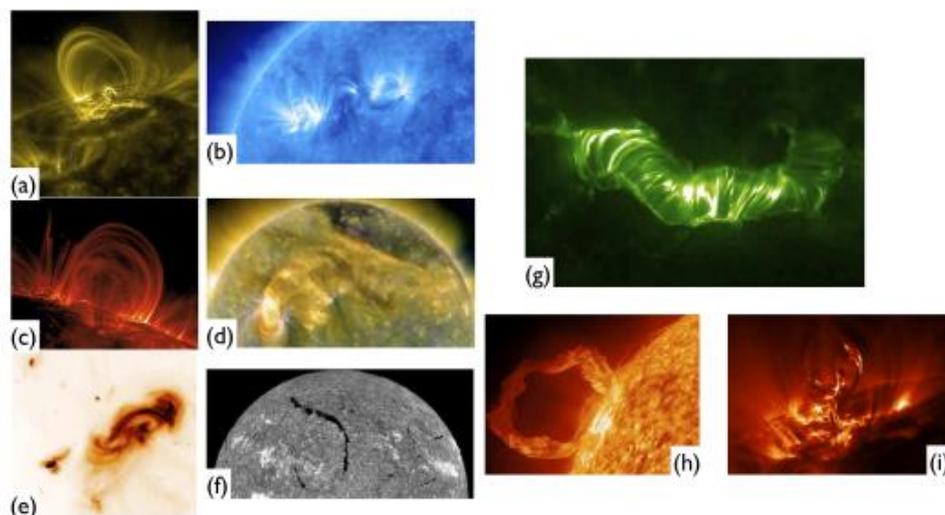
Il est à noter que les causes des différents phénomènes, Eruptions solaires (Flares), Évènement à Particules Solaires Énergétiques (SPEs) et Ejection de Masse Coronale (EMCs) sont toujours débattues et constituent des **questions ouvertes**.

Ce que l'on sait, c'est surtout que la configuration magnétique du soleil et plus particulièrement de l'atmosphère solaire, détermine la façon dont se manifeste l'activité éruptive du soleil. De la table 4 nous constatons que des différents réservoirs d'énergie disponible pour les événements éruptifs, la source magnétique est la plus importante (Pariat, 2019).

| Sources d'énergie | Expression          | Valeurs caractéristiques   | Densité d'énergie<br>(J.m <sup>-3</sup> ) |
|-------------------|---------------------|--|---|
| Cinétique         | $n_0 m_p v_0^2 / 2$ | $n_0 = 10^{15} \text{ m}^{-3}$ ; $v_0 \approx 1000 \text{ m.s}^{-1}$ | $8 \cdot 10^{-4}$                         |
| Thermique         | $n_0 k_B T_0$       | $T_0 = 10^6 \text{ K}$   | $10^{-2}$                                 |
| Gravitationnelle  | $n_0 m_p g h$       | $g = 275 \text{ m.s}^{-2}$ ; $h = 10^8 \text{ m}$                    | $5 \cdot 10^{-2}$                         |
| Magnétique        | $B_0^2 / 8\pi$      | $B_0 = 100 \text{ G}$  | 40  |

Tab. 4 Type et valeurs caractéristiques des réservoirs d'énergie présents dans la couronne (adapté de Forbes, 2000).

La figure 22 donne des images des différents phénomènes transitoires (Pariat, 2019).



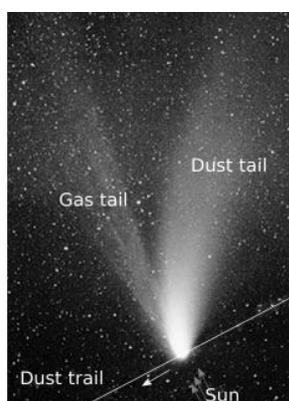
*Fig. 22 Observations de divers phénomènes transitoires dans l'atmosphère du soleil (Pariat, 2019)*

Légende : (a) Observation par TRACE de boucles coronales au-dessus de régions actives. (b) Observations par STEREO de boucles coronales au-dessus de deux régions actives. (d) Observations par SDO/AIA de boucles coronales et d'un trou coronal polaire. (e) Observation par Hinode/XTR, dans la couronne, d'une région active en rayons X mous. (f) Observations par BBSO en  $H_{\alpha}$  et présence d'un long filament sombre. (g) Embrillancement observé par TRACE. (h) Eruption observée par SDO/AIA. (i) Eruption observée par TRACE.

### 3 Le vent solaire

#### 3.1 Origine

(Lion, 2017) (Robert, 2023) (Lesia obspm, 2012) (Zouganelis, 2005) (Griton, 2018) (Benacquista, 2017), Le concept de vent solaire continu a été développé dans les années 1950. Biermann (1951, 1957) a observé les queues des comètes lorsqu'elles passaient près du Soleil, et a expliqué la déviation observée de la queue par un flux continu de protons en provenance du Soleil. Ensuite, Parker (1959) a montré que la couronne solaire devait se dilater (Cf. Annexe 6) et a appelé le gaz coronal qui s'écoule vers l'extérieur "vent solaire".



*Fig. 23 Représentation historique du vent solaire. Vue d'artiste représentant les deux queues d'une comète, avec la queue de gaz toujours opposée à la direction du soleil (B. Perri, 2019). Crédits : NASA.*

Le vent solaire devient supersonique au-delà de quelques rayons solaires. Sur Mercure, le nombre de Mach du vent solaire est d'environ 3, tandis que sur les planètes extérieures, le nombre de Mach peut atteindre 8 et plus.

Le vent solaire en expansion entraîne également le champ magnétique solaire vers l'extérieur, formant ce que l'on appelle le champ magnétique interplanétaire (CMI). La densité, la température ou la vitesse changent à la fois au cours du temps, créant des zones de raréfaction, des chocs, mais aussi en fonction de la longitude, annulant la symétrie sphérique initiale. Le vent solaire se propage bien au-delà de Pluton et forme une sorte de bulle dans le milieu interstellaire tout autour du Soleil, l'héliosphère.

Le vent solaire est un plasma de particules chargées faiblement collisionnel<sup>13</sup> et électriquement très conducteur. Il est composé principalement d'électrons, de protons, de noyaux d'hélium (particule  $\alpha$ ) et en moindre proportion d'ions lourds (O, N, C, Fe, Mg...), Les protons constituent la majorité de la masse. Il a la même composition que la couronne ; Le soleil émet en permanence approximativement  $10^9 \text{ kg s}^{-1}$  de matière dans le milieu interplanétaire.

Il emporte avec lui les lignes de champ magnétique solaire, on dit que les lignes de champ sont « gelées dans le plasma ».

La région la plus extérieure du Soleil, la couronne, est très chaude, l'hydrogène et l'hélium peuvent échapper à l'attraction gravitationnelle et former un flux de matière qui s'écoule régulièrement vers l'extérieur

Ses particules s'échappent de l'attraction gravitationnelle du soleil du fait de la haute température de la couronne. Dit autrement « le vent est créé par l'évaporation de l'atmosphère (ou couronne) solaire, trop chaude pour être confinée par la gravité solaire »

L'éjection de matière est continue. Le vent solaire souffle jusqu'à des distances  $> 100 \text{ UA}$ , il constitue l'héliosphère.

Il transporte une grande quantité d'énergie cinétique et électrique. Une partie de cette énergie pénètre dans notre magnétosphère et crée une activité géomagnétique : Des orages (ou sous-orages) magnétiques et des aurores.

### 3.2 Vent lent, vent rapide

(Benacquista, 2017) (Robert, 2023) (Le Chat and Issautier, 2015)

Il existe deux types de vent qui ont des caractéristiques et des lieux d'émission différents. Le tableau 5 synthétise les propriétés de ces deux types de vent mesuré à 1 UA.

---

<sup>13</sup> Un plasma non collisionnel est un plasma où les collisions sont si rares qu'elles peuvent être négligées. Le libre parcours moyen est très grand. Exemple, dans le vent solaire ou dans les magnétosphères planétaires, le libre parcours moyen entre deux collisions d'un ion ou d'un électron est de l'ordre du million ou de la dizaine de millions de km.

« Les mécanismes de dissipation d'énergie et/ou d'accélération se font via des interactions ondes-particules complexes plutôt que par des effets collisionnels » (Philippe Savoini)

|                                       | Vent lent   | Vent rapide   |
|---------------------------------------|---|---|
| Vitesse                               | 250 – 400 km s <sup>-1</sup>                            | 400 – 800 km s <sup>-1</sup>                            |
| « Densité » de p <sup>+</sup>         | 10,7.10 <sup>6</sup> m <sup>-3</sup>                    | 3.10 <sup>6</sup> m <sup>-3</sup>                       |
| « Densité » de flux de p <sup>+</sup> | 3,7.10 <sup>12</sup> m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>    | 2.10 <sup>12</sup> m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>      |
| Température de p <sup>+</sup>         | 3,4.10 <sup>4</sup> K                                   | 2,3.10 <sup>5</sup> K                                   |
| Température d'e <sup>-</sup>          | 1,3.10 <sup>5</sup> K                                   | 10 <sup>5</sup> K                                       |
| « Densité » de quantité de mouvement  | 2,12.10 <sup>2</sup> N m <sup>-2</sup>                  | 2,26.10 <sup>2</sup> N m <sup>-2</sup>                  |
| « Densité » de flux en énergie totale | 1,55.10 <sup>-3</sup> J m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> | 1,43.10 <sup>-3</sup> J m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> |
| Abondance d'Hélium                    | 2,5 % variable  | 3,6 % Constant  |
| Source                                | « Streamer belt »                                       | Trou coronal  |

Tab.5 Synthèse des caractéristiques du plasma des deux types de vent solaires  
(Benacquista, 2017)

Il en existerait un troisième type, le vent solaire issu des événements éruptifs tels que les EMC qui peuvent atteindre 3000 km s<sup>-1</sup> (Cf. § 2.3.2) (Robert, 2023).

Le vent lent est émis de régions de la couronne appelées « helmet streamer » ou « lames neutres ». Ce sont des boucles fermées très allongées, reliant deux régions de polarité opposée sur le soleil (Le Chat, 2010).

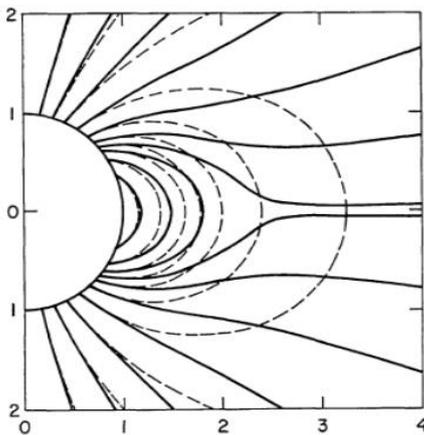


Fig. 24

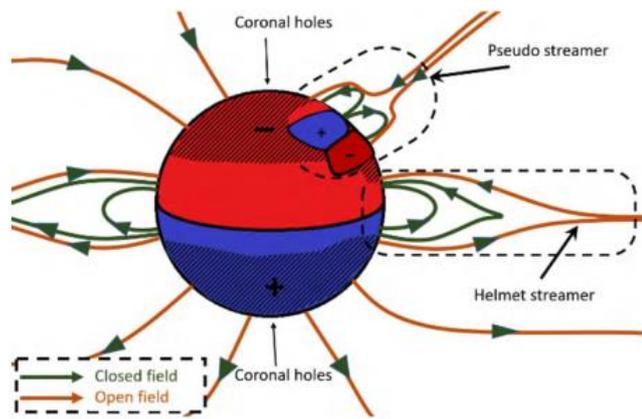


Fig. 25

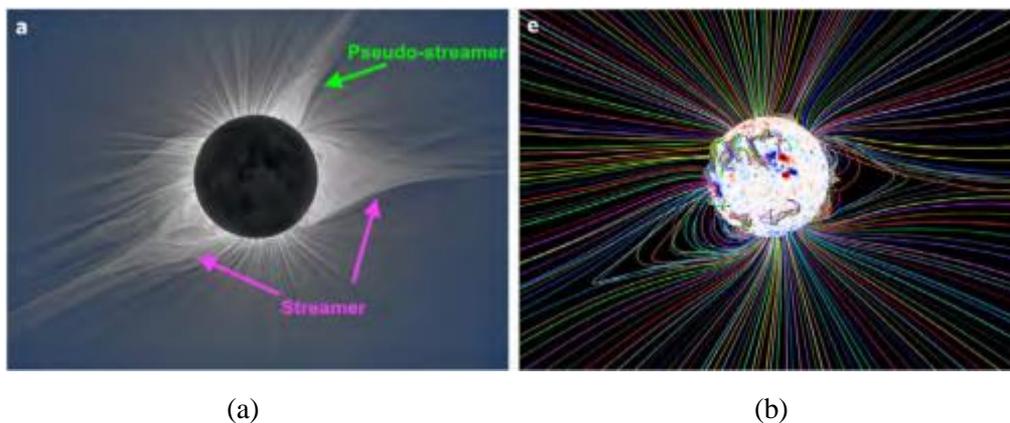


Fig. 26

La figure 24 est une vue schématique de la perturbation du champ magnétique solaire par le vent solaire. Les lignes pointillées représentent le champ dipolaire non perturbées, les lignes continues, le champ magnétique avec l'interaction du vent solaire. L'abscisse et l'ordonnée sont en rayons solaires (Le Chat, 2010).

La figure 25 est le schéma de la structure du champ magnétique coronal qui image les « Helmet streamer » et les « pseudo-streamer » (Poirier, 2022) (Pellegrin et al, 2021).

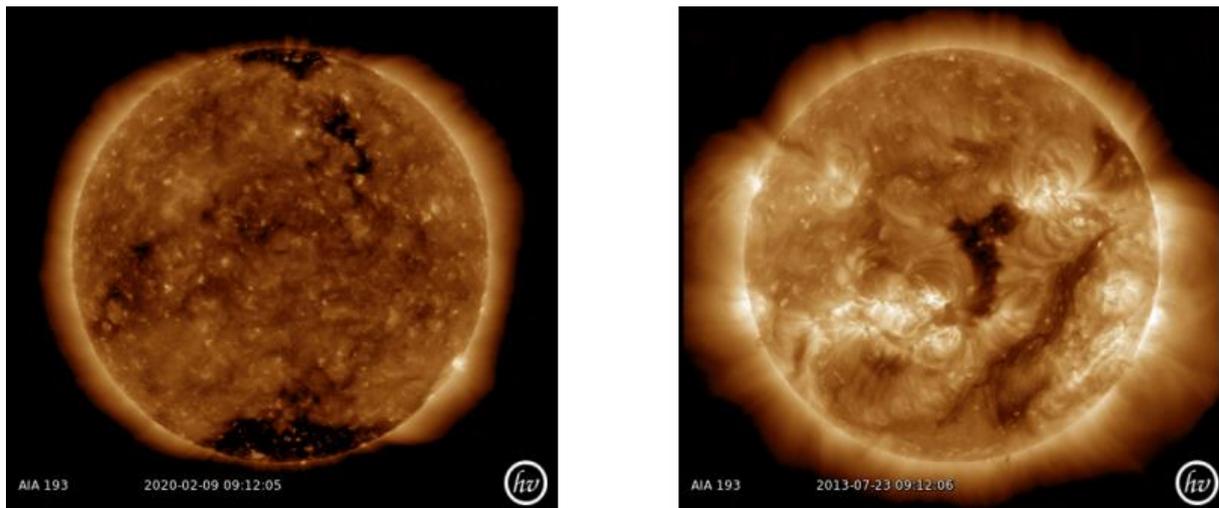
La figure 26 est la comparaison entre une image réelle de la couronne (gauche) prise lors de l'éclipse solaire totale d'août 2017, et une reconstruction associée (droite). (Poirier, 2022). (a) Miloslav Druckmiller, Peter Aniol, Shadia Habbal (2017). (b) Miki et al (2018).

Le vent rapide est issu des trous coronaux qui sont les régions de la couronne de plus faible densité et température en raison de la perte de matière. Ils apparaissent comme des surfaces sombres. Les lignes de champ partant de ces trous coronaux sont ouvertes. Les particules sont accélérées le long de ces lignes de champ. Plusieurs types de trous coronaux existent :

- Les trous coronaux situés aux pôles, ils sont bien visibles au minimum solaire, et plus atténués au maximum solaire.
- Les trous coronaux de moyennes latitudes, de plus petites surfaces que les précédents, ils sont observables au cours de la phase ascendante et du maximum. Ils peuvent migrer vers l'équateur au cours de la phase descendante.

#### Ce sont des questions ouvertes

Les trous coronaux polaires peuvent être présents pendant plusieurs mois et les trous de moyennes latitudes disparaître et réapparaître après une rotation de Carrington (une rotation du soleil de 27 jours).



*Fig. 27 Image du soleil avec des trous coronaux. A gauche, deux trous coronaux polaires, à droite, deux trous coronaux de faibles latitudes (Bernoux, 2022). Crédits : SDO (NASA), images générés via Helioviewer.*

### 3.3 Variations de la vitesse du vent solaire en fonction de l'activité solaire

Les vitesses de vents lents et rapides et leur lieux d'émission changent avec l'activité solaire comme le montre le diagramme de la figure 28.

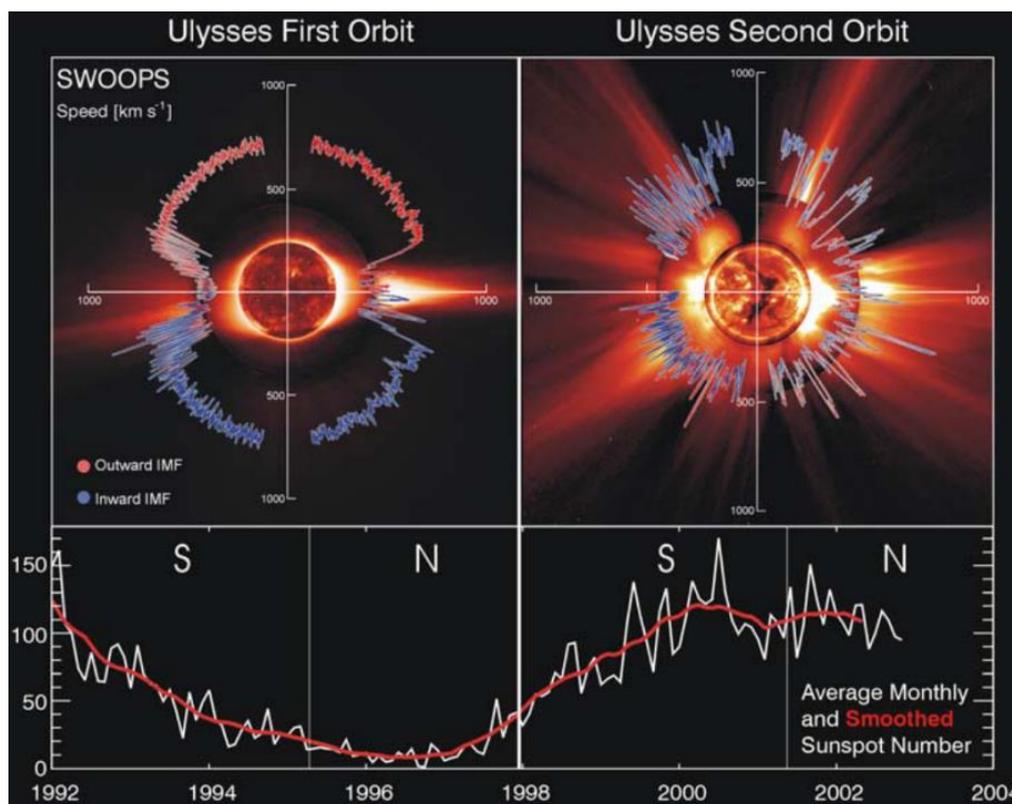


Fig. 28 Diagrammes angulaires de la vitesse du vent solaire en fonction de la latitude solaire

Commentaires de la figure 28 : Le nombre de taches solaires est indiqué sur le panneau inférieur en fonction du temps. Sur le panneau supérieur, les vitesses lors d'un minimum d'activité solaire (à gauche, 17/08/96), ainsi que lors d'un maximum, (à droite, 12/07/00). Nous notons les grandes perturbations dans la distribution des vitesses lors d'un maximum solaire. En bleu, le champ magnétique est vers l'intérieur, en rouge, le champ magnétique est vers l'extérieur. Sources : Ulysses, imageur UV de SOHO, coronographe spectrométrique SOHO C2. Crédits : McComas et al. (2003).

### 3.4 Spirales de Parker

(Le Chat, 2010) (Lilensten and Blelly, 1999) (Benacquista, 2017)

Bien que le vent solaire s'éloigne presque radialement du Soleil, la rotation du Soleil donne au champ magnétique une forme de spirale (Cf. Fig. 29). Sur l'orbite de la Terre, l'angle entre les lignes de champ et la radiale est d'environ  $45^\circ$ . Cet angle varie en fonction de la vitesse du vent solaire (Cf. Fig. 31). Le vent solaire qu'il soit lent ou rapide, se propage dans le milieu interplanétaire. Le plasma est éjecté radialement de la surface du soleil mais la rotation du soleil va l'obliger à décrire une spirale (spirales de Parker ou spirales d'Archimède).

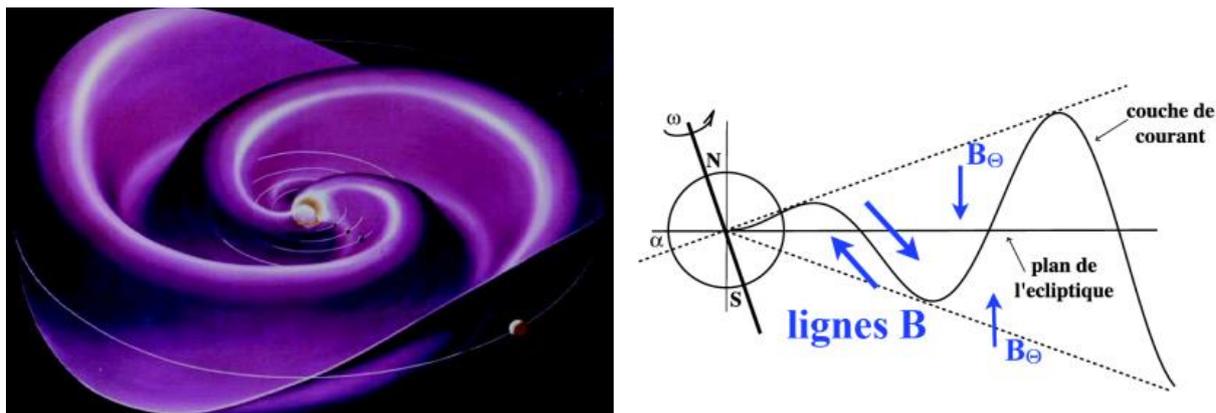


Fig. 29 Spirale de Parker, à gauche : vue d'Artiste du modèle de la ballerine pour le champ magnétique interplanétaire. A droite, vue schématique en 2 dimensions de la couche de courant (lame neutre) dans le cadre de la ballerine (Le Chat, 2010)

L'inclinaison de l'équateur solaire sur l'écliptique donne à cette spirale une structure ondulée. Cette structure sépare deux régions où le champ magnétique interplanétaire est opposé. Lors de son trajet sur son orbite, la Terre peut couper la lame neutre plusieurs fois et donc voir le champ magnétique héliosphérique s'inverser (Cf. Fig. 30). Phénomène qui a une grande importance vis-à-vis de la reconnexion magnétosphérique (Cf. annexe 12).

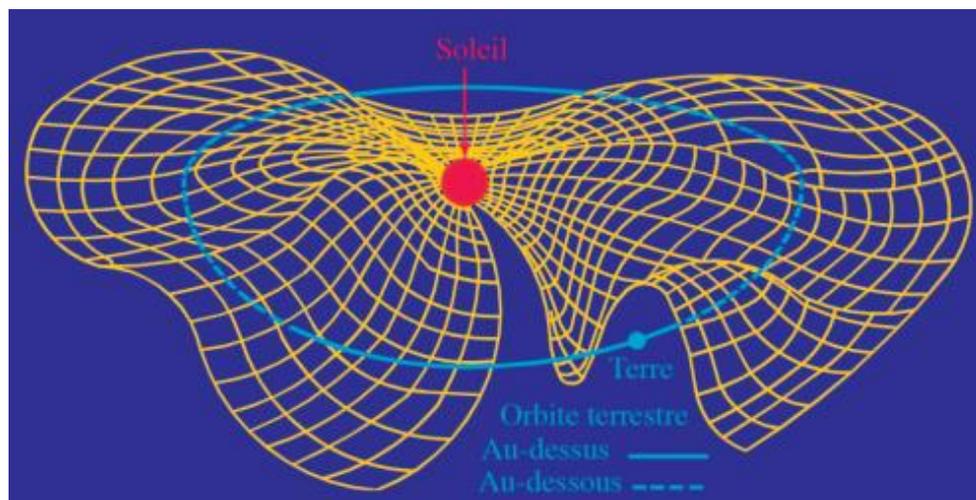


Fig. 30 Lignes de force du champ magnétique solaire : la robe de ballerine (Lilensten and Bletly, 1999).

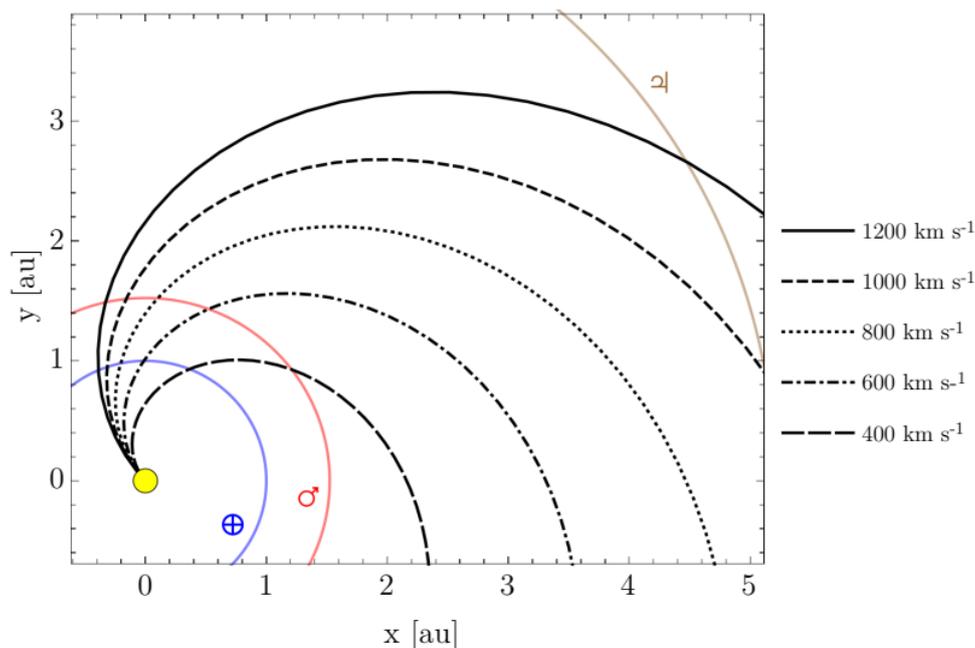


Fig. 31 représentation schématique de la propagation du vent solaire dans l'héliosphère suivant la spirale de Parker. Plusieurs trajectoires sont tracées en fonction de la vitesse du vent solaire. L'orbite bleue correspond à celle de la terre (Bernoux, 2022). Credits : Lhotka et Narita 2019.

### 3.5 Interactions entre le vent lent et le vent rapide

Lorsqu'un trou coronal se situe à faible latitude, le vent rapide qui en est issu va rattraper le vent lent et former une région d'interaction, la CIR (Co-rotating Interaction Region) ou SIR (Stream Interaction Region). Les lignes de champ « gelées » dans le plasma, ne pouvant se croiser il en résultera une région de compression à la fois du plasma et du champ magnétique Cf. Fig. 32 (Benacquista, 2017).

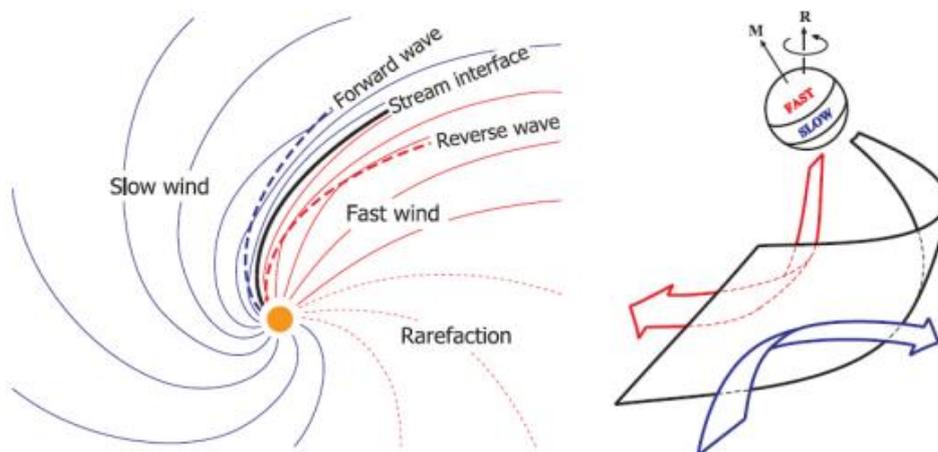


Fig. 32 Schéma des régions d'interaction en co-rotation (CIR) entre vent rapide et vent lent (Perri, 2019). Crédits : Owens & Forsyth

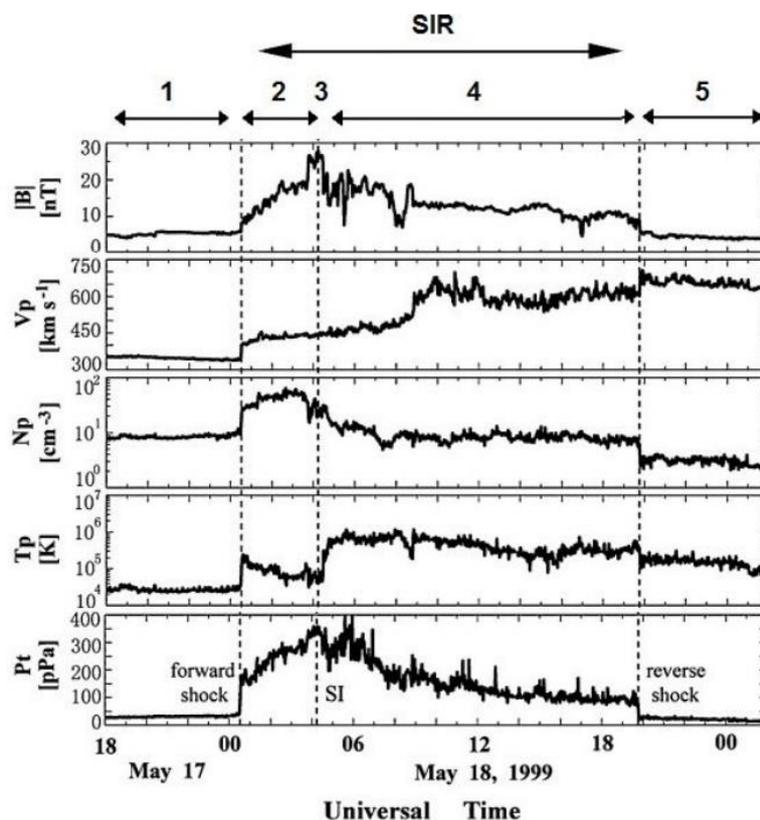


Fig. 33 Exemple de variations des paramètres du vent solaire au passage d'une CIR (SIR) (Benacquista, 2017). Crédits : Jian et al (2006)

Commentaires de la figure 33, on observe les séquences suivantes : (1) Vent lent non perturbé, (2) Vent lent perturbé, augmentation plus ou moins progressive des caractéristiques vitesse, pression et densité, (3) SI (Stream Interface), elle correspond au maximum de compression du vent solaire, (4) Vent rapide perturbé, (5) HSS (High Speed Stream), zone de raréfaction et vent lent. La CIR (SIR) concerne les zones 2, 3 et 4.

### 3.6 Les ajouts au vent solaire

(Mottez, 2017) (Benacquista, 2017) (B. Perri, 2019)

Ce sont, les EMC, les Particules Solaires Energétiques (PSE), les nano-particules, le rayonnement particulaire énergétique galactique (GCR).

Le vent solaire n'a pas seulement des régimes lents, rapides et mixtes, il subit des « tempêtes » lorsque des EMC sont associées. Le passage d'une EMC perturbe le champ magnétique interplanétaire. On estime que la terre subit un vent solaire chargé d'EMC 10% du temps durant la phase de minimum du cycle solaire et 35 % du temps pendant le maximum. Ils sont à l'origine des orages magnétiques.

Le vent solaire peut être accompagné de bouffées de particules de très haute énergie (PSE) (> 100 MeV contre 100 eV pour un vent normal).

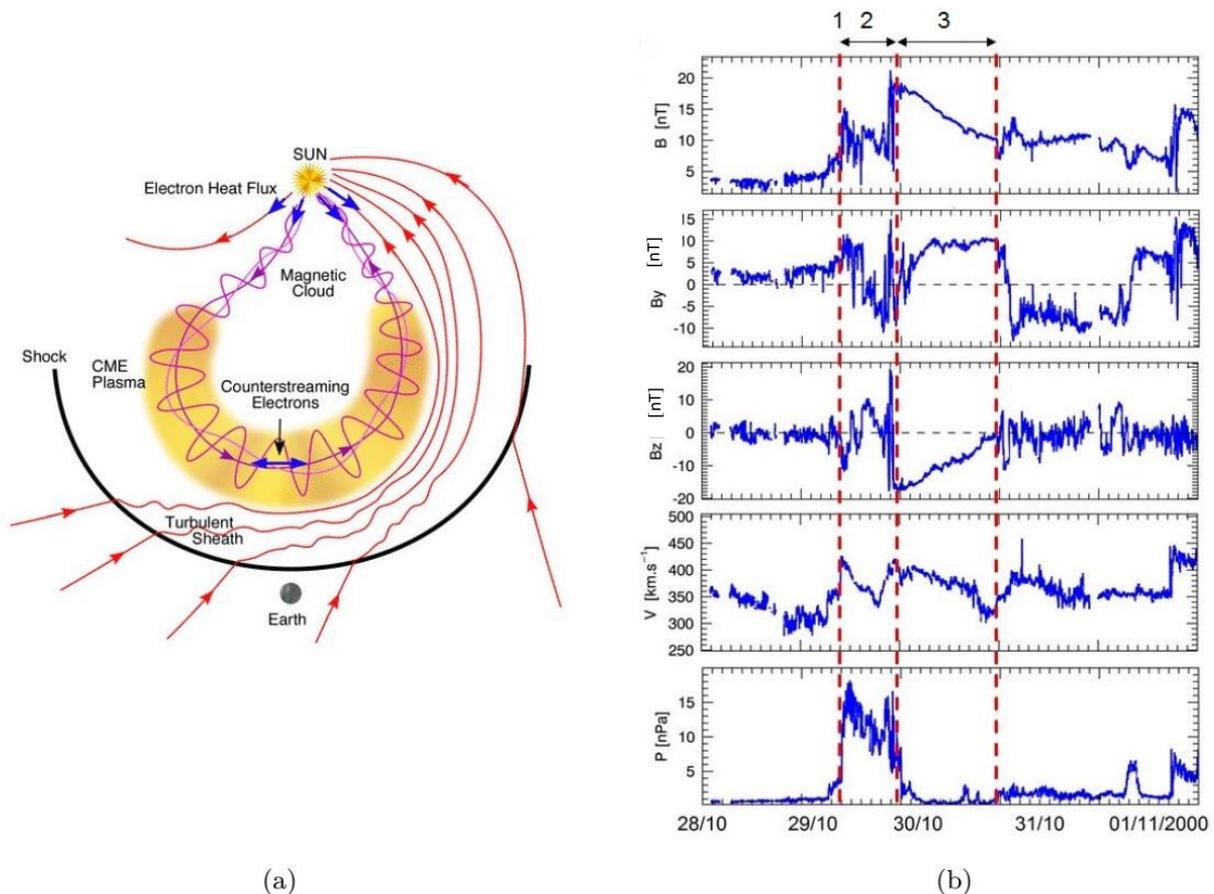
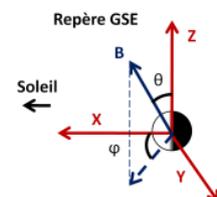


Fig. 34 (a) Schéma représentant un nuage magnétique causé par une éjection de masse coronale (EMC) depuis le soleil. On indique également les particules énergétiques solaires et la structure en « tire-bouchon » (en violet) du champ magnétique dans le nuage et en rouge celle de la spirale de Parker. (b) Variations des paramètres du vent solaire au passage d'une EMC, à partir de 1, les régions 2 et 3 (Benacquista, 2017) (Perri and Brun, 2024) (adapté de la Nasa)

Il est à noter que le vent solaire et le champ magnétique solaire lié sont aussi en interaction avec les particules de poussière (nanoparticules) composant le milieu interplanétaire. Leur flux massique à 1UA est équivalent à celui du vent solaire. Comme elles se déplacent à grande vitesse, elles sont détectées par émission radio (Le Chat and Issautier, 2015) .

Par ailleurs, le vent solaire va moduler le flux de rayonnement particulaire énergétique galactique (GCR) (Cf. Fig.37). Le flux de rayonnement galactique sur terre sera plus faible lors des maximums d'activité solaire. Ces rayonnements galactiques par une cascade d'interactions physico-chimiques avec les molécules et aérosols présents dans l'atmosphère, peuvent agir sur la nébulosité (Lilensten et al., 2015), dans quelle mesure ? **C'est une question ouverte.**

Nota important : Les données des graphiques et tableaux sont indicées dans le référentiel GSE (Geocentric Solar Ecliptic), centré sur la terre.



### 3.7 La circulation jusqu'à la terre

(Mottez, 2017)

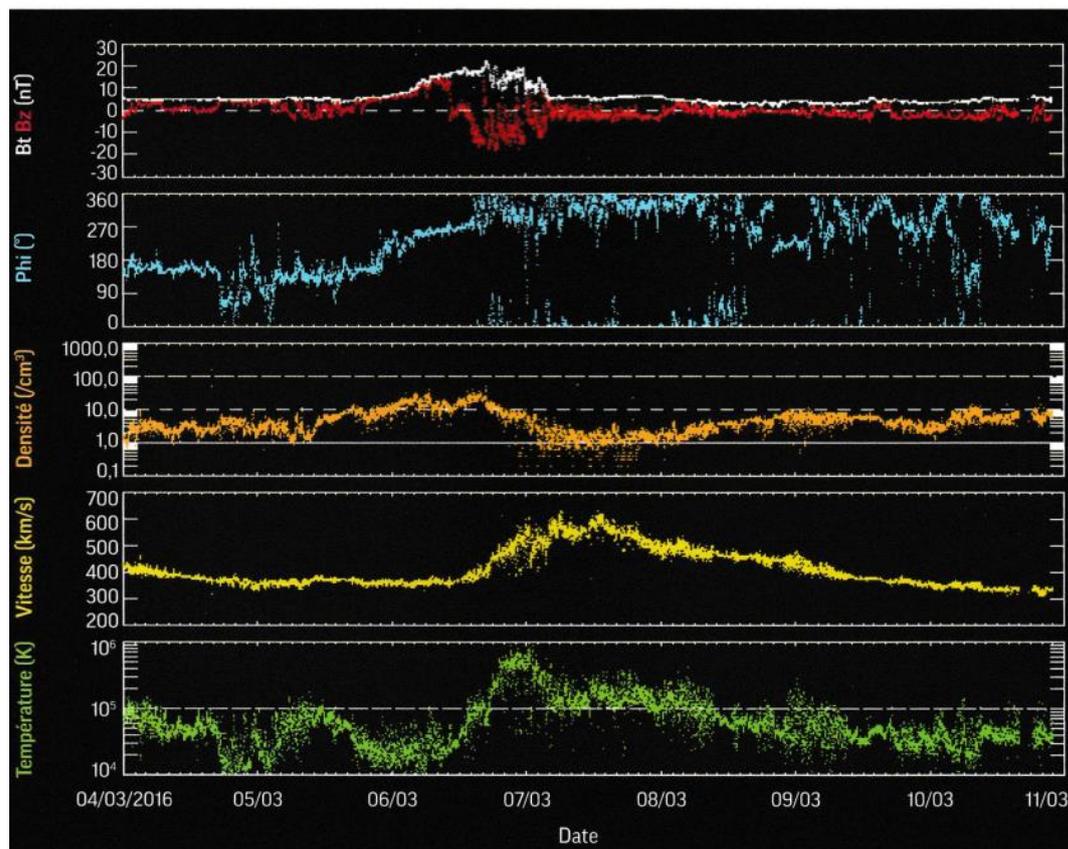


Fig.36 Caractéristiques du vent solaire pendant 1 semaine à 1UA

La Fig.36 donne les variations des principales caractéristiques du vent solaire sur une semaine à 1UA. Les relevés proviennent du satellite ACE. De haut en bas :

- Champ magnétique, en rouge composante sud-nord ( $B_z$ ), en blanc module ( $B_t$ ), en nT.
- Angle lié à l'orientation du champ suivant l'axe Est-Ouest, en °d'angle
- Densité du vent en nombre de particules. $\text{cm}^{-3}$ .
- Vitesse en  $\text{km.s}^{-1}$ .
- Température en K.

Nous constatons que le 6 mars un vent modéré de  $400 \text{ km.s}^{-1}$  est passé à un vent rapide de  $600 \text{ km.s}^{-1}$ , en même temps qu'il changeait son orientation et que sa température augmentait jusqu'à  $10^6 \text{ K}$ . Des aurores polaires brillantes pouvaient apparaître à moyenne latitude.

Le vent solaire est donc très dynamique et changeant, du fait des phénomènes vus précédemment : vents lent, rapide, CIR, EMC, orientation des éjections, orientation des spirales, activité solaire.

En moyenne, au niveau de l'orbite terrestre, le vent solaire a une vitesse super supersonique de  $\sim 400 \text{ km.s}^{-1}$ , une densité de  $\sim 5 \text{ protons.cm}^{-3}$  (idem pour les électrons), une température de  $\sim 2.10^5 \text{ K}$  et un champ magnétique très faible  $\sim 3\text{nT}$  ( $30 \mu\text{G}$ ) à comparer au champ géomagnétique terrestre de  $\sim 20 \mu\text{T}$  ( $0,2 \text{ G}$ ).

### 3.8 Bilan en masse

(Lilensten, 2019)

En moyenne, le vent solaire emporte  $10^{14}$  kg de matière par jour ( $3,6 \cdot 10^{16}$  kg.an<sup>-1</sup>), soit 4 fois moins que la masse convertie en rayonnement par les réactions de fusion. Par rapport au  $2 \cdot 10^{30}$  Kg de la masse solaire et compte tenu de l'espérance de vie solaire c'est totalement négligeable. Petite évaluation proportionnelle aux surfaces, sphérique et surfacique, la terre recevrait  $\sim 4,5 \cdot 10^4$  kg j<sup>-1</sup>.

### 3.9 Bilan en énergie au niveau de la terre

(J. Lilensten, Th. Dudok de Wit, K. Matthes, n.d.) (Lilensten et al., 2015)

En terme de bilan énergétique dans la haute atmosphère terrestre : l'irradiation solaire est avant tout des rayonnements électromagnétiques (dans le visible, proche Ir et proche UV) avec très peu de variations, les autres composantes (X, EUV, particules diverses) sont très faibles (Cf. Fig.37) mais extrêmement variables (variation de 1 à 100) et très dépendantes de l'activité solaire. Néanmoins elles jouent un rôle important sur les effets macroscopiques (modification des champs électriques et magnétiques terrestres, induction de courants, chauffage de la haute atmosphère) et microscopiques (bombardement de particules énergétiques de la haute atmosphère, des astronautes, des électroniques embarquées des satellites, ...). Le tableau 6 compare les délais entre l'émission et les premiers effets sur terre des différentes émissions.

|  | Caractère  | Couverture solaire                      | Effet sensible sur terre après :                |
|--|------------|---|---|
| Vent solaire lent                      | Permanent  | Tout le Soleil sauf les trous coronaux. | 3 jours   |
| Vent solaire rapide                    | Permanent  | Trous coronaux                          | 2 à 3 jours (mélange avec le vent Solaire lent) |
| Spectre UV                             | Permanent  | Tout le Soleil                          | 8 min   |
| Eruption et Ejection de Masse Coronale | Sporadique | De faible à un tiers du Soleil.         | Quelques heures à 3 jours                       |

Tab. 6 Comparaison des sources d'énergie solaire (Lilensten and Bornarel, 2001)

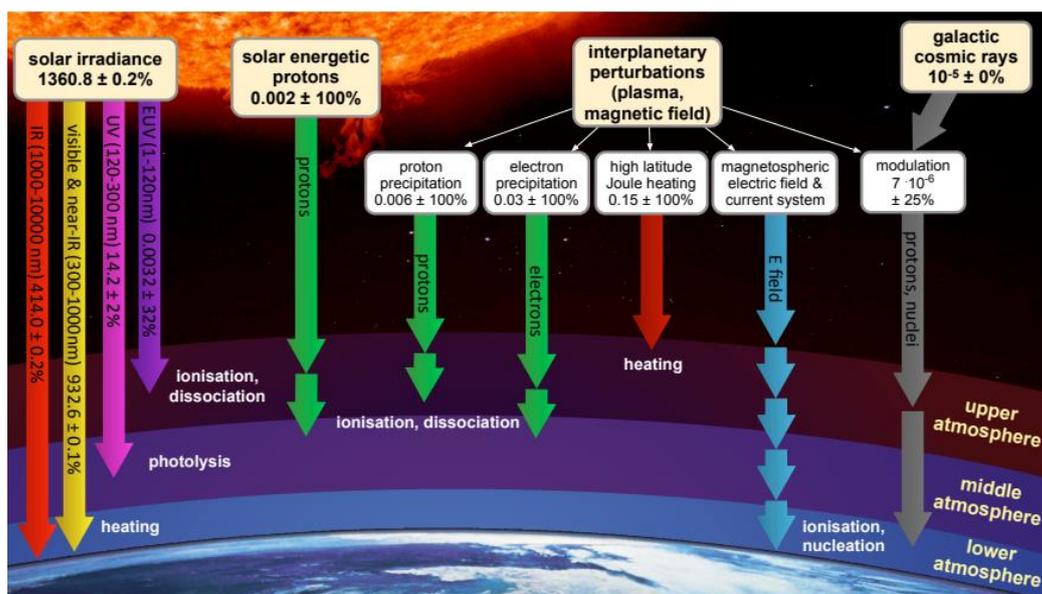


Fig. 37 Principaux apports solaires dans l'environnement terrestre. Les valeurs se réfèrent à leur contribution énergétique moyenne en  $W \cdot m^{-2}$ , normal à la haute atmosphère, sur une période de 11 ans (Lilensten et al., 2015).

## 4 L'impact avec la terre

La première confrontation du vent solaire avec la terre va se faire par leurs champs magnétiques respectifs, héliosphère contre magnétosphère. Le premier étant « embarqué » par le vent solaire interplanétaire.

Il est à noter que six planètes du système solaire sur huit possèdent un champ magnétique dipolaire propre : deux planètes telluriques et quatre planètes gazeuses et quelques satellites de ces planètes. (Cf. annexe 7)

### 4.1 La magnétosphère

(Mottez, 2018) (Zarka, 2007) (J.Lilensten, F. Pitout, M.Gruet, J.P. Marques, 2021) (Benacquista, 2017)  
En absence de vent solaire les planètes auraient un champ magnétique symétrique (Cf.Fig.38). Il est engendré par des mouvements de fluides conducteurs à l'intérieur de la planète (effet dynamo). L'axe magnétique n'est pas confondu avec l'axe de rotation, sauf pour Saturne. Pour la terre, l'axe est incliné de  $\sim 11,5^\circ$  par rapport à l'axe Nord-Sud géographique et il est décentré d'environ 500 km par rapport au centre de la terre (anomalie de l'Atlantique Sud) (Cf. Fig.38). Le champ magnétique varie de 0,32 G ( $32\mu\text{T}$ ) à l'équateur à 0,62 G ( $62\mu\text{T}$ ) au pôle nord.

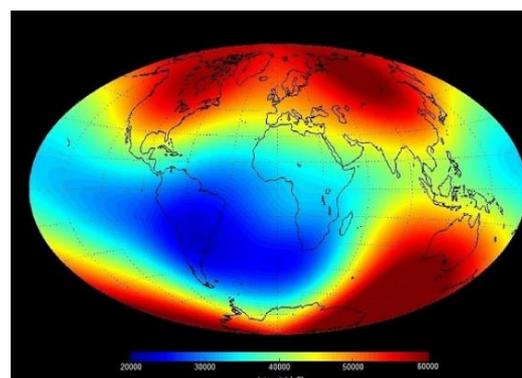
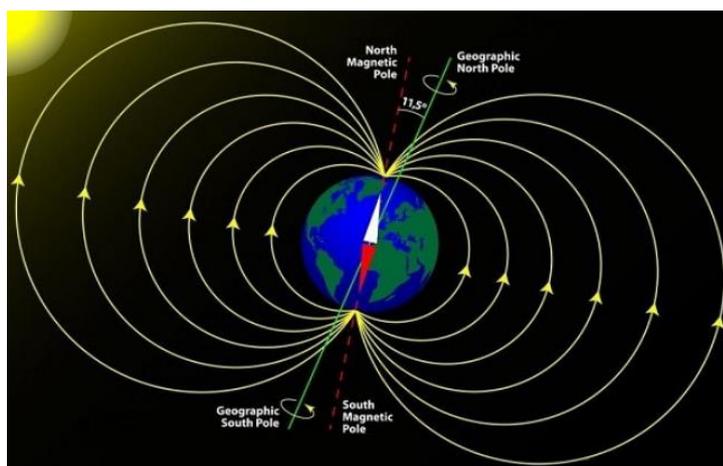


Fig. 38 Champ magnétique symétrique et l'anomalie de l'atlantique sud.

Le Champ magnétique forme autour de la terre une cavité magnétique appelée magnétosphère. Celle-ci est déformée par le vent solaire qui exerce en permanence une pression variable en intensité et en direction qui la comprime côté jour et qui l'allonge côté nuit (Cf. annexe 7). Elle est limitée dans sa partie basse par l'ionosphère.

Le couplage entre le vent solaire et la magnétosphère va être à l'origine de l'entrée de particules d'origine solaire dans la magnétosphère, et ensuite, plus bas, dans l'ionosphère.

La théorie MagnétoHydroDynamique (MHD) d'Hannes ALfvén prévoit que deux plasmas liés à deux champs magnétiques distincts (Soleil et Terre) ne peuvent pas s'interpénétrer. Les observations montrent qu'il y a passage de particules du vent solaire dans la magnétosphère, par exemple, les aurores sont plus intenses lors de pics d'activité du soleil.

La magnétosphère est un milieu complexe, elle est composée de plusieurs régions, caractérisées par des plasmas aux propriétés différentes, la magnétosphère externe et la magnétosphère interne.

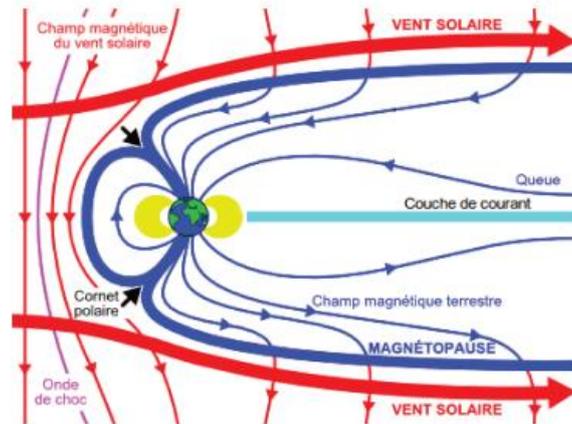


Fig. 39 Schéma simplifié de la magnétosphère terrestre (Griton, 2018)

Description de la figure 39. On peut y voir les lignes de champ magnétique du vent solaire (lignes rouges), le vent solaire dont l'écoulement est dévié par la magnétosphère (lignes rouges épaisses), celles du champ magnétique terrestre (lignes bleues), la frontière entre les deux, appelée « magnétopause » (lignes bleues épaisses) et la position du choc en amont de la planète (lignes magenta). Dans la figure 40, le schéma est plus complet, il sera expliqué plus avant.

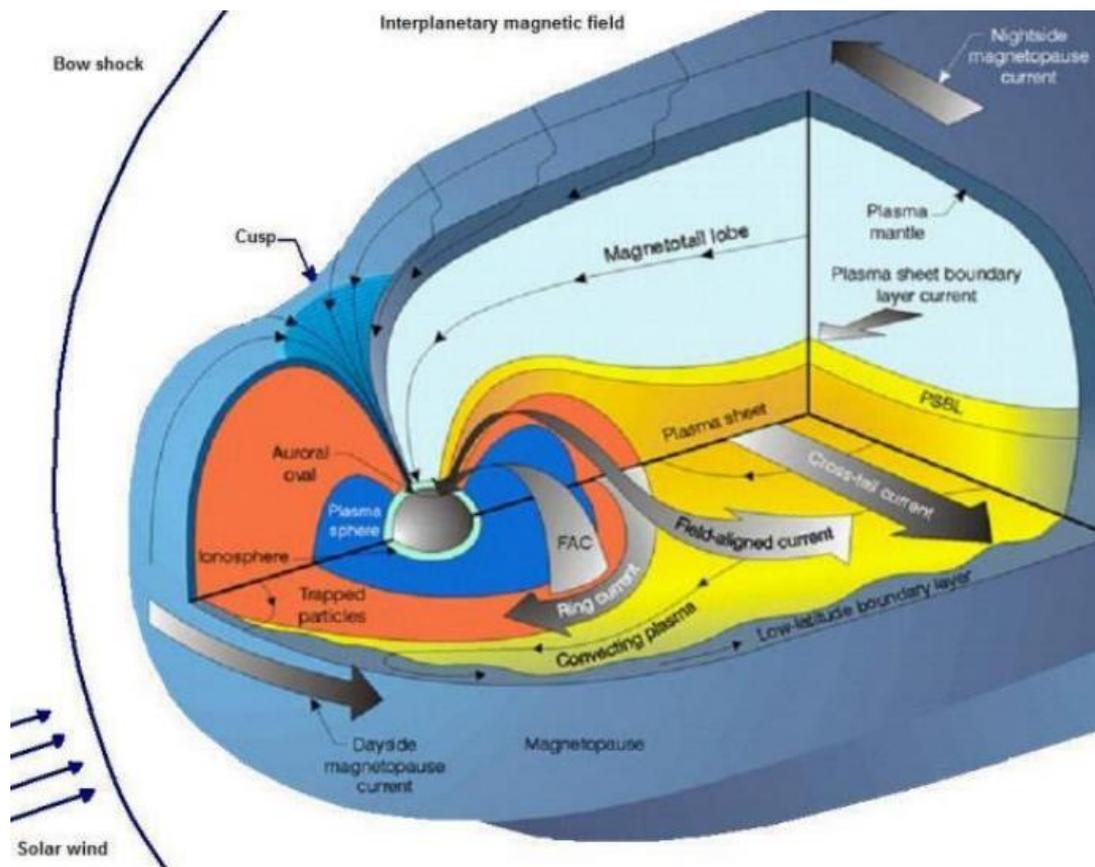


Fig. 40 Représentation schématique de la magnétosphère dans son ensemble (Gruet, 2018)

#### 4.1.1 Zone externe de la magnétosphère terrestre

(Benacquista, 2017) (Mottez, 2018) (Bernoux, 2022) (Zarka, 2007) (Griton, 2018) (Gruet, 2018)

##### ➤ *Le choc d'étrave (« Bow shock »)*

Dans la région la plus externe en direction du Soleil nous avons une onde de choc où le vent solaire passe d'une vitesse supersonique ( $> 60 \text{ km.s}^{-1}$  pour le vent solaire) à une vitesse subsonique (Cf. annexe 8). Il est chauffé et il est détourné de l'obstacle, il circule de façon turbulente autour de la magnétopause dans la magnétogaine.

Une séparation des charges (électrons et protons) s'est opérée en amont. Le tableau 6 montre dans la magnétogaine une augmentation de la densité, du champ magnétique et de la température ainsi qu'une diminution de la vitesse moyenne avec une orientation différente.

|                                    | Vent solaire | Magnétogaine |
|------------------------------------|--------------|--------------|
| $B \text{ (nT)}$                   | 5            | 50           |
| $\rho \text{ (cm}^{-3}\text{)}$    | 6            | 25           |
| $T \text{ (K)}$                    | $10^5$       | $10^6$       |
| $V \text{ (km s}^{-1}\text{)}$     | 400          | 100-200      |
| $ V_X  \text{ (km s}^{-1}\text{)}$ | 400          | 100          |
| $ V_Y  \text{ (km s}^{-1}\text{)}$ | 0            | 50-100       |
| $ V_Z  \text{ (km s}^{-1}\text{)}$ | 0            | 50-100       |

Tab. 6 Comparaison des caractéristiques des paramètres du vent solaire en dehors et dans la magnétogaine

##### ➤ *La magnétopause*

Elle constitue la limite externe de la magnétosphère, il s'agit d'une couche de courants (Cf. Fig. 39), courant de magnétopause et courant de queue, les particules chargées sont soumises à la force de Lorentz (Cf. annexe 9). La limite de la magnétopause est variable, en fonction de la vitesse et de la densité du vent solaire (Cf. annexe 10)

Les plasmas dans la magnétosphère sont à la fois d'origine solaire et d'origine terrestre en provenance de l'ionosphère. En moyenne, la densité de matière dans la magnétosphère est plus faible que dans le vent solaire.

La magnétosphère contient donc du plasma provenant de différentes origines (Zarka, 2007) :

- Du vent solaire diffusant à travers la magnétopause (Cf Annexe 10) et entrant par les cornets polaires ( $200 \text{ g.s}^{-1}$  d'ions hydrogène et hélium).
- De l'ionosphère de la planète, le plasma diffuse vers le haut ( $3 \text{ kg.s}^{-1}$  d'ions azote et oxygène).
- Des satellites qui se trouvent dans la magnétosphère, ce n'est pas vrai pour la terre ; Seule la lune traverse rapidement la queue de la magnétosphère une fois par mois.
- Des anneaux quand la planète en possède, ce n'est pas le cas de la terre.

##### ➤ *Les cornets polaires*

Ils marquent la séparation entre les lignes de champ côté jour et côté nuit, les lignes de champ sont ouvertes. Ils constituent le deuxième point d'entrée du vent solaire dans la magnétosphère.

##### ➤ *La queue magnétosphérique*

C'est le nom donné à la région de la magnétosphère terrestre qui s'étend côté nuit. C'est une partie importante de la magnétosphère terrestre car elle est un réservoir de plasma et d'énergie. Le plasma et l'énergie sont relâchés aperiodiquement lors d'épisodes de sous-orages magnétosphériques.

Elle comprend deux zones distinctes :

- Les lobes magnétosphériques
- Le feuillet de plasma

➤ *Les lobes magnétosphériques*

Les lobes sont localisés côté nuit aux fortes latitudes entre la magnétopause et le feuillet de plasma. Ils contiennent un plasma froid et ténu ( $n < 0,1 \text{ cm}^{-3}$ ,  $E = 10 \text{ à } 300 \text{ eV}$ ), Ils sont de polarité opposée (Cf. Fig. 39), les lignes de champ sont ouvertes, dirigées vers la terre dans l'hémisphère nord et vers l'espace interplanétaire dans l'hémisphère sud.

➤ *Le feuillet de plasma*

Couche de plasma chaud globalement neutre. Situé entre les lobes, sur le plan de l'équateur magnétique, Cette zone a une épaisseur de 3 à 7  $R_T$ . Les lignes de champ sont fermées, toutes les particules vont vers la Terre d'autant plus après une reconnexion (Cf. annexe 12). Le feuillet de plasma est parcouru par un courant d'Est en Ouest. A proximité de la Terre le feuillet de plasma s'élève en latitude et se connecte aux régions aurorales (Cf. § suivant).

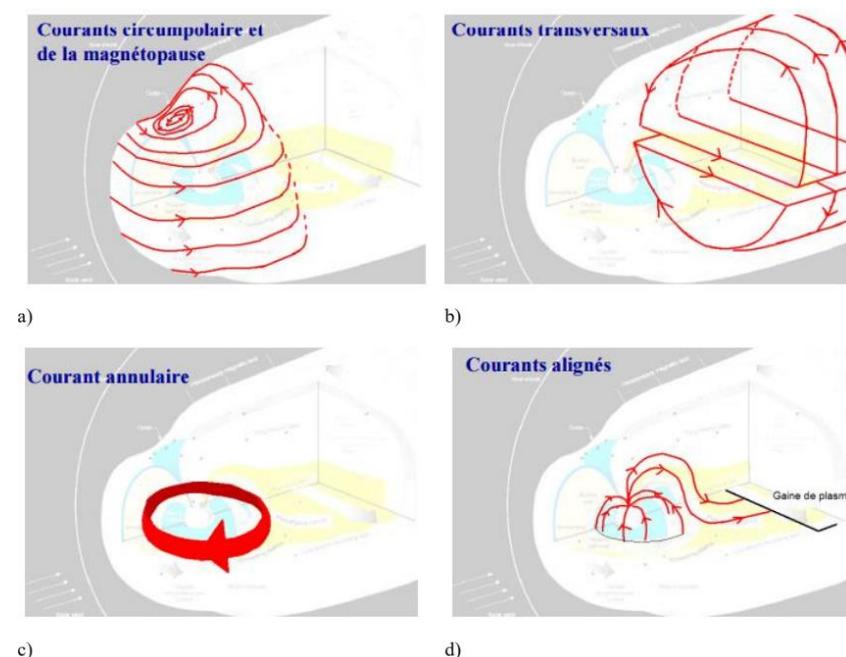
| Région             | Densité ( $\text{cm}^{-3}$ ) | Energie des $e^-$ (eV) | Energie des $p^+$ (eV) |
|--------------------|------------------------------|------------------------|------------------------|
| Magnétogaine       | 8                            | 25                     | 150                    |
| Lobes              | 0,01                         | 50                     | 300                    |
| Feuillet de plasma | 0,03                         | 600                    | 4200                   |

*Tab.7 Paramètres moyens du plasma dans certaines régions de la magnétosphère (Bernoux, 2022b) (Koskinen et Kilpua, 2022).*

➤ *Résumé pour les courants magnétosphériques*

(Gruet, 2018)

La magnétosphère est parcourue par de nombreux courants constituant un système complexe ; Ils jouent un rôle important dans la dynamique et le couplage vent solaire-magnétosphère-ionosphère. Ils sont le siège de processus d'accélération et de conversion d'énergie.



*Fig. 41 Exemples de courants créés suite à l'interaction Soleil-Terre (Gruet, 2018).*

Les courants sont donc créés par les particules soumises au champ magnétique terrestre, on distingue Les courants circumpolaires et de magnétopause, qui tournent vers l'Est à la surface de la magnétopause.

- Les courants transversaux liés à la circulation de particules chargées dans la queue de la magnétosphère autour du feuillet de plasma neutre.
- Le courant annulaire directement lié à la dérive des particules piégées et aux particules magnétosphériques injectées
- Les courants alignés circulant le long des lignes de champ magnétique connectant la magnétosphère à l'ionosphère.

#### 4.1.2 Zone interne de la magnétosphère terrestre

(Gruet, 2018) (Bernoux, 2022)

C'est la région de la magnétosphère où le champ magnétique est peu déformé, quasi-dipolaire et intense. Elle est composée de trois sous-régions où cohabitent trois types de plasma : La plasmasphère, le courant annulaire et les ceintures de radiations.

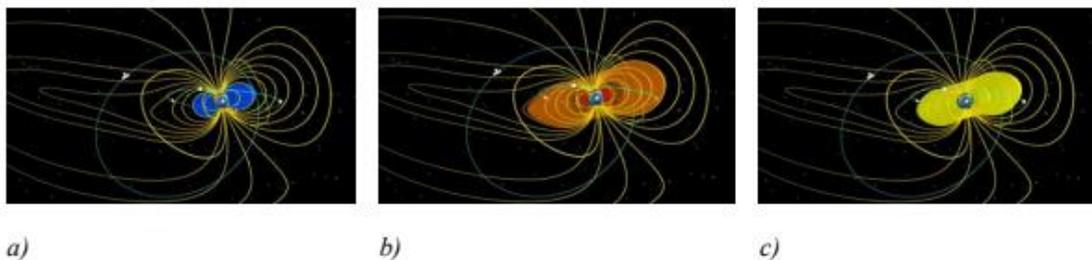


Fig. 42 La magnétosphère interne. a) plasmasphère, b) ceinture de radiation interne et externe, c) distribution du courant annulaire (Gruet, 2018). Crédit : Aurora Explorer.

##### ➤ La plasmasphère

C'est la région de forme toroïdale qui est en co-rotation avec la planète. Elle s'étend à partir des limites supérieures de l'ionosphère. Elle est très variable en dimensions (2 à 8  $R_T$ ) en fonction du couplage entre le vent solaire et la magnétosphère. Elle est constituée de particules de faibles énergies ( $E < 100$  eV) et sa densité est élevée de  $10^2$   $\text{cm}^{-3}$  et  $10^4$   $\text{cm}^{-3}$ . Elle est composée d' $e^-$  et ions principalement de  $p^+$  (90 %) mais aussi d'ions  $\text{He}^+$ ,  $\text{O}^+$  et des traces d'ions lourds, ceux-ci sont d'origine ionosphérique.

##### ➤ Le courant annulaire

Il provient de la dérive azimutale des particules chargées à une distance de 2 à 6  $R_T$ . C'est un courant toroïdal dirigé d'Est en Ouest (Cf. Fig.41). Les principales particules contribuant au courant annulaire sont les électrons et les protons de 10 à 200 keV.

##### ➤ Les ceintures de radiations

Ou « ceintures de Van Allen », elles sont composées essentiellement d' $e^-$  et de  $p^+$  de très hautes énergies : 100 keV à 10 MeV pour les  $e^-$  et 10 à 100 MeV pour les  $p^+$ . Il existe 2 ceintures d'électrons (l'une à 2,5  $R_T$  l'autre à 2,5 à 10  $R_T$ ) et une ceinture de protons se superposant partiellement avec la ceinture intérieure d'électrons.

Les particules chargées sont piégées dans les ceintures de radiations, le mécanisme de piégeage dans les ceintures est une conséquence directe de la force de Lorentz (Cf. annexe 9) pour des particules chargées dans un champ dipolaire stationnaire. Les particules possèdent un mouvement décomposable en trois sous-mouvements : La giration, le rebond et le mouvement de dérive (Cf. annexe 11). Mais les

hypothèses de stationnarité et de suppression du champ électrique  $\vec{E}$  ne sont pas strictes et donc la conséquence est que les particules ne sont pas parfaitement piégées, toutefois leur piégeage peut durer plusieurs mois voire des années (Bernoux, 2022).

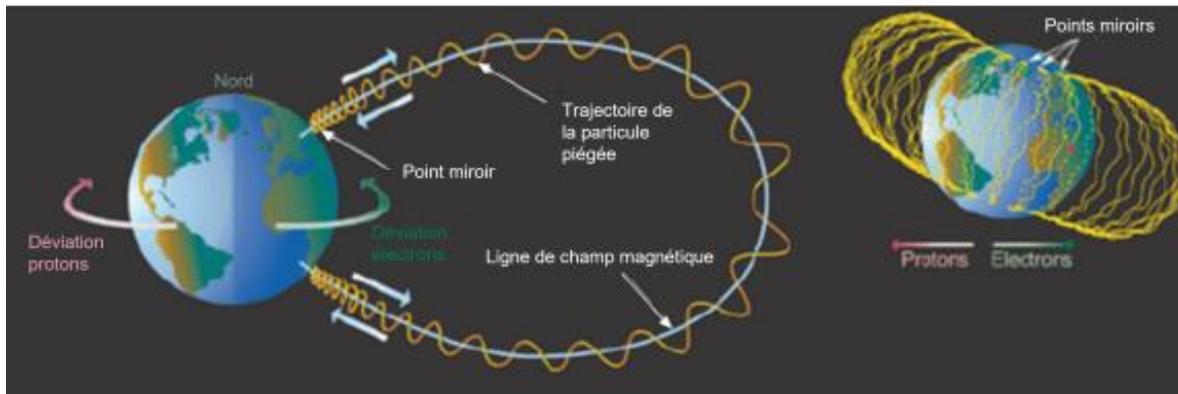


Fig. 43 Schéma explicatif du phénomène de point miroir. (Robert, 2023) Modifié d'après Anagnostopoulos et al (2010)

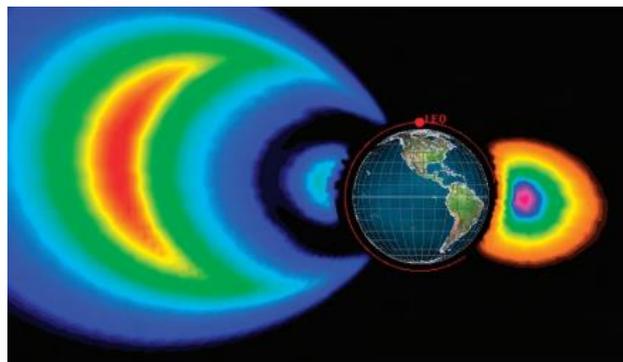


Fig.44 les deux ceintures d' $e^-$  (à gauche) et la ceinture de  $p^+$  (à droite). Située approximativement entre 7000 et 16000 km pour la ceinture interne et entre 20000 et 45000 km pour la ceinture externe. Les ceintures sont pilotées en majorité par l'activité géomagnétique. Crédits: David Chenette, Lockheed Martin Space Systems Company (National Research Council, 2008)

## 4.2 L'ionosphère

(Robert, 2023)

L'ionosphère est la partie de la haute atmosphère de 60 à 1000 km où les rayonnements électromagnétiques UV, EUV, X et gamma d'origine solaire ou galactique cèdent leurs énergies aux molécules, atomes et ions présents. C'est un plasma dense, froid et partiellement ionisé (donc collisionnel), conséquence, cette partie de la haute atmosphère remonte en température.

L'ionosphère couvre la mésosphère, la thermosphère et l'exosphère. Elle est composée d'ions et de particules neutres dans sa partie basse, et d'ions fortement ionisés dans sa partie haute (Cf. annexe 13). Les particules magnétosphériques sont transportées par les lignes de champ magnétique jusqu'aux zones polaires. Ce sont les courants alignés (sous-entendu aux lignes de champ magnétique). Ils sont les seuls points d'entrée à l'ionosphère pour les particules du vent solaire. Ces particules sont dites précipitées, elles sont à l'origine de divers courants ionosphériques, courants mentionnés dans les figures 45 et 46.

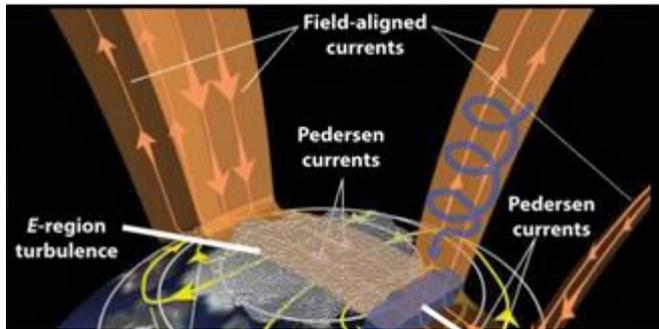


Fig. 45 Courants de Birkeland, Pedersen et Hall au niveau des zones polaires. (Robert, 2023) Crédits : Modifié de Le et al. (2010)

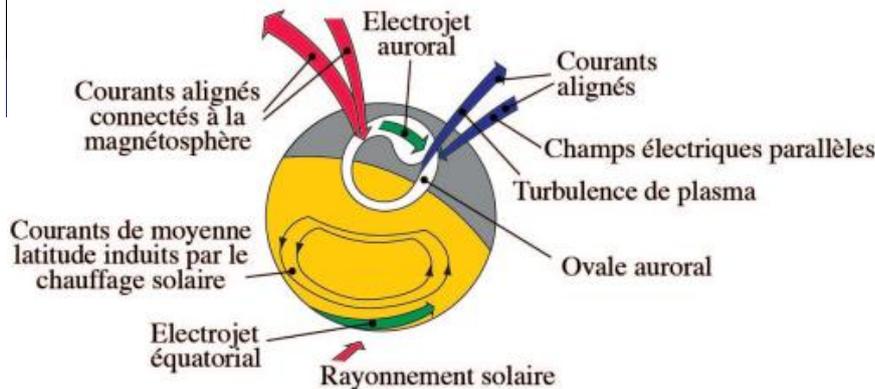


Fig. 46 Configuration des principaux systèmes de courants de l'ionosphère terrestre. Crédits : Liliensten et Blelly (2000)

Il existe une myriade de courants électriques naturels variables à l'intérieur de la terre, dans les océans et dans la haute atmosphère terrestre qui vont réagir aux variations de courants ionosphériques et donc aux variations de l'activité solaire. La figure 47 image la complexité de ces phénomènes.

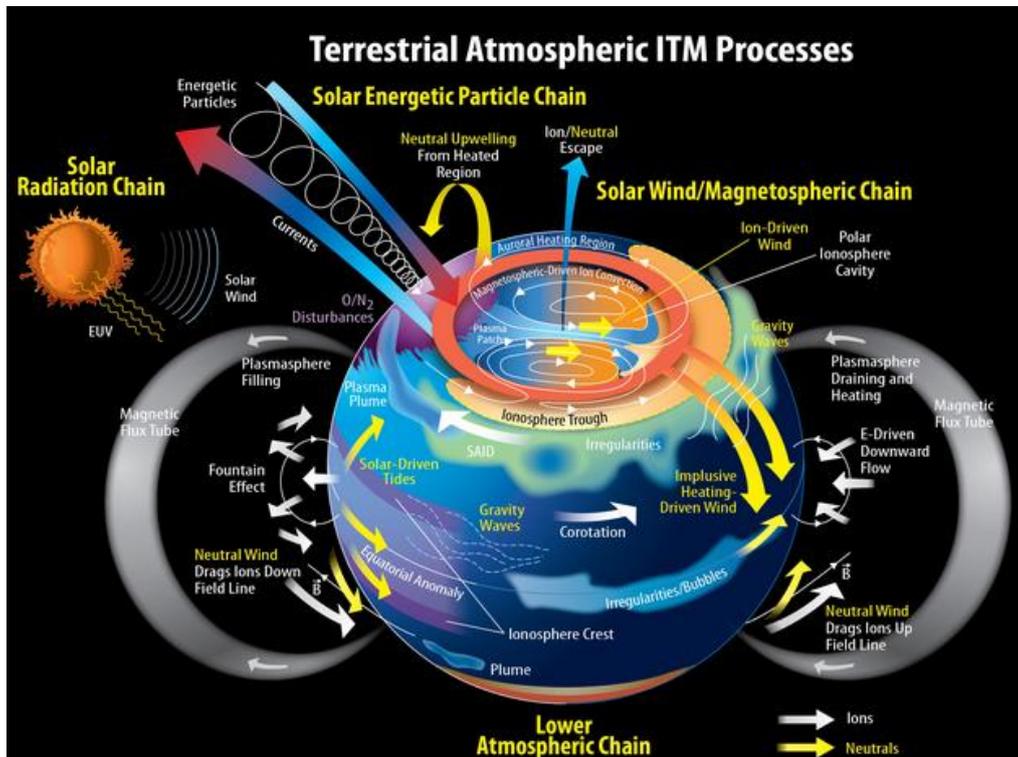
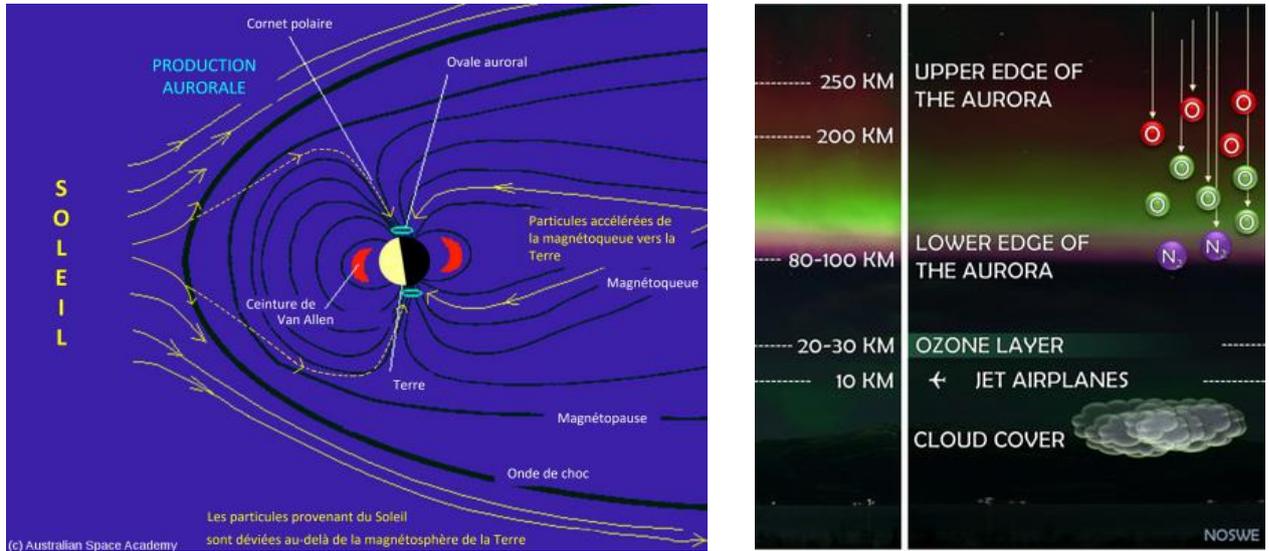


Fig. 47 Dynamiques électromagnétiques de l'ionosphère en situation de tempête géomagnétique (ITM : Ionosphère, Thermosphère, Mésosphère). NASA – Scientific Visualisation Studio

### 4.3 Les aurores polaires

(Robert, 2023) pp38-39 (Mottez, 2018)

Les aurores polaires sont produites au sein de l'ionosphère essentiellement du côté nuit. Elles sont provoquées par l'interaction (ionisation, excitation, désexcitation) entre les particules précipitées (des  $e^-$  rapides) et précédemment accélérées et les molécules de la haute atmosphère (O moléculaire, ion  $O^+$ , N moléculaire,  $N_2$  ...).



a)

b)

Fig. 48 a) Le transport des électrons suivants les lignes de champ magnétique terrestre.  
Crédits : Modifié de Australian Space Academy – b) Couleurs des aurores (Norwegian Centre for Space Weather)

Les émissions lumineuses dans le visible sont les preuves des interactions successives : Soleil – Vent Solaire – Magnétosphère – Atmosphère. Elles se produisent entre 80 et 250 km et forment l'ovale auroral (Fig. 48). Lors de sous orages géomagnétiques, elles restent localisées à hautes latitudes entre (+/-)  $65^\circ$  et (+/-)  $75^\circ$  de latitude, lors d'orages magnétiques sévères elles peuvent être observées à basses latitudes, par exemple lors de l'évènement Carrington, les aurores ont été observées jusqu'à Cuba.

Les zones aurorales sont essentiellement alimentées par les particules qui proviennent du feuillet de plasma, (lors de reconnections) mais d'autres sources existent telles que les cornets polaires et les ceintures de radiation (Van Allen).

Les aurores polaires sont des phénomènes dynamiques, localisés et de différentes formes.

- Les aurores discrètes, les plus spectaculaires, se caractérisent par des arcs ou des draperies très intenses dans le ciel.
- Les aurores diffuses, sans forme structurée, sont étendues dans le ciel.

Les mécanismes d'accélération sont différents pour les deux types, Cf. tab 8

| Type d'aurore        | Accélération      | Energies des électrons | Distribution énergie |
|----------------------|-------------------|------------------------|----------------------|
| Discrète             | QSPS              | 5 – 10 keV             | Monoénergétique      |
| Discrète             | Ondes d'Alfvén    | 1 – 5 keV              | Large bande          |
| Diffuse              | « Whistler mode » | ~100 eV – 10 keV       | Proche Maxwellienne  |
| « Pulsating aurora » | « Whistler mode » | qqk keV – 100 keV      | Proche Maxwellienne  |

Tab. 8 Tableau résumé des caractéristiques des aurores discrètes et diffuses

Les phénomènes d'accélération sont via des processus magnétohydrodynamiques : QSPS <sup>14</sup> ; ondes d'Alfvén ; Whistler mode.<sup>15</sup>

#### 4.4 Pour résumé

Il existe un couplage entre :

- **Vent Solaire et Magnétosphère**, avec ou sans reconnexion magnétique (Cf. annexe 12), il se crée des champs électriques de convection magnétosphérique à grande échelle responsable de l'activité géomagnétique.
- **Magnétosphère et Ionosphère**, elles sont liées par les lignes de champ magnétique. Les précipitations de particules aurorales ionisent l'atmosphère des hautes latitudes et la chaleur peut être transférée de la magnétosphère vers l'ionosphère. De plus en sens inverse, une partie des électrons et des ions froids de l'ionosphère « s'évapore » dans la plasmasphère (partie interne de la magnétosphère).
- **Ionosphère et Thermosphère**, Les collisions entre le plasma ionosphérique en convection et l'atmosphère neutre entraîne la formation de vents neutres et le chauffage par effet Joule du gaz neutre.

## 5 De la métrologie à la météorologie opérationnelle.

Le principe est « simple », à partir d'observations et de mesures au sol ou dans l'espace (satellites) il est mis à disposition des professionnels concernés<sup>16</sup> par les perturbations liées à l'activité solaire, des mesures, des alertes. Celles-ci, souvent sous forme d'indices, en temps réels ainsi que prédites (modélisation) afin d'appréhender le niveau de risque de dysfonctionnement de leurs équipements et mettre en sécurité leurs procédés. Ce qui est vrai pour le matériel et d'autant plus vrai pour l'humain, il faut prévoir et évaluer les équivalents de doses lors de survols des pôles pour les passagers et le personnel navigant et lors de sorties extra véhiculaires pour les astronautes, pour les mettre à l'abri.

<sup>14</sup> « Quasi-Static Potential Structure » : accélération par potentiel électrique quasi-statique. Elle correspond à un champ électrique ascendant quasi-statique qui supporte les courants alignés sur les lignes de champs.

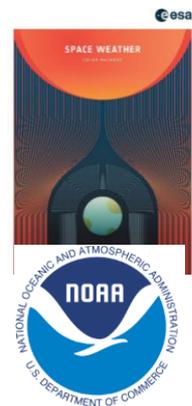
<sup>15</sup> « Whistler mode » les ondes sifflantes chorales est un mode d'accélération via un phénomène de diffusion.

<sup>16</sup> Les opérateurs de satellites, les plateformes de lancement, les distributeurs d'énergie, les opérateurs ferroviaire, l'aviation civile, la défense, les télécommunications, la sécurité civile, les scientifiques, L'ingénierie spatiale...

Nous prendrons comme exemple cinq sites de météorologie de l'espace qui font référence :

- “Space Weather Service Network” de l’ “European Space Agency” (ESA).  
Programme “Space Situational Awareness” (SSA).

<https://swe.ssa.esa.int/current-space-weather#>



- “Space Weather Prediction Center”(SWPC) de la “National Oceanic and Atmospheric Administration” (NOAA).

<https://www.swpc.noaa.gov/>

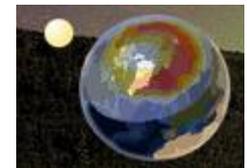
- “International Space Environment Service” (ISES) – 23 états participants.

<http://www.spaceweather.org/ISES/swx/swx.jsp#ad-image-0>



- Un site privé, didactique qui s’adresse à tous les publics sous Android, SpaceWeatherLive.

<https://www.spaceweatherlive.com/>



- Un site spécifique sur les données solaires en temps réel – BASS200, de l’Observatoire de Paris.

[https://bass2000.obspm.fr/search\\_struct.php?date=2024-04-16](https://bass2000.obspm.fr/search_struct.php?date=2024-04-16)



Les deux premiers sites proposent des informations (Observations, mesures, indices, prévisions) en fonction des besoins de chaque domaine. Leurs informations sont issues des instruments embarqués dans leurs satellites dédiés<sup>17</sup> et des stations au sol. Le troisième site donne des indices globaux, le quatrième reprend les informations des deux premiers et les rend plus accessibles. Le cinquième fait état des observations héliographiques au sol de l’obspm (Paris, Meudon et Nancy).

Nous distinguons les observations et les mesures de l’activité solaire, du vent solaire, de l’activité de la magnétosphère interne, des propriétés de l’ionosphère et de l’activité géomagnétique (orages, sous-orage, ionosphère, aurores). Plus spécifique, des mesures de dosimétrie. Cette énumération ne se veut pas exhaustive, elle donne un aperçu des moyens et résultats en jeu dans le domaine de la météorologie de l’espace.

<sup>17</sup> NASA, ESA et organismes de recherche internationaux, satellites dédiés Cf. § 8.1 sitographie.

## 5.1 Activité solaire

### 5.1.1 Tâches solaires

La première mesure historique, est le comptage des tâches solaires (1613) auquel a été ajouté un classement suivant leurs formes individuelles et collectives (groupe). Une corrélation du nombre et la forme de ces tâches (ou groupe) avec les événements géomagnétiques est apparue rapidement dans l'histoire de la météorologie de l'espace. Pendant longtemps l'observation de la durée du cycle solaire dépendait d'un seul enregistrement direct : le comptage visuel des tâches solaires. Depuis 1700 en valeurs annuelles, 1750 en valeurs mensuelles et 1849 en valeurs quotidiennes.

Le Centre mondial de données pour la production, la conservation et la diffusion du nombre international de taches solaires (SILSO)<sup>18</sup> donne des valeurs statistiques journalières (Nombre de Wolf), à partir d'observations visuelles d'environ 80 stations réparties internationalement. La valeur calculée est :

$$R = K(10g + s)$$

Où  $g$  est le nombre de groupes de taches solaires,  $s$  le nombre total de taches solaires distinctes et  $K$  un facteur d'échelle dépendant des moyens d'observations (Cf. annexe 14)

Outre le nombre de tâches et de groupes, les sites de météorologie de l'espace proposent d'afficher les caractéristiques de chaque tache solaire ou groupe : un repère, une position, une surface, un classement en fonction de l'activité magnétique ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ , ...). De la même façon pour les trous coronaux<sup>19</sup>.

### 5.1.2 Flux solaire radio à la longueur d'onde 10,7 cm

(Robert, 2023)

Les émissions radio F10,7 (2800 MHz) proviennent de la région de transition entre la chromosphère et la couronne. Il est en corrélation avec le nombre de taches solaires (Cf. annexe 2) ainsi qu'avec d'autres phénomènes tels que les émissions dans l'extrême ultraviolet (EUV), exemple donné par la figure 49.

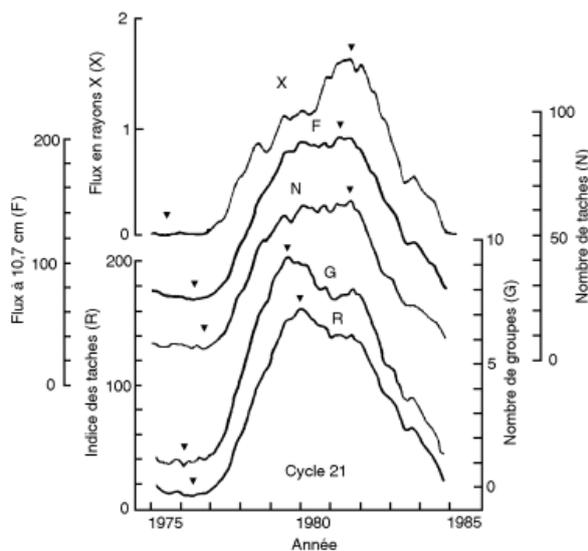


Fig. 49 Comparaison d'un cycle de onze ans en rayon X, en centimétrique, en nombre de taches et de groupe, et en indice des taches (R). (Obspm, n.d.)

<sup>18</sup> SILSO : Sunspot Index and Long-term Solar Observations – Royal Observatory of Belgium) :

<https://www.sidc.be/SILSO/datafiles>

<sup>19</sup>[https://bass2000.obsmp.fr/search\\_struct.php?date=2024-05-31](https://bass2000.obsmp.fr/search_struct.php?date=2024-05-31)

Les premières mesures datent de 1947, l'unité est le sfu (solar flux units), égale à  $10^{-22} \text{ W.m}^{-2}.\text{Hz}^{-1}$ . Il est utilisé dans de nombreux modèles empiriques comme l'indice EUV. Il peut varier de 50 à 300 sfu. Il est mesuré depuis le sol dans toutes les conditions météorologiques, Ce sont des données robustes.

### 5.1.3 Flux solaire X pour des longueurs d'onde entre 0,1 nm et 0,8 nm

(Perri, 2019)

Cette mesure permet de classer les éruptions solaires en fonction de leur pic de flux (en  $\text{W.m}^{-2}$ ) pour le rayonnement X entre 0,1 nm et 0,8 nm. La mesure est réalisée par l'instrument XRS embarqué par GOES. La classe A est la moins forte, la classe X est la plus forte. Dans une même classe, une éruption solaire est caractérisée par un numéro qui correspond au facteur d'énergie suivant une échelle d'énergie, exemple : une éruption avec un pic à  $2,0.10^{-4} \text{ W.m}^{-2}$  correspond à X2, de même, une éruption avec un pic à  $3,0.10^{-4} \text{ W.m}^{-2}$  correspond à X3. La classe X n'est pas plafonnée. L'éruption solaire qui a saturé les détecteurs du 4 novembre 2003 avait un flux estimé entre X25 et X45

| Classe  | A           | B                   | C                   | M                   | X           |
|---|-------------|---------------------|---------------------|---------------------|-------------|
| Pic de flux entre 0,1 et 0,8 nm ( $\text{W.m}^{-2}$ ) | $< 10^{-7}$ | $10^{-7} - 10^{-6}$ | $10^{-6} - 10^{-5}$ | $10^{-5} - 10^{-4}$ | $> 10^{-4}$ |

Tab.9 Classification des éruptions solaires en fonction de leur pic de flux. Crédits : NOAA

Les grandes éruptions solaires à rayons X peuvent modifier l'ionosphère terrestre, qui bloque les transmissions radio HF du côté de la terre éclairé par le soleil. Les éruptions solaires peuvent aussi être associées à des EMC.

Le SWPC / NOAA a défini une échelle de gravité des éruptions solaires en cinq niveaux (R1 à R5) qui couvrent les classes M et X. Il donne dans ce même tableau la fréquence moyenne de l'évènement par cycle (Cf. annexe 15 – Radio Blackouts)

### 5.1.4 Les données d'imagerie solaire

➤ Dans différentes bandes de longueurs d'onde

Les observations dans différentes bandes de longueurs d'onde donnent des informations qualitatives sur l'activité des différentes strates de la surface et de l'atmosphère solaire. Exemple des images acquises par l'imageur AIA (Atmospheric Imaging Assembly) du satellite SDO (7 dans l'EUV, 2 dans l'UV, et 1 dans le visible), Cf. Fig. 50 et Tableau 10 (Bernoux, 2022)

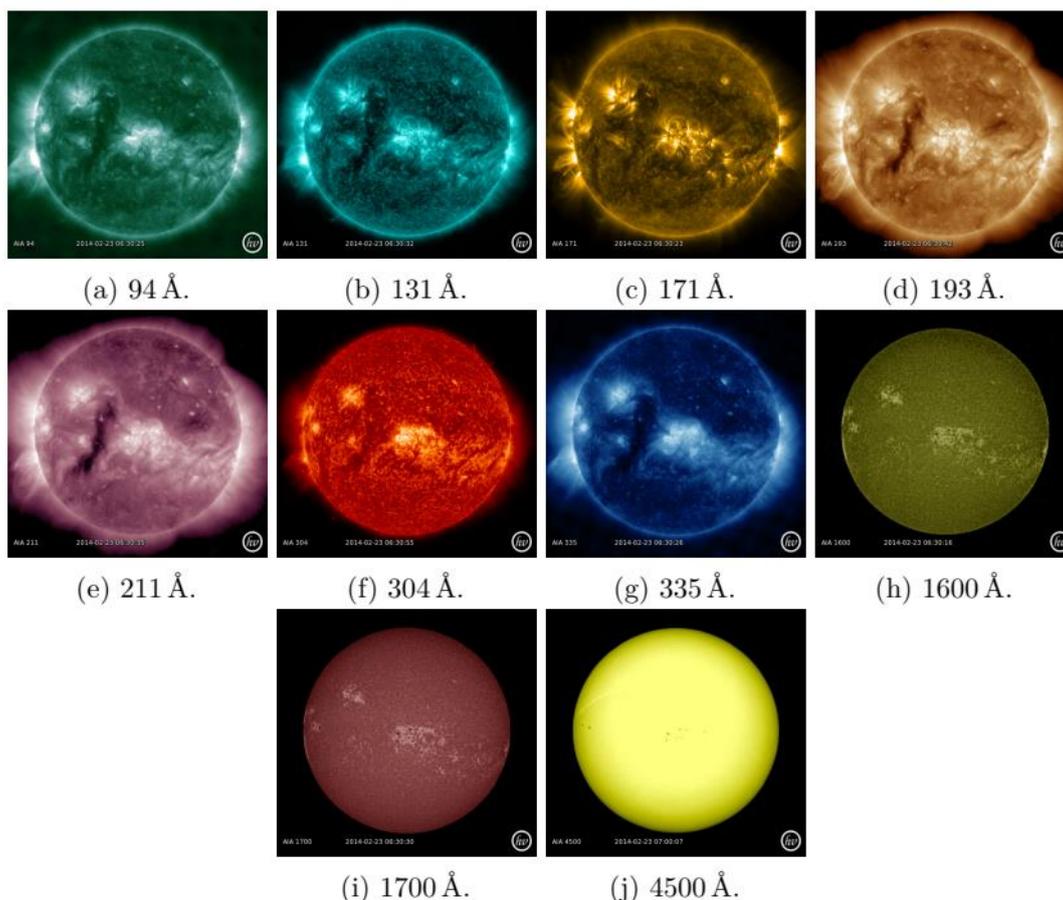
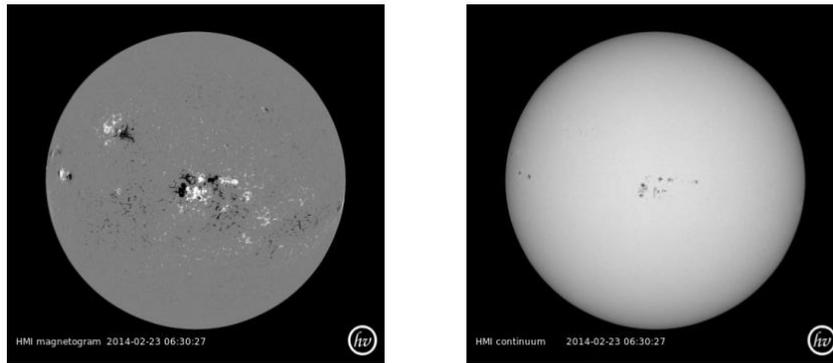


Fig. 50 Exemple d'images capturées par SDO/AIA aux dix longueurs d'ondes possible le 23/02/2014.  
Crédits : SDO (NASA) ; Images générées via Helioviewer.

| Longueur d'onde (nm) | Ion              | Objectif d'observation                           |
|----------------------|------------------|--|
| 450                  | Continuum        | Photosphère                                      |
| 170                  | Continuum        | Température minimum ; photosphère                |
| 30,4                 | He II            | Chromosphère ; région de transition              |
| 160                  | C IV + Continuum | Région de transition ; photosphère supérieure    |
| 17,1                 | Fe IX            | Couronne calme ; région de transition supérieure |
| 19,3                 | Fe XII + Fe XXIV | Couronne et « flares » de plasma chaud           |
| 21,1                 | Fe XIV           | Régions actives de la couronne                   |
| 33,5                 | Fe XVI           | Régions active de la couronne                    |
| 9,4                  | Fe XVIII         | « Flares » coronaux                              |
| 13,1                 | Fe VIII + Fe XXI | Région de transition et « flares » coronaux      |

Tab. 10 Différentes longueurs d'onde d'acquisition de l'instrument AIA et caractéristiques associés (Bernoux, 2022)

Autres images du capteur HMI de SDO



(a) Magnétogramme.

(b) Continuum.

Fig.51 Exemple d'images (magnétogramme et continuum) capturées par SDO/HMI le 23/02/2014.

Crédits : SDO (NASA). Image générées via Heliviewer.

➤ *En imagerie coronographique*

Elle permet de détecter les EMC en visuel ou en automatique, par exemple avec le logiciel Cactus dans des séquences d'images de l'instrument LASCO (Large Angle and Spectrometric Coronagraph Experiment) du satellite SOHO. Le résultat est une liste d'évènements, renseignées avec l'angle principal, la largeur angulaire et l'estimation de la vitesse pour chaque EMC. Exemple de traitement Cactus.

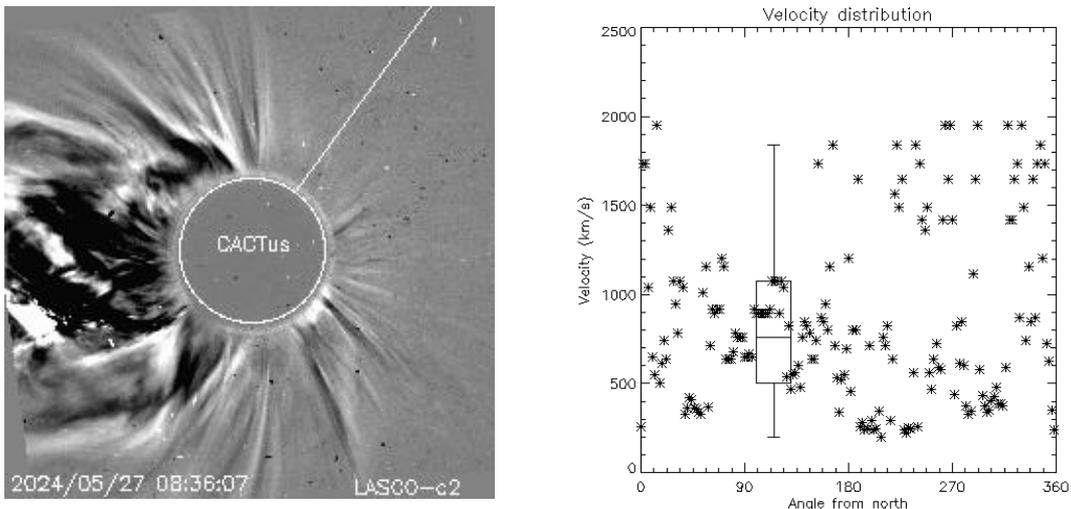


Fig. 52 Acquisition du coronographe LASCO et traitement par le logiciel Cactus

➤ *En imagerie H $\alpha$*

Chaque minute, une image H $\alpha$  est acquise à l'observatoire de Kanzelhöhe, si la qualité de l'image est suffisante, un algorithme de reconnaissance d'image « Surya » détecte les régions éruptives et les filaments.

5.1.5 Le flux de protons

La mesure utilisée pour quantifier les événements solaires à particules est l'intensité du flux de protons énergétiques ( $\geq 10\text{MeV}$ ) en nombre de pfu ( $1 \text{ pfu} = 1 \text{ particule.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}.\text{str}^{-1}$ ), la mesure est effectuée par le satellite GOES en orbite géosynchrone. Cette mesure concerne tous les événements à particules y

compris les EMC qui provoquent des tempêtes de rayonnements solaires. Ces tempêtes de radiations peuvent franchir la distance Soleil-Terre en seulement 30 min et durer plusieurs jours. Exemple dans la figure 53

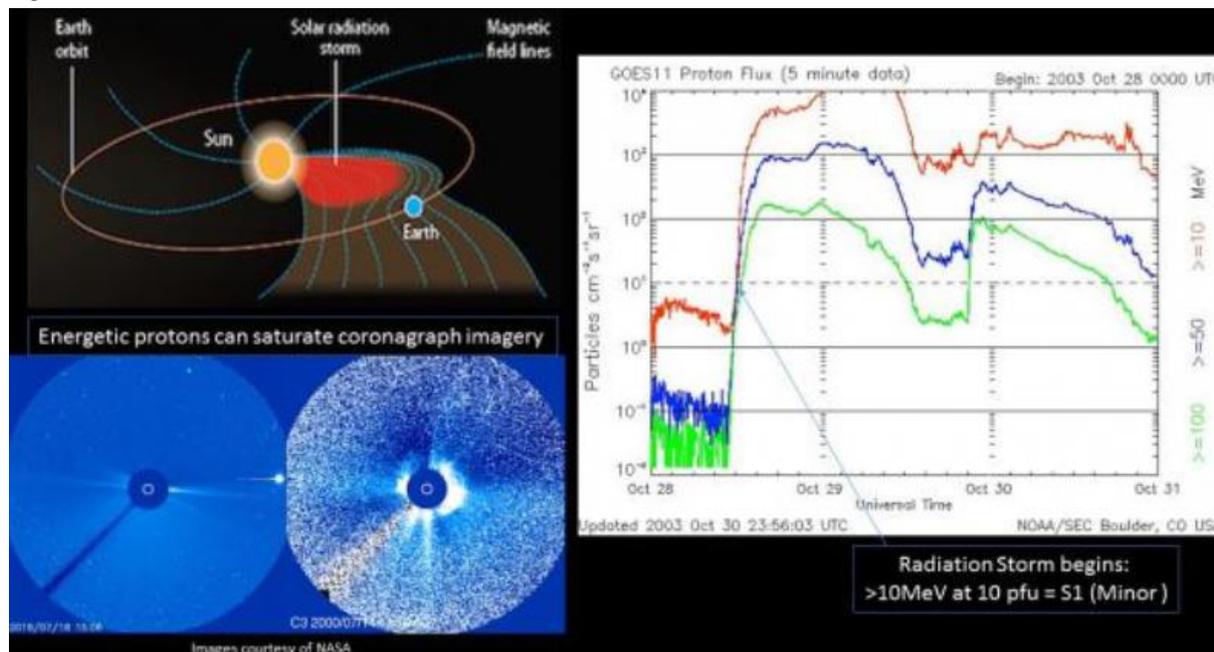


Fig. 53 Exemple de tempête solaire

Le SWPC / NOAA classe les tempêtes de rayonnements solaires sur une échelle allant de S1 à S5 dont la correspondance avec le flux de protons est donnée en annexe 15 ainsi que la fréquence moyenne par cycle.

### 5.1.6 Emissions UV et EUV

Les émissions UV et EUV ne sont pas mesurables au sol et difficilement mesurables en orbite. Il y a peu, le flux EUV était déduit de mesures de proxys tel que le flux radio à 10,7 cm ou l'indice Mg II lui-même construit à partir d'un spectre UV.

Les performances de l'instrumentation ayant progressé les satellites GOES 16 et 17 sont tous deux équipés d'un télescope pour l'EUV, « Solar Ultraviolet Imager » (SUIVI) qui permet de détecter les émissions solaires EUV de la couronne qui sont annonciatrices d'évènements tels que les éruptions solaires ou les EMC.

### 5.1.7 Oscillation solaire

Autres informations pertinentes qui sont encore dans le domaine de la recherche, ce sont les observations des oscillations (vibrations) du Soleil<sup>20</sup>.

« Le Global Oscillation Network Group (GONG) est un programme communautaire visant à réaliser une étude détaillée de la structure et de la dynamique internes du soleil à l'aide de l'héliosismologie. Afin d'exploiter cette nouvelle technique, le GONG a développé un réseau de six stations d'imageurs de vitesse extrêmement sensibles et stables, situés autour de la Terre, afin d'obtenir des observations presque continues des oscillations de "cinq minutes" du Soleil, ou pulsations ».

<sup>20</sup> GONG : <https://gong.nso.edu/info/>

## 5.2 Le Vent Solaire

Les données sur le vent solaire en temps réel proviennent des satellites DSCOVR ou ACE situés autour du point Lagrange L1. Lorsque DSCOVR détecte une EMC significative nous avons 1h pour réagir.

Les mesures en continu sont :

- Le champ magnétique interplanétaire: la composante  $B_z$  et la valeur  $B_t$  en nT.
- L'angle d'attaque du vent solaire  $\Phi$  en degrés.
- La densité en particules.cm<sup>-3</sup>.
- La vitesse en km.s<sup>-1</sup>.
- La température en K.

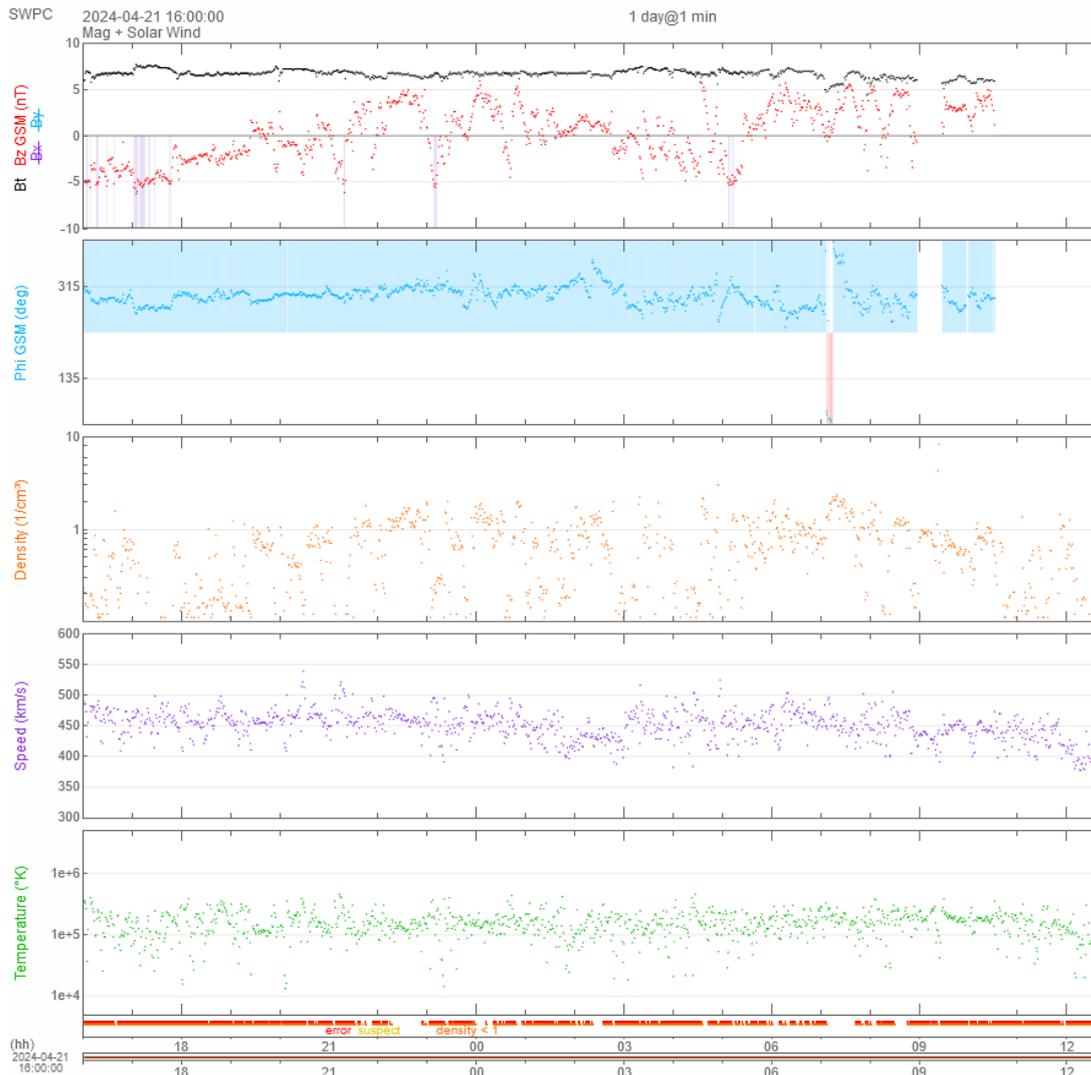
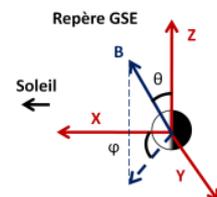


Fig. 54 Exemple de mesures du satellite. Crédits : ACE de SWPC / NOAA

**Nota important** : Les données des graphiques et tableaux sont indiquées dans le référentiel GSE (Geocentric Solar Ecliptic), centré sur la terre.



## 5.3 La magnétosphère interne

### 5.3.1 Le flux d'électrons

Il est mesuré par le satellite GOES dans la ceinture de rayonnement électronique externe sur l'orbite géostationnaire. Les mesures sont effectuées dans deux canaux d'énergies,  $> 0,8$  MeV et  $> 2$  MeV. Exemple de mesure du SWPC / NOAA, Fig. 56.

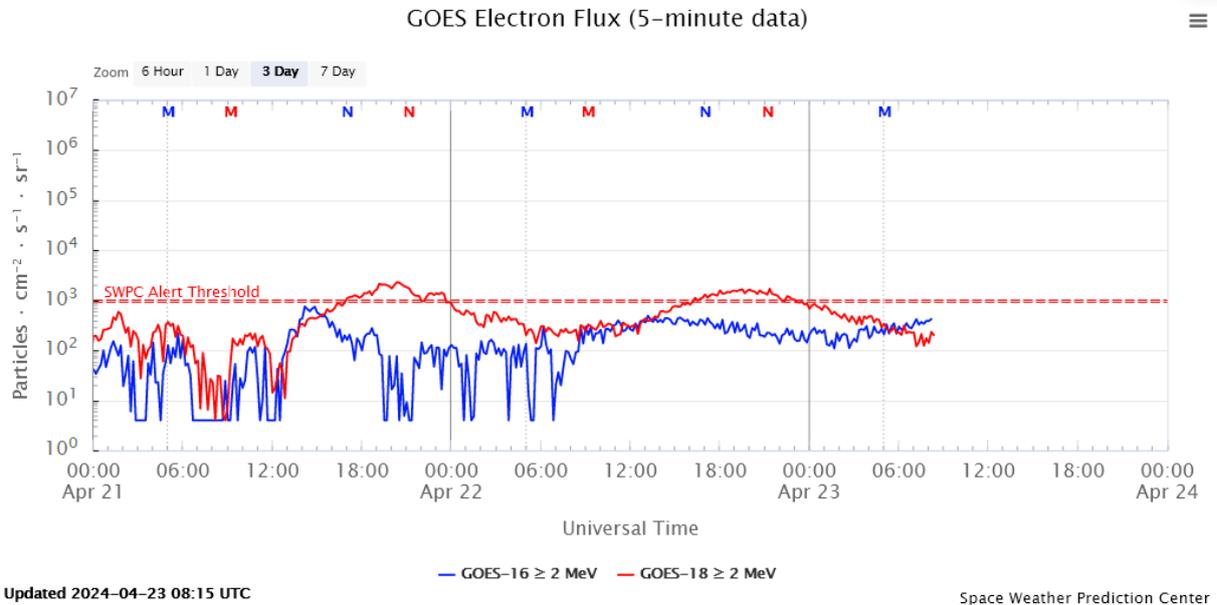


Fig. 56 Flux d'électrons dans la ceinture de radiation externe. NOAA

## 5.4 L'ionosphère

### 5.4.1 Le contenu total en électron<sup>21</sup>

La présence d'électrons perturbe les ondes radios, plus particulièrement leurs vitesses. Ceci a pour conséquence qu'il faut apporter des corrections pour les communications sol / satellite et la navigation par satellite. Le Contenu Total en Electron (TEC) est mesuré en électrons par mètre carré. Par convention 1 Unité TEC :  $TECU = 10^{16}$  électrons  $m^{-2}$ .

Le TEC dans l'ionosphère évolue en fonction du flux EUV, des orages géomagnétiques, de la latitude, des saisons, du cycle de l'activité solaire, ...

<sup>21</sup> En anglais, TEC : Total Electron Content

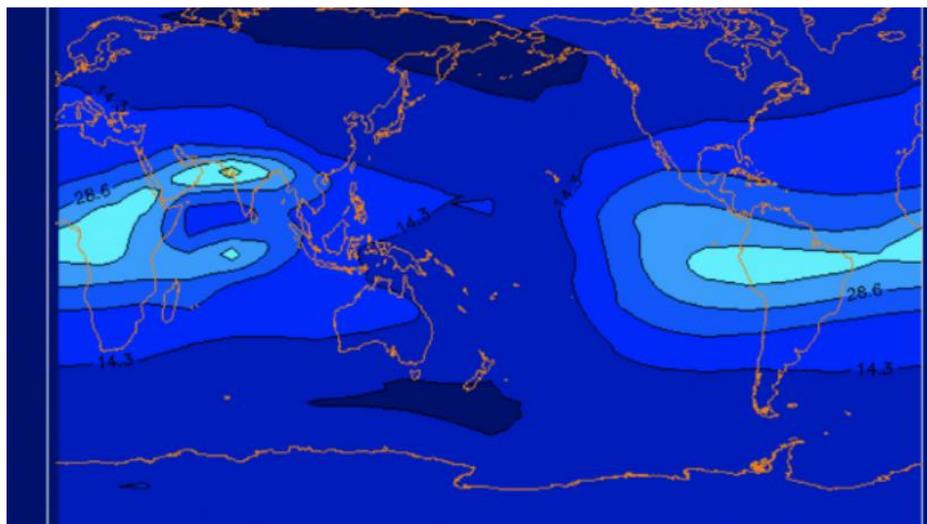


Fig. 66 Exemple de cartographie du TEC. Crédits : SWPC / NOAA

#### 5.4.2 Scintillation ionosphérique

La scintillation ionosphérique est la modification rapide de la puissance et de la phase du signal radio. Elle est due aux structures à petite échelle de l'ionosphère, de quelques dizaines de mètre à quelques dizaines de km, de la densité électronique. Des conditions sévères peuvent empêcher un récepteur GNSS de se verrouiller sur le signal et rendre impossible le calcul d'une position.

La scintillation ionosphérique est quantifiée par deux indices : S4 pour l'amplitude et  $\sigma\phi$  pour la phase.

### 5.5 L'activité géomagnétique

Un orage magnétique est une variation brutale du champ magnétique terrestre (Fig. 55) (Perri, 2019). Il est à l'origine des aurores polaires et de fortes variations de l'induction magnétique dans la croûte terrestre. Ils ont deux sources : les éjections de masses coronales (EMC) ou le vent solaire rapide (avec des CIR/SIR).

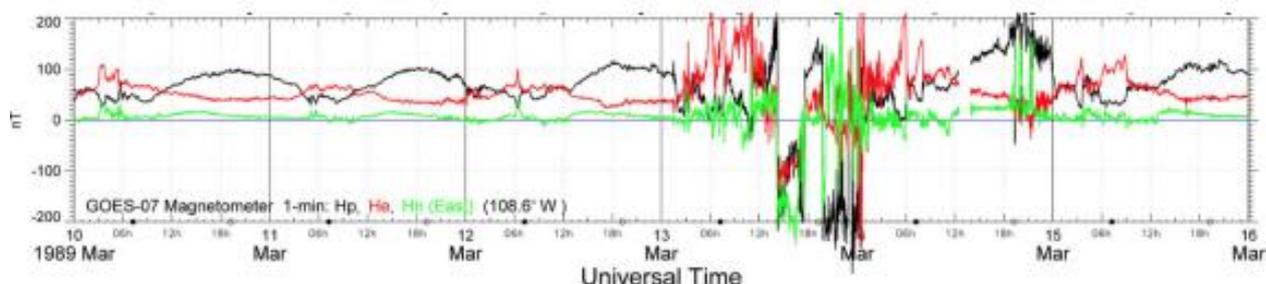


Fig. 55 Perturbation du champ magnétique terrestre mesurée par GOES-7 durant l'orage magnétique de Mars 1989. On voit très clairement la perturbation commencer le 13 mars vers 3h et se finir vers le 15 mars à minuit. Crédits : NOAA.

Les orages magnétiques sont mesurés depuis le début du XIX<sup>ème</sup> siècle dans les premiers observatoires magnétiques terrestres. Par la suite, des réseaux d'observatoires ont été mis en place à différentes latitudes. A partir des mesures des composantes du champ magnétique local en nT, il est calculé un indice  $K$  avec un pas de 3 heures,  $K$  est adimensionnel (Bernoux, 2022). L'indice  $K$  quantifie les perturbations de la composante horizontale du champ magnétique terrestre, il est spécifique à l'observatoire, donc du lieu.

Des différents indices de chaque observatoire il est déduit un indice planétaire,  $K_p$ . L'échelle de  $K_p$  va de 0 (activité géomagnétique très calme) à 9 (activité géomagnétique très perturbée) (Robert, 2023). D'autres indices liés à l'activité géomagnétique sont définis, soit à partir de  $K$ , soit indépendamment, voir la table 11 (Perri, 2009).

| Nom         | Date | Unité              | Méthode   | $\Delta t$ |
|-------------|------|--------------------|---|------------|
| $aa$        | 1868 | nT                 | Dérivé de $K$ mesurés par deux observatoires antipodaux.      | 3 h        |
| $AE$        | 1957 | nT                 | Dérivé des magnétogrammes de l'hémisphère nord.               | 1 min      |
| $am$        | 1959 | nT                 | Dérivé de $K$ à plusieurs longitudes en séparant Nord et Sud. | 3 h        |
| $CK - Days$ | 1868 | ~                  | Dérivé de $aa$ pour calculer le nombre de jours calmes.       | 24 / 48 h  |
| $D - Days$  | 1932 | ~                  | Dérivé de $K_p$ pour donner les 5 jours les plus perturbés.   | 1 mois     |
| $Dst$       | 1957 | nT                 | Déviations à l'équateur du dipôle terrestre.                  | 1 h        |
| $K_p$       | 1932 | ~                  | Moyenne arithmétique de $K$ en échelle quasi-logarithmique.   | 3h         |
| $PC$        | 1975 | mV.m <sup>-1</sup> | Déduit des déviations du champ magnétique aux pôles.          | 1 min      |
| $Q - Days$  | 1932 | ~                  | Dérivé de $K_p$ pour donner les 10 jours les plus calmes      | 1 mois     |

*Tab. 11 Table récapitulative des indices géomagnétiques reconnus par l'AGA (International Association of Geomagnetism and Aeronomy), Classés par ordre alphabétique. Crédits : ISGI*

Les indices les plus utilisés dans les modèles de simulations sont les indices  $K_p$  et  $Dst$ . Le site de l'« International Service of Geomagnetic Indices » explicite et centralise tous ces indices<sup>22</sup>.

Le SWPC / NOAA a défini une échelle de gravité des perturbations géomagnétiques, de G1 à G5, elle est reproduite en annexe 15 ainsi que la fréquence moyenne par cycle.

C'est à partir des flux de particules solaires énergétiques (PSE), des flux de particules cosmiques galactiques (GCR) et des flux particules dans les ceintures de rayonnement ( $e^-$ ,  $p^+$ ) ainsi que les modèles géométriques de l'avion ou du vaisseau spatial que sont calculés les équivalents de dose à l'équipage. Exemple sur la fig. 57<sup>23</sup>

<sup>22</sup> <https://isgi.unistra.fr/>

<sup>23</sup> <https://www.pourlascience.fr/sr/article-partenaire/mieux-estimer-l-exposition-aux-radiations-du-personnel-navigant-25530.php>

## 5.6 La Dosimétrie

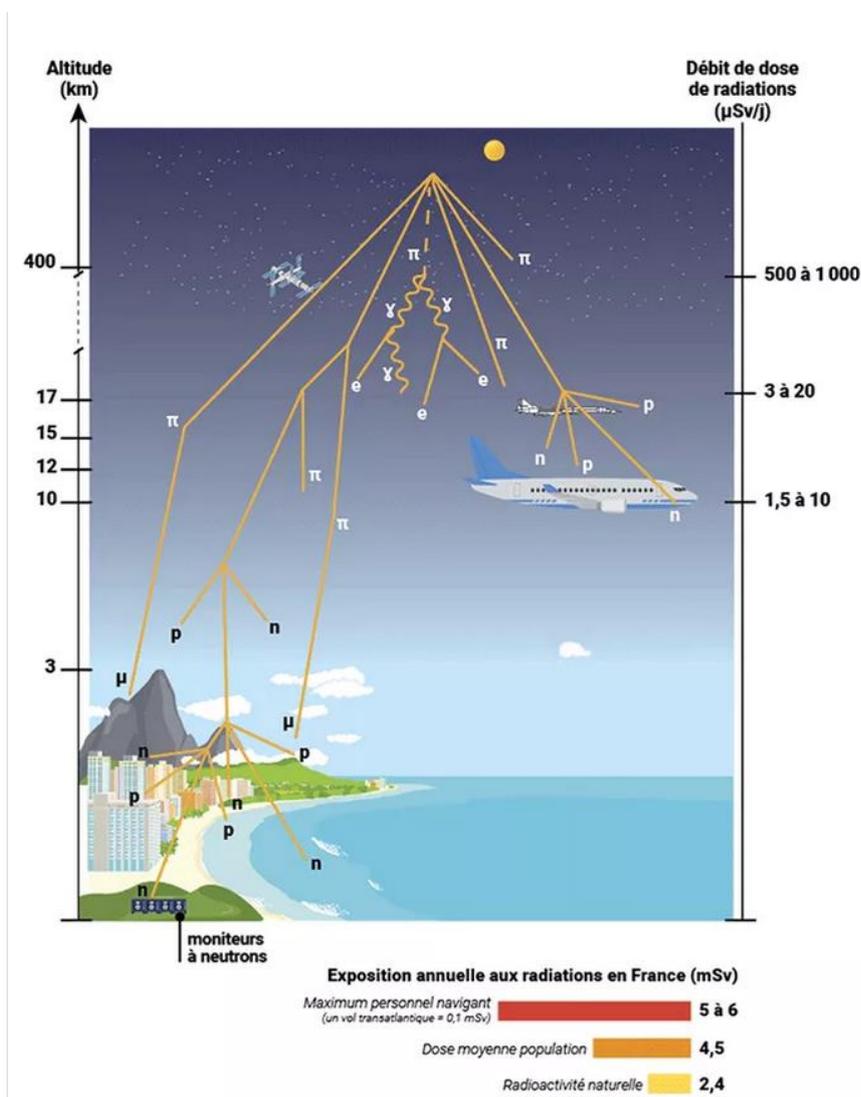


Fig. 57 Dosimétrie externe flash gamma et rayonnement cosmique. IRSN

« Des étoiles, notamment de notre galaxie, à des stades extrêmes (supernovae et pulsars), tout comme les éruptions solaires, produisent une grande quantité de protons (p). De façon permanente pour le rayonnement galactique alors que les éruptions solaires significatives sont rares mais émettent un intense mais bref flux. Les interactions de ces protons avec des atomes de l'atmosphère terrestre engendrent de nouvelles particules sous forme d'une cascade de pions ( $\pi$ ), neutrons (n), électrons (e), de muons ( $\mu$ ), protons, etc. ainsi que des photons gamma ( $\gamma$ ) et X.

Le personnel navigant, exposé à ces radiations qui augmentent avec l'altitude et la latitude, reçoit une dose accrue par rapport à l'exposition moyenne de la population française. La composante galactique de ces radiations est estimée à l'aide de simulations, validées par des mesures en vol, alors que celle qui est liée aux éruptions solaires est modélisée à partir des données de moniteurs à neutrons au sol et d'avions en vol. »

## 5.7 Les Prévisions en météorologie de l'espace

(Perri, 2019)

Après les mesures et observations précédentes, affichées en temps réel sur les sites de météorologie de l'espace, les ressources scientifiques et numériques permettent de faire des prévisions. Dans l'idéal, elles doivent permettre d'anticiper le déclenchement d'un évènement solaire et de déterminer si celui-ci va impacter la terre et quand il va l'impacter.

- Il existe plusieurs travaux sur la formation des éruptions solaires (Amari et al., 2018; Kliem et al., 2013; Shibata et al., 2011). Les simulations attachées à ces travaux sont encore trop peu opérationnelles.
- Il est aussi difficile de prédire si un évènement solaire est géo-effectif ou non, car il est ardu de caractériser la direction de propagation des flux (Siscoe, 2007) ainsi que de modéliser les chocs, les compressions ou l'érosion magnétique (Lavraud and Rouillard, 2013).
- Pour anticiper les orages magnétiques il faut prédire l'arrivée des EMC, les codes actuels ont une erreur de 10 à 12 h sur l'arrivée des particules dans l'atmosphère de la terre (Mays et al., 2015; Zhao and Dyer, 2014)

### 5.7.1 Exemples de prévisions.

- vent solaire (densité et vitesse) avec le modèle WSA Enlil v2.7 – SWPC / NOAA<sup>24</sup>, prévision à 4 jours.

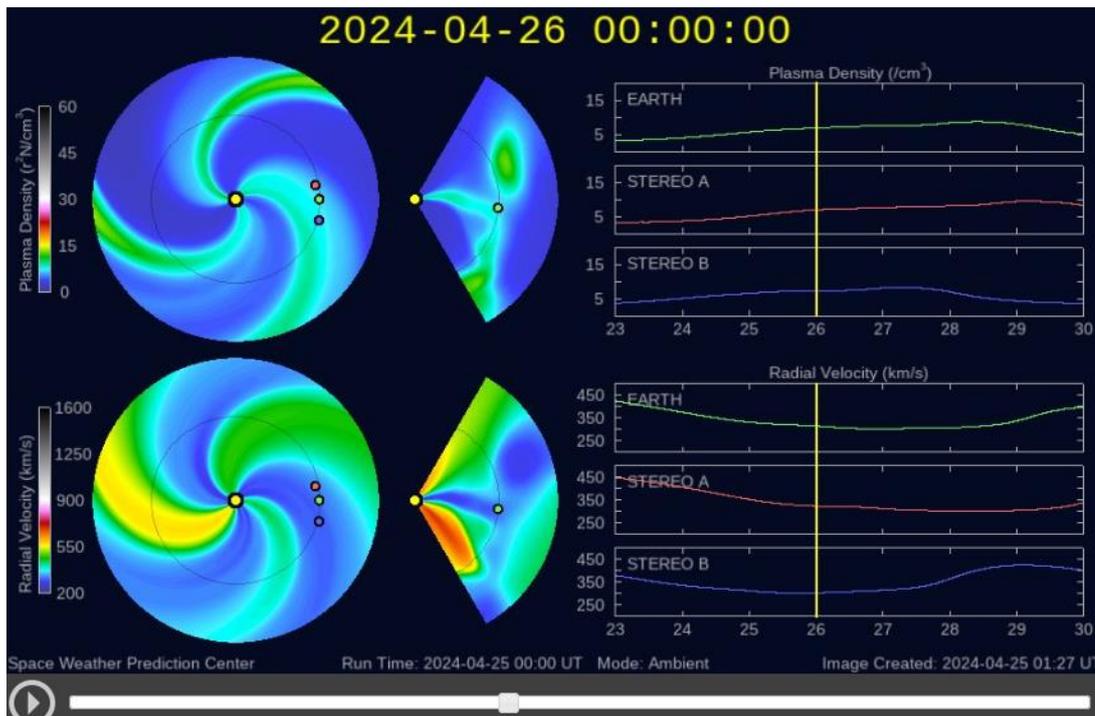


Fig. 58 Exemple de prévision à 4 jours de la « densité » et de la vitesse du vent solaire. NOAA

<sup>24</sup> <https://swe.ssa.esa.int/metoffice-enlil-e-federated> Nota : Il est nécessaire de s'enregistrer

- Les prévisions du nombre de taches mensuelles sont pluriannuelles, elles font l'objet d'un consensus du « Solar Cycle 25 Prediction Panel » regroupement des spécialistes de la discipline, voir annexe 2<sup>25</sup>. Nous pouvons observer que la réalité s'éloigne de la prévision.
- Des prévisions empiriques à quatre jours pour la vitesse du vent solaire ainsi que pour l'indice Dst peuvent être réalisées à partir des surfaces de trous coronaux avec le logiciel ESWF (Empirical Solar Wind Forecasting). Exemples de résultats dans la figure 59.

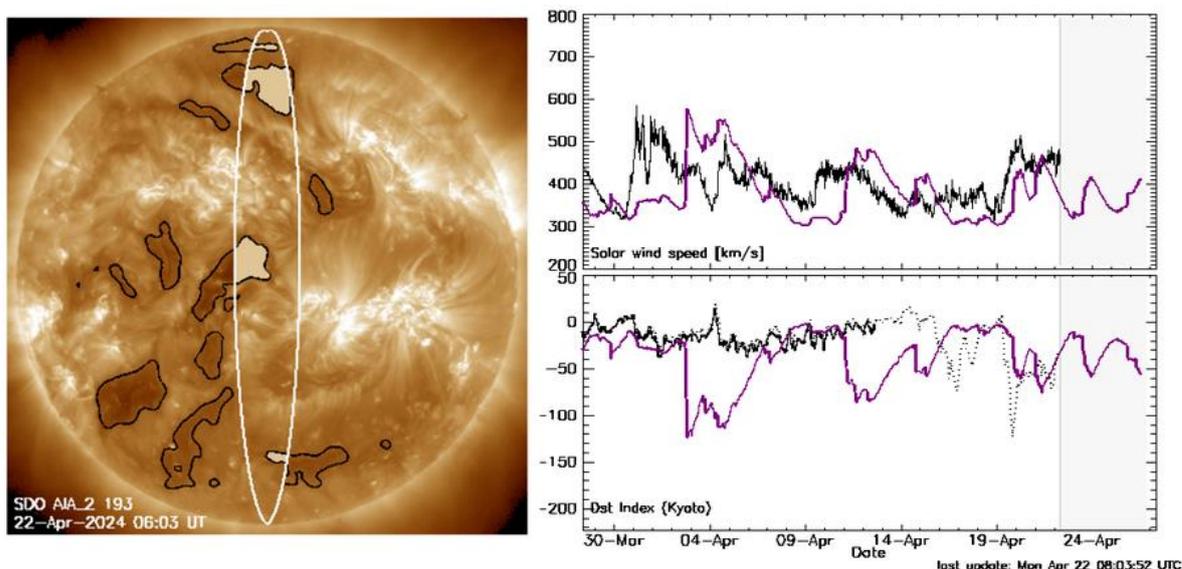
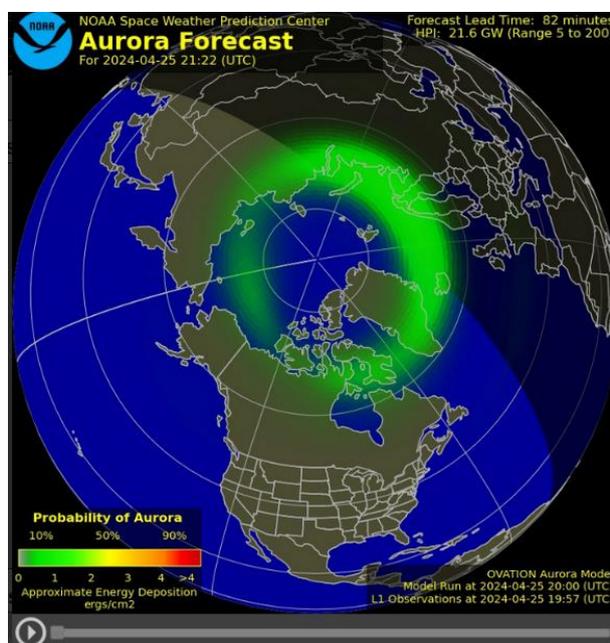


Fig 59 Prévion de la vitesse du vent rapide à 1UA et de l'indice Dst à Kyoto à quelques jours<sup>26</sup>.

- Autre prévision, les aurores boréales, pour 24h<sup>27</sup>.

Fig.60 Prévion pour les aurores Boréales à 24 h. NOAA



<sup>25</sup> <https://www.swpc.noaa.gov/products/solar-cycle-progression>

<sup>26</sup> <https://swe.ssa.esa.int/graz-eswf-federated> Nota : Il est nécessaire de s'enregistrer

<sup>27</sup> <https://www.swpc.noaa.gov/communities/space-weather-enthusiasts-dashboard>

## 6 Conclusions

---

Les enchaînements des phénomènes physiques en jeu sont résumés dans les infographies de l'annexe 16, la météorologie de l'espace, les impacts sur terre et le vent solaire.

Il y a couplage entre les événements solaires transitoires (Eruption solaire, PSE et EMC) et notre technologie via le vent solaire, la magnétosphère, l'ionosphère et le géomagnétisme terrestre. Les champs magnétiques héliosphérique et terrestre y jouent un rôle majeur.

Les énergies en jeu sont très importantes, mais nous sommes protégés par le champ magnétique terrestre et notre atmosphère, mais pas complètement. Notre évolution nous amène aussi à sortir de ces protections, d'évoluer corporellement en dehors et d'utiliser des technologies sensibles, très intégrées. De même, sans sortir de ces protections certaines technologies sont plus sensibles telles que des lignes conductrices de grandes longueurs, sensibles aux effets d'induction, telles aussi que les communications Hautes fréquences ou la navigation par GNSS (Global Navigation Satellite System), il y a donc nécessité de nous protéger.

Pour cela, depuis une quarantaine d'années, une météorologie de l'espace a été mise en place par les nations les plus impactées, essentiellement dans les hautes latitudes, ainsi qu'une coopération internationale. Des instruments dédiés au sol ou dans l'espace surveillent et mesurent des paramètres physiques. Des prévisionnistes utilisent des modèles numériques, essentiellement statistiques, pour donner aux professionnels concernés des évolutions probables d'indices globaux (Echelle NOAA), tels que  $S_N$  (Tempête solaire),  $R_N$  (Panne radio) ou  $G_N$  (Tempête géomagnétique), Cf. annexe 15.

Toutefois les résultats sont encore faibles en termes de fiabilité et d'anticipation, quelques heures à quelques jours suivant l'évènement solaire transitoire. Les modèles d'EMC, d'évolution de groupe de tâches, de champ magnétique solaire sont convenablement décrits mais difficilement prédits. Ce sont des questions toujours ouvertes dans le domaine de la recherche, de même, le chauffage de la couronne, les trous coronaux et le vent rapide, les mécanismes de dissipation d'énergie dans le vent solaire, la turbulence dans le vent solaire, ...

La météorologie de l'espace est une discipline qui évolue en même temps que les connaissances scientifiques. Les conditions physiques stellaires ne sont pas reproductibles en laboratoire et nécessitent donc des moyens satellitaires dédiés toujours plus proches du soleil. Notre astre est le laboratoire pour comprendre dans le détail la physique stellaire, comme notre système solaire est notre laboratoire pour comprendre les systèmes planétaires.

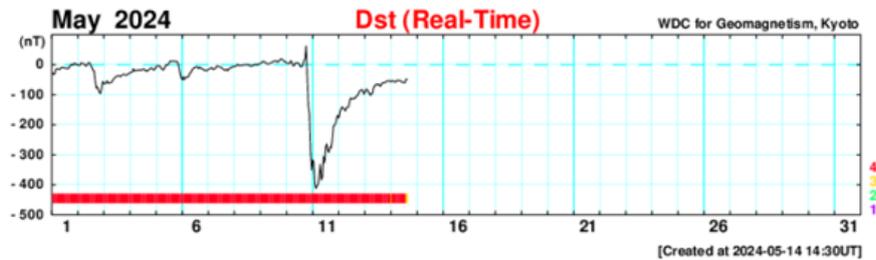
Des domaines de recherche connexes existent et sont explorés pour répondre à des questions telles que :

- La variation des champs magnétiques terrestre et solaire, peuvent-ils avoir une influence significative sur le changement climatique à certaines échelles de temps ? (Courillot et al., 2007)
- Dans quelle mesure le flux entrant de rayons cosmiques piloté par le vent solaire va jouer sur la nébulosité ? (Lilensten et al, 2015)
- Y a-t-il eu par le passé des « super événements » extrêmes et quelles en sont les traces ( $C^{14}$ ,  $B^{10}$ )? (Aulanier, 2013) (Miyake et al., 2021)

## 6.1 Dernières minutes .....

Dans la première quinzaine du mois de mai 2024, des éruptions majeures ont eu lieu en provenance d'une région active (NOAA 13664). Il a été dénombré 65 éruptions de classe M à X, la plus importante étant classée X8.7 le 14 mai. Beaucoup de ces éruptions ont été accompagnées d'EMC, dont certaines en direction de la terre, la conséquence, des orages géomagnétiques jusqu'à un niveau extrême (G5).

« L'orage géomagnétique du 10 au 11 mai a également réussi à se glisser dans le Top 10. En effet, avec l'indice de tempête géomagnétique atteignant une valeur préliminaire de -412 nT le 11 mai, ... » ([WDC Kyoto](#)) » (SIDC – Solar Influences Data Analysis Center – News – Royal Observatory of Belgium)



Comparaison historique des tempêtes solaires avec mai 2024



## Historical Comparison of May 2024 Solar Storms

WHAT: How did the G5 Geomagnetic Storm Compare to Other Major Events?

| <i>Index</i>                 | MAY<br>2024 | OCT<br>2003 | MAR<br>1989 | MAY<br>1921 | SEP<br>1859 |
|------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Disturbance Storm Index (nT) | -412        | -383        | -589        | ~ -907      | ~-1200      |
| $A_p$ -Index                 | 271         | 204         | 246         | NA          | NA          |

Disturbance Storm Index (Dst):

An index of magnetic activity derived from a network of near-equatorial geomagnetic observatories that measures the intensity in space of the ring of westward current around Earth (higher negative values generally correlate with stronger storms)

$A_p$ -Index:

The average from eight daily values gives the  $A_p$ -index of a certain day (every 3-hour K-value - or measure of geomagnetic activity - is converted into a linear scale). Days with higher geomagnetic activity have a higher daily  $A_p$ -value.



Loveland Pass, Colorado, 5/10/24. Credit: Dan McManus, SWPC.



Boulder, Colorado, 5/10/24. Credit: Jon Lash, SWPC.



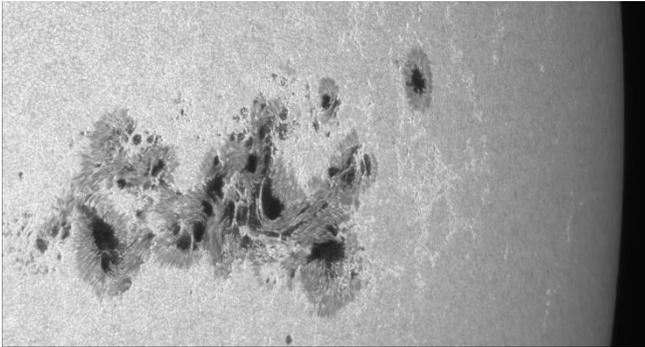
National Oceanic and Atmospheric Administration  
U.S. Department of Commerce

Safeguarding Society with Actionable Space Weather Information

Space Weather Prediction Center  
22 May, 12:30 p.m. EDT

Les impacts sont en cours de recensement.

Quelques photographies et vidéos prises lors des Nuits Astronomiques de Touraine 2024.



Le groupe de taches 3664 à l'origine des EMC



Une nuit magique !

Les liens de deux vidéos : <https://www.youtube.com/watch?v=CollZEQliGk>  
<https://www.youtube.com/watch?v=BSmrhnLph7w>

Et pour en savoir plus :

Solar Influences Data Analysis center - news : <https://www.sidc.be/taxonomy/term/4>

Une fois la poussière retombée ... <https://www.sidc.be/article/when-dust-has-settled>

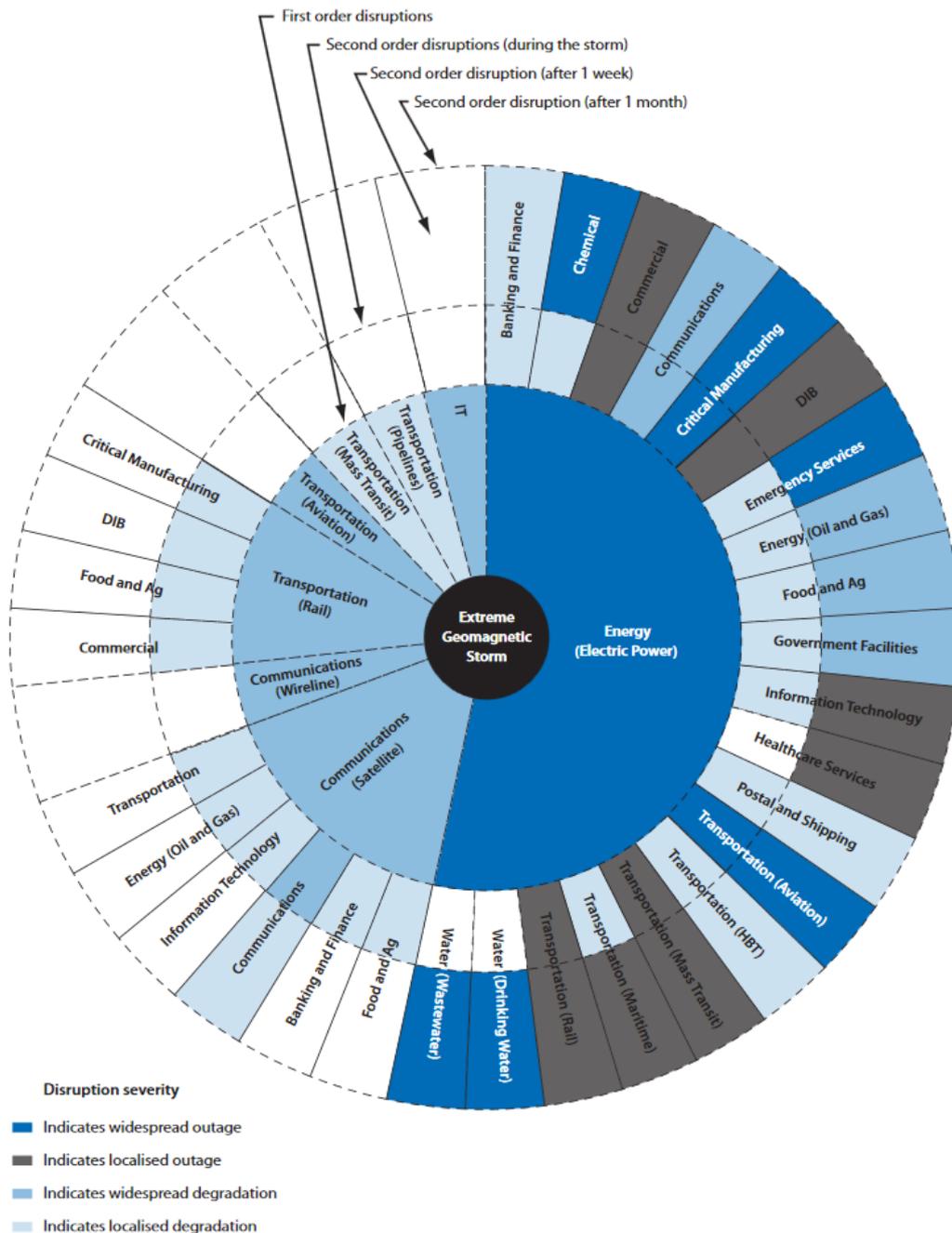
Tempête géomagnétique extrêmement violente ! <https://www.sidc.be/article/extremely-severe-geomagnetic-storm>

Le festival X-class continue! <https://www.sidc.be/index.php/article/x-class-festival-continues>

## 7 Annexes

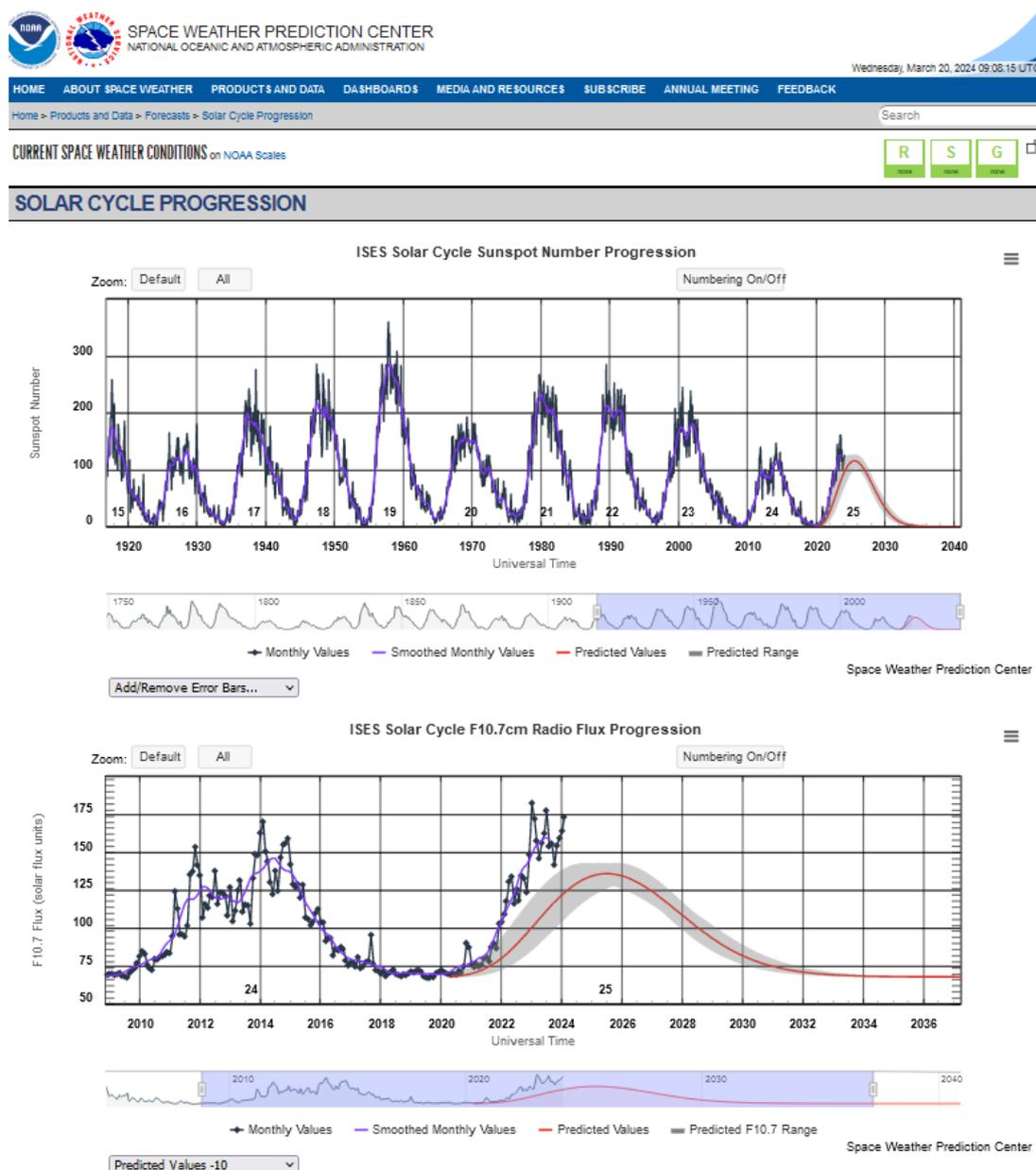
**Nota : Dans ces annexes sont reportées stricto sensu des textes, des images, des formules des ouvrages cités.**

**Annexe 1 Perturbations directes et secondaires sur les infrastructures critiques**  
(Futur Global Shocks - Improving risk governance - OECD Review of Risk Management Policies, 2011).



Indicates widespread outage : Indique une panne généralisée ; Indicates localised outage : Indique une panne localisée ; Indicates widespread degradation : Indique une dégradation généralisée ; Indicates localised degradation : Indique une dégradation localisée

## Annexe 2 Evolution du cycle solaire suivant deux indices



« Les prévisions proviennent du panel de prédiction du cycle solaire représentant la NOAA, la NASA et les services environnementaux spatiaux internationaux (ISES) qui ont été convoqués en 2019. Cela équivaut aux prévisions officielles du cycle solaire 25. Après une sollicitation ouverte, le panel a reçu près de 50 ans de prévisions distinctes pour le cycle solaire 25 de la communauté scientifique. Les méthodes de prédiction comprennent une variété de modèles physiques, de méthodes précurseurs, d'inférence statistique, d'apprentissage automatique et d'autres techniques. La prédiction publiée par le panel est une synthèse de ces contributions communautaires.

Le panneau de prédiction a prédit le cycle 25 pour atteindre un maximum de 115 survenant en juillet 2025. Les barres d'erreur sur cette prédiction signifient que le panneau s'attend à ce que le maximum du cycle pourrait se situer entre 105-125, le pic survenant entre novembre 2024 et mars 2026 ».

**Mais l'on voit que nous sommes déjà en dehors de la prédiction !**

## Annexe 3 Le plasma

(Savoini, 2011)

« Le terme « Plasma » a été introduit dans un premier temps pour désigner un gaz ionisé (observé dans les tubes à décharges) dont la principale propriété était d'être globalement neutre. Par la suite, ce terme a été utilisé en astrophysique pour désigner un état dilué de la matière, analogue à celui d'un gaz, mais principalement constitué de particules chargées (électrons + ions) en proportions égales. Les plasmas se confondent donc avec les gaz ionisés et font suite dans l'échelle des températures, aux trois états « classique » : solides, liquides et gaz. Ils constituent donc un quatrième état de la matière bien qu'il n'existe aucune transition de phase entre gaz et plasmas. ... »

« ... Grâce à des techniques nouvelles, (hyperfréquences puis lasers) les paramètres fondamentaux des plasmas : densité, température, fréquence de collisions, ont pu être déterminés avec précision. Le développement de la radioastronomie puis de la recherche spatiale a permis de découvrir que notre environnement proche et lointain est essentiellement constitué de plasma. L'environnement terrestre (ionosphère, magnétosphère, vent solaire, couronne solaire, ...) en sont des exemples frappants. De manière plus générale, la physique des plasmas joue un rôle considérable dans toute l'astrophysique et la cosmologie, on pense que l'univers (NDR, visible) est constitué de matière à l'état de plasma ... ».

**Un plasma est un milieu constitué de particules chargées, de champs électriques et de champs magnétiques en étroites interactions.** Le milieu est globalement neutre.

Le taux d'ionisation ( $\tau$ ) a une grande dynamique entre 0 (gaz neutre non ionisé) et 1 (gaz complètement ionisé).

$$\tau = \frac{n_i}{n_n + n_i}$$

Avec  $n_i$  la concentration de gaz ionisé et  $n_n$  la concentration de gaz neutre

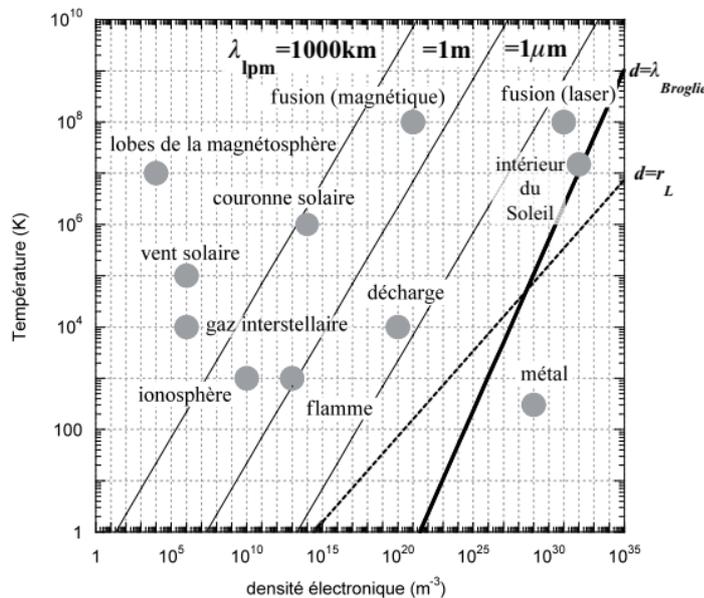


Fig. 1.3 Répartition densité-température de quelques plasmas.

Les droites en traits pleins représentent la valeur du libre parcours moyen  $\lambda_{lpm}$  des électrons. La droite en traits pointillés épais représente la distance pour lesquels la distance interparticulaire est égale à la longueur de Landau et la droite en traits pleins épais représente la limite quantique associée à la longueur de DeBroglie.

## Annexe 4 Les équations de la MHD

(Canou, 2011) « Elles permettent le couplage (non-linéaire) de la densité de matière  $\rho$ , de la vitesse du plasma  $v$  et du champ magnétique  $B$ . Elles ressemblent beaucoup à la formulation du domaine de l'hydrodynamique avec quelques équations supplémentaires nécessaires pour traiter la présence du champ magnétique et ses relations avec les autres quantités physiques.

Formellement, les équations MHD doivent être obtenues à partir des équations de la théorie cinétique décrivant les différentes espèces présentes dans le plasma. Les équations de la MHD résistive sont :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\nabla \cdot (\rho v) \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} = -\rho(v \cdot \nabla)v + \frac{1}{c}j \times B - \nabla p + D(v) + \rho g \quad (2)$$

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \nabla \times (v \times B) - \nabla \times (\eta j) \quad (3)$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{p}{\rho^\gamma} \right) = 0 \quad (4)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (5)$$

Où  $\rho$  : La densité de matière ;  $v$  : la vitesse du plasma ;  $B$  : le champ magnétique ;  $p$  : la pression et  $g$  l'attraction gravitationnelle.  $c$ ,  $\eta$  et  $\gamma$  sont, respectivement, la vitesse de la lumière, la résistivité du plasma et l'index adiabatique du plasma.  $D(v)$  est la force visqueuse.

- Les équations (1) et (2) représentent les équations de conservation de la masse et de la quantité de mouvement.
- L'équation (3) est l'équation d'induction, elle décrit l'évolution du champ magnétique, elle est obtenue à partir de l'équation de Maxwell-Faraday en régime MHD.

$$\frac{\partial B}{\partial t} = -c \nabla \times E \quad (6)$$

- La densité de courant  $j$  est donnée par l'équation de Maxwell-Ampère :

$$\frac{4\pi}{c} j = \nabla \times B \quad (7)$$

- Et le champ électrique suit la loi d'Ohm résistive :

$$E = -\frac{1}{c} v \times B + \eta j \quad (8)$$

Il est possible de définir certaines grandeurs caractéristiques. Ainsi, en prenant comme valeurs caractéristiques  $L_0$ ,  $\rho_0$ ,  $v_0$  et  $B_0$  pour les longueurs, la densité, la vitesse du plasma et le champ magnétique, on peut définir : La vitesse d'Alfvén, qui correspond à une onde transverse.

$$v_A = \frac{B_0}{(4\pi\rho_0)^{\frac{1}{2}}}$$

Le nombre d'Alfvén-Mach

$$M_A = \frac{v_0}{v_A}$$

Et le nombre de « Reynolds magnétique »

$$R_m = \frac{4\pi}{c^2} \frac{L_0}{\eta} v_0$$

## Annexe 5 Paramètre plasma $\beta$

(G. Belmont, L. Rezeau, C. Riconda, A. Zaslavsky, 2018) (Lilensten and Bornarel, 2001)

(B. Perri, 2019) (Poirier, 2022)

« L'influence du champ magnétique sur le plasma est donnée par le rapport de la pression thermique (cinétique) du plasma et de la pression magnétique :

$$\beta = \frac{nk_B T}{B^2/2\mu_0}$$

« La valeur de ce paramètre sans dimension donne une indication sur les effets qui dominent la dynamique du plasma.

- Lorsque  $\beta \ll 1$ , les effets liés à la force de Laplace dominent et c'est la topologie du champ magnétique, imposée par ses conditions aux limites, qui va déterminer la répartition spatiale du plasma et son évolution.
- Lorsque  $\beta \gg 1$ , La pression thermique domine. La dynamique du plasma se rapproche alors de celle d'un fluide neutre, et la forme des lignes de champ magnétique est imposée (via la loi d'Ohm) par le mouvement du fluide. »

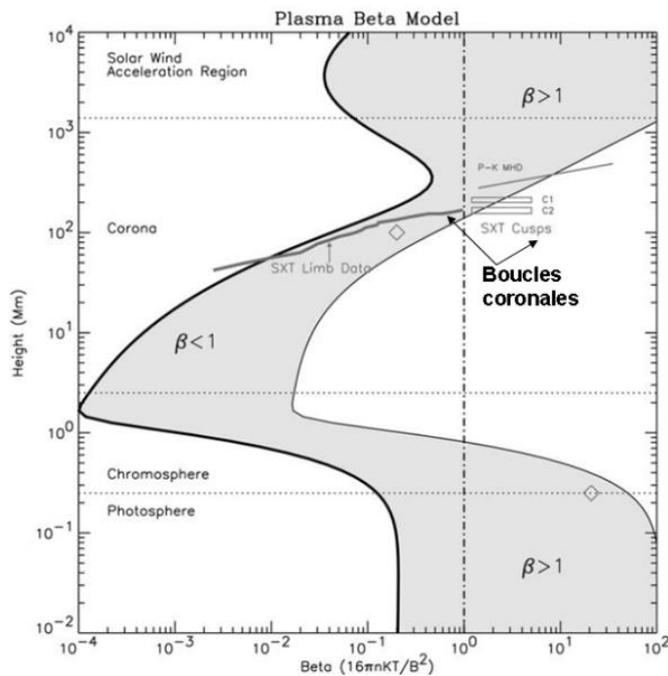


Fig. 61 Evolution du paramètre plasma  $\beta$  en fonction de la hauteur (Noraz, 2022) (Gary 2001)

« Un exemple d'environnement de petit nombre  $\beta$  est fourni par le plasma de la couronne solaire, dans lequel le champ magnétique est intense ( $B \sim 100$  mT) et la densité de particules relativement faible ( $n \cong 10^9$  cm<sup>-3</sup>). Le paramètre  $\beta$  est alors de l'ordre de «  $\beta \sim 10^{-4}$  ». On voit sur la figure 62 que la répartition spatiale du plasma y semble totalement déterminée par la configuration des boucles de champs magnétiques issues de la surface solaire. »



Fig. 62 Boucles coronales (source : image réalisée par le satellite TRACE, NASA)

## Annexe 6 Extension du vent solaire

(Robert, 2023) (D'après Pisacane – 2008 ; Bothmer and Daglis – 2007) ; Lilensten and bleyly -2000).

“Le vent solaire a été identifié par E.N. Parker qui apporta une solution aux équations de continuité (1) et de conservation du moment dans un fluide (2) décrit par la théorie classique :

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \rho u r^2 \quad (1)$$

$$\rho u \frac{du}{dr} = - \frac{d\rho}{dr} - \rho \frac{GM_{\odot}}{r^2} \quad (2)$$

Avec  $r$  la distance héliocentrique,  $\rho$  la masse volumique,  $u$  la vitesse d'écoulement,  $G$  la constante gravitationnelle et  $M_{\odot}$  la masse du Soleil.

E.N. Parker proposa que  $\rho u r^2 = \text{constante}$ , il en découla l'équation différentielle de  $u(r)$

Dans une atmosphère isotherme en expansion :

$$\left( u^2 - \frac{2kT}{m} \right) \frac{1}{u} \frac{du}{dr} = \frac{4kT}{mr} - \frac{GM_{\odot}}{r^2}$$

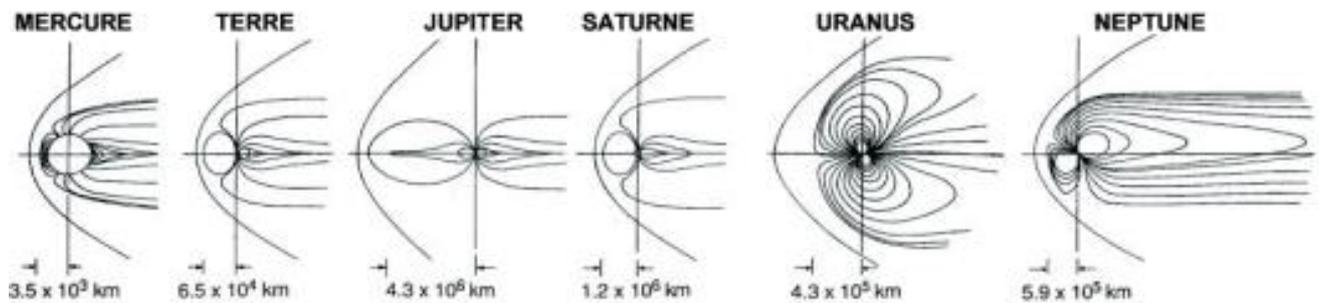
C'est en partant des hypothèses que  $r = r_c$  où  $r_c$  est un rayon critique, et de

$$u^2 - \frac{2kT}{m} = 0$$

Qu'E.N. Parker montra que la couronne solaire est en expansion supersonique continue.

Cette expansion de la couronne solaire formerait « le vent solaire » qui emporterait avec lui la structure magnétique du soleil dans l'espace interplanétaire ».

## Annexe 7 Dimensions comparées des magnétosphères planétaires (Zarka, 2007)



### 3 - Dimensions comparées des magnétosphères planétaires.

Adapté de Kivelson, M. G. & C. T. Russell, eds., *Introduction to Space Physics*, Cambridge University Press, 1995 (Chap. 15, The magnetospheres of the outer planets, C.T. Russell & R.J. Walker)

Quelques dimensions comparées des magnétosphères planétaires

|  | Mercure                           | Terre                | Jupiter                          | Saturne                           | Uranus                            | Neptune                          |
|--|-----------------------------------|----------------------|----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| Rayon planétaire ( $R_p$ , km)                 | 2 439                             | 6 378                | 71 492                           | 60 268                            | 25 559                            | 24 764                           |
| Rayon de l'orbite (UA)                         | 0,39                              | 1                    | 5,2                              | 9,5                               | 19,2                              | 30,1                             |
| Période de rotation (h,m)                      | 1407 <sup>h</sup> 30 <sup>m</sup> | 24 <sup>h</sup>      | 9 <sup>h</sup> 55,5 <sup>m</sup> | 10 <sup>h</sup> 39,4 <sup>m</sup> | 17 <sup>h</sup> 14,4 <sup>m</sup> | 16 <sup>h</sup> 6,6 <sup>m</sup> |
| Moment dipolaire magnétique ( $G \cdot km^3$ ) | $5,5 \times 10^7$                 | $7,9 \times 10^{10}$ | $1,6 \times 10^{15}$             | $4,7 \times 10^{13}$              | $3,8 \times 10^{12}$              | $2,2 \times 10^{12}$             |
| Champ magnétique à l'équateur (G)              | 0,003                             | 0,31                 | 4,3                              | 0,21                              | 0,23                              | 0,14                             |
| Inclinaison [ $B, \Omega$ ] ( $^\circ$ )       | +14                               | +11,7                | -9,6                             | -0                                | -58,6                             | -46,9                            |
| Champ mag. du vent solaire (nT)                | 10 (20)*                          | 4                    | 0,8                              | 0,4                               | 0,2                               | 0,13                             |
| Rayon magnétopause, ( $R_{MP}/R_p$ ) calculé   | 1,4                               | 9                    | 40                               | 17                                | 22                                | 21                               |
| Rayon magnétopause, ( $R_{MP}/R_p$ ) [mesuré]  | -1,5                              | -10                  | -90                              | -20                               | -18                               | -23                              |
| d.d.p due à la convection (kV)                 | 7                                 | 46                   | 900                              | 90                                | 17                                | 14                               |
| d.d.p due à la corotation (kV)                 | 0,002                             | 90                   | 400 000                          | 12 000                            | 1 500                             | 1000                             |
| $R_{PS}/R_{MP}$ (lire texte)                   | 0,01 - 0,02                       | 0,3 - 0,8            | ~ 4                              | 2 - 4                             | 0,9 - 4                           | 1 - 3                            |

\* - Du fait de l'orbite très elliptique

- NDLR :  $1G = 10^{-4}T$ ,  $1nT = 10^{-9}T$

## Annexe 8 L'onde de choc terrestre

(Gruet, 2018), Chap. 2, § 2.1

« C'est au tout début des années soixante qu'émerge pour la première fois l'idée que l'interaction du vent solaire avec la magnétosphère de la Terre puisse générer une onde de choc en amont de l'environnement terrestre. Cette hypothèse est confirmée peu après avec les premières observations in situ de cette onde de choc par les sondes Mariner 2 et IMP.

Cette onde de choc est définie par différentes vitesses caractéristiques explicitées dans le tableau 1. Elle résulte de l'interaction d'un fluide s'écoulant à une vitesse supérieure à l'une des vitesses caractéristiques du milieu avec un obstacle immobile. Ces vitesses sont celles des ondes générées par une perturbation (comme un obstacle) qui annoncent aux particules de ce fluide son approche, leur permettant ainsi de se réorganiser en fonction de cette perturbation.

Tableau 1 – Vitesses caractéristiques et nombre de Mach en milieu neutre et ionisé.

| Fluide neutre   | Milieu ionisé   | Milieu ionisé  |
|---|---|--|
| Vitesse du son<br>[m.s <sup>-1</sup> ]  | Vitesse d'Alfvén<br>[m.s <sup>-1</sup> ]  | Vitesse magnétozonore rapide (V <sub>r</sub> ) et lente (V <sub>l</sub> )<br>[m.s <sup>-1</sup> ]  |
| $C_S = \sqrt{\gamma K_B T / m}$<br>Y est l'indice polytropique <sup>28</sup> du milieu, K <sub>B</sub> la constante de Boltzmann, T la température et m la masse moyenne des particules | $V_A = B / \sqrt{\mu_0 \rho}$<br>B est l'amplitude du champ magnétique, μ <sub>0</sub> la perméabilité du vide et ρ la masse volumique du plasma. | $V_{r,l} = \frac{1}{2} * (C_S^2 + V_A^2) \pm \frac{1}{2} \sqrt{(C_S^2 + V_A^2)^2 - 4C_S^2 V_A^2 \cos^2 \theta_{KB}}$<br>où le signe + correspond au mode rapide (V <sub>r</sub> ) et – au mode lent (V <sub>l</sub> ). θ <sub>KB</sub> est l'angle entre le champ magnétique et la direction de propagation des ondes. |
| Nombre de Mach sonique  | Nombre de Mach alfvénique   | Nombre de Mach magnétozonore   |
| $M_S = V / C_S$   | $M_A = V / V_A$   | $M_{ms} = V / V_{r,l}$   |
| <b>V vitesse de l'écoulement dans le référentiel de l'obstacle</b>  |   |  |

Le vent solaire s'approchant de la Terre avec une vitesse principalement super-alfvénique, une onde de choc doit se former pour permettre la déflexion de l'écoulement du plasma autour de l'obstacle que constitue la magnétosphère terrestre. On parle alors de formation de choc d'étrave ».

<sup>28</sup> un **processus polytropique** est une transformation réversible impliquant un transfert thermique (échange de chaleur) partiel entre le système étudié et son extérieur. (Wikipédia)

## Annexe 9 La force de Lorentz

(Techno-Science.net Wikipédia, n.d.)

Le champ électromagnétique exerce sur une particule possédant une charge électrique  $q$  la force :

- $\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \wedge \vec{B}$

Où

$\vec{F}$  est la Force électromagnétique ou Force de Lorentz, en Newton,

$q$  est la charge de la particule en Coulomb,

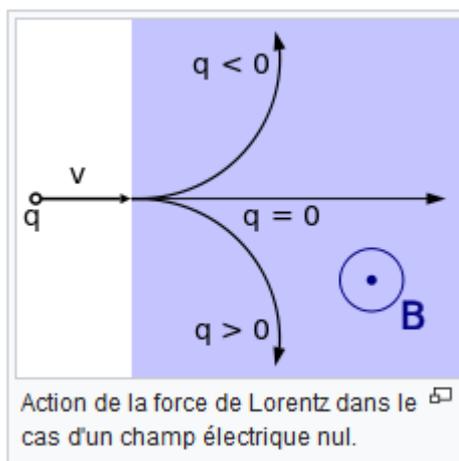
$\vec{E}$  est le champ électrique, en volt par mètre,

$\vec{v}$  est la vitesse de la particule, en mètre par seconde,

$\vec{B}$  est le champ magnétique, en Tesla.

Tous mesurés dans le même référentiel galiléen au point où se trouve la particule.

- Soit la force magnétique qu'on appelle généralement force de Laplace, dont l'expression est :  
 $\vec{F} = q\vec{v} \wedge \vec{B}$ , deuxième terme de l'expression précédente en l'absence de champ électrique.



## Annexe 10 Limite de la magnétopause

(Benacquista, 2017) Chap. 1, § 1.3.2.2

« Une fois dans la magnétogaine, les particules chargées vont poursuivre leur propagation en direction de la Terre et les effets de son champ magnétique se feront plus en plus ressentir. On appelle magnétopause, la limite à laquelle la pression du vent solaire égale celle de la magnétosphère :

$$P_{SW} = P_{MG}$$

(Avec  $P_{SW}$  : Pression du vent solaire (Solar Wind),  $P_{MG}$  : Pression de la magnétosphère)

Puisque le plasma dans le vent solaire et la magnétosphère est très peu dense, la pression thermique peut être négligée. D'autre part, le courant de magnétopause induit un champ magnétique qui double la valeur du champ magnétique à l'intérieur de la magnétopause.

$$\rho V^2 = \frac{(2B)^2}{2\mu_0}$$

Où  $\rho$  et  $V$  respectivement la masse volumique et la vitesse du vent solaire,  $\mu_0$  la perméabilité magnétique du vide ( $1,256 \cdot 10^{-6} \text{ NA}^{-2}$ ) avec

$$B = B_0 \left( \frac{R_T}{r} \right)^3$$

on obtient la position de la magnétopause :

$$r = \left( \frac{2B_0^2}{\mu_0 \rho V^2} \right)^{\frac{1}{6}} R_T$$

Où  $r$  est La position de la magnétopause (en  $km$ ),  $R_T = 6371 \text{ km}$  est rayon terrestre et  $B_0$  l'amplitude du dipôle magnétique terrestre à l'équateur magnétique. A l'extérieur de cette limite, la dynamique du vent solaire domine tandis qu'à l'intérieur, dans la magnétosphère, c'est le champ magnétique Terrestre qui établit le mouvement des particules chargées. Du côté jour, cette frontière se situe autour de  $10 R_T$  même si cette distance est hautement variable puisqu'elle dépend à la fois de la vitesse des particules ( $1/V^2$ ) et de leur densité. Côté nuit, la limite s'étend sur une centaine de rayons terrestres.

...

La magnétopause définit la limite externe de la magnétosphère. Lorsque le champ magnétique du vent solaire possède une composante  $Z$  négative, les particules peuvent rentrer à l'intérieur de la magnétosphère via le phénomène de reconnexion ».

## Annexe 11 Giration, rebond et dérive dans les ceintures de radiations

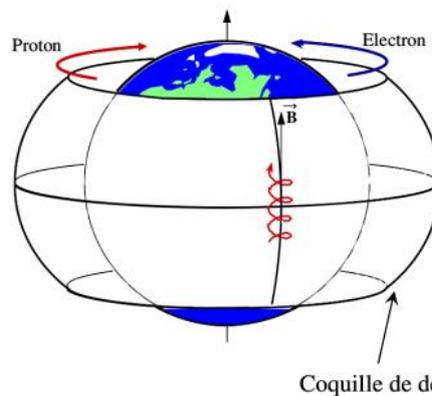
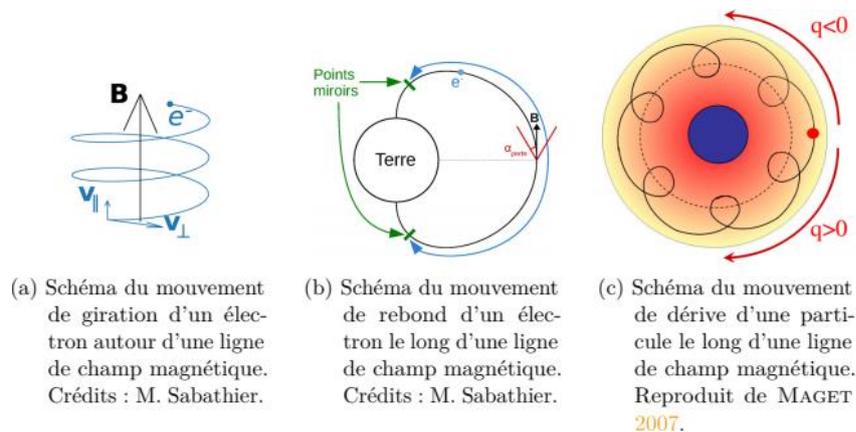
(Bernoux, 2022b) § 1.2.1.4

« ... le mécanisme de piégeage des particules dans les ceintures de radiation peut être décomposé en trois mouvements: La giration, le rebond et la dérive, schématisés sur les figures ci-après. La giration (a) est un mouvement de rotation périodique décrit par une particule chargée autour d'une ligne de champ magnétique (au sein d'un champ électromagnétique pour lequel on peut négliger la composante électrique – au moins en première approximation). Le rebond (b) est un mouvement le long de la ligne de champ, dans lequel la particule va osciller entre deux points miroirs dans chaque hémisphère. Le mouvement de rotation azimuthal dans un plan perpendiculaire à l'axe du dipôle magnétique (Belmont et al. 2013). L'ensemble de ces mouvements forme alors une coquille de dérive (d), qui donne la forme toroïdale des ceintures de radiations. ... »

Tableau 1.3 Période de giration, de rebond et de dérive pour des électrons et de protons de 1 MeV à environ  $2 R_T$  du centre de la Terre. Reproduit de Herrera 2017

| Mouvement | Période associée (s)  |                       |
|-----------|-----------------------|-----------------------|
|           | Electrons             | Protons               |
| Giration  | $\approx 3.10^{-5}$   | $\approx 2.10^{-2}$   |
| Rebond    | $\approx 1,4.10^{-1}$ | $\approx 2,7$         |
| Dérive    | $\approx 1,8.10^3$    | $\approx 1,2.10^{-3}$ |

... La dynamique des ceintures de radiations est dictée par les arrivées et les pertes de particules, qui sont dues à différents processus physiques ayant quasiment tous pour point commun d'être liés à l'activité géomagnétique ». Représentations schématiques des trois mouvements : »



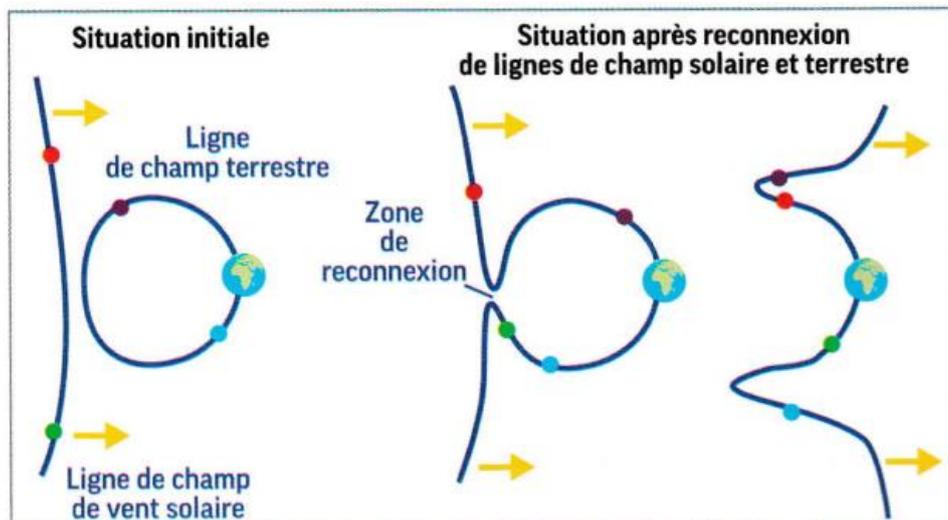
(d) Schéma du mouvement global d'une particule piégée, formant une coquille de dérive. Reproduit de MAGET 2007.

## Annexe 12 Reconnexion magnétique dans la magnétosphère terrestre

(Mottez, 2017b) Chap. 4 Fig.14

Principe du phénomène

*Fig.14 Reconnexion magnétique entre ligne de champ du vent solaire et ligne de champ magnétique terrestre*



« À gauche, situation avant la reconnexion. Au milieu et à droite, après la reconnexion. La ligne de champ magnétique du vent solaire se propage vers la droite (flèches jaunes). Au cours de la reconnexion (Dessin du milieu), les deux lignes de champ se mêlent très localement, produisant deux lignes connectées à une extrémité au vent solaire, et à l'autre à la Terre. Après la reconnexion, des particules qui se trouvaient auparavant sur une même ligne de champ {particules rouge et verte, et particules bleue et violette sont à présent séparées. »

(Bernoux, 2022) § 1.2.2.1 La convection magnétosphérique.

« On observe que le plasma contenu dans la magnétosphère effectue des mouvements d'advection<sup>29</sup> à grand échelle, parfois appelé convection magnétosphérique. Dungey (1961) a expliqué ce phénomène en termes de reconnexion magnétique. Cette reconnexion magnétique survient au cours d'un cycle (appelé cycle de Dungey) qu'on pourrait décomposer en trois étapes ;

- La première étape consiste en la scission de lignes de champ magnétique interplanétaire (IMF) et leur connexion à des lignes de champ géomagnétique du côté jour, ce qui crée une brèche dans le bouclier magnétique terrestre. Cette brèche va faire descendre la position de la magnétopause, ce qui peut libérer des particules jusqu'alors piégées dans la cavité magnétosphérique. Les lignes de champ géomagnétique dans le secteur jour de la magnétosphère étant orientées vers le nord, la connexion entre les lignes de l'IMF et de la magnétosphère est d'autant plus forte que la composante verticale de l'IMF est orientée vers le sud.
- Au cours de la deuxième étape, le vent solaire repousse les lignes de champ nouvellement reconnectées en direction du côté nuit de la magnétosphère, vers la queue magnétosphérique.

<sup>29</sup> L'advection est le transport de chaleur, de matière, etc (d'une propriété du milieu) ... à la vitesse du milieu environnant

L'empilement ainsi créé des lignes de champ dans la queue va les pousser en direction du feuillet de plasma.

- Les lignes de champ du côté nord et sud de la queue magnétosphérique peuvent alors à leur tour se reconnecter côté nuit. La nouvelle boucle, étirée, va se replier en direction de la Terre, perturbant au passage les différents courants constituant la magnétosphère. Les particules ainsi amenées dans la magnétosphère interne vont pouvoir dériver longitudinalement jusqu'au côté jour, bouclant ainsi le cycle. La figure 1.21 schématise ce phénomène de convection magnétosphérique. »

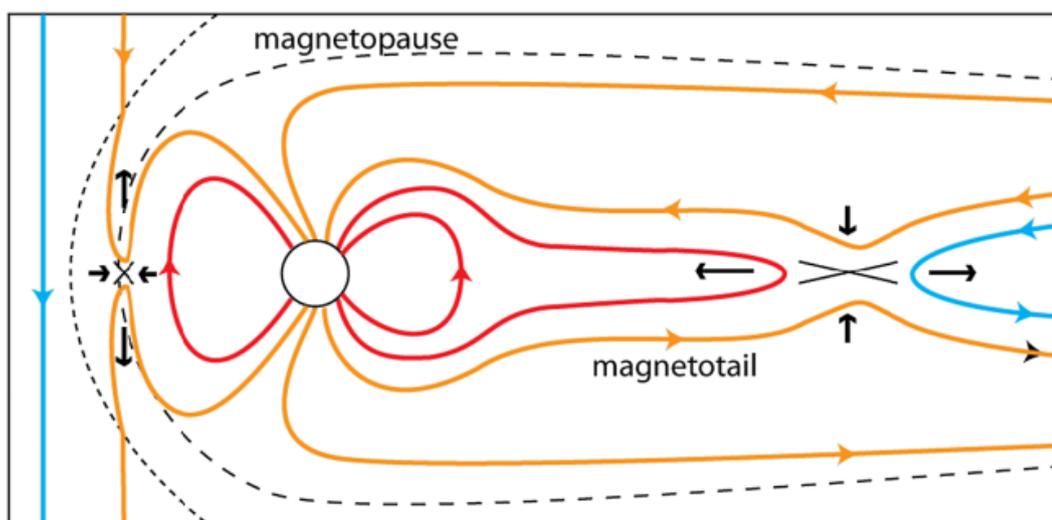


Figure 1.21 – Schéma de la circulation de plasma dans la magnétosphère terrestre selon le modèle du cycle de Dungey. Les croix désignent les zones où les reconnections magnétiques du côté jour et du côté nuit ont lieu. Reproduit de Eastwood et al. 2017, sous licence CC BY 4.0. »

« La convection magnétique est un des processus par lequel l'énergie du vent solaire pénètre la magnétosphère et est à l'origine des sous orages et des orages géomagnétiques. »

Vidéo de reconnexion suivie par ARTEMIS

<https://www.nasa.gov/missions/artemis/artemis-meet-artemis-pursuing-sun-science-at-the-moon/>

Variation modélisée du champ magnétique terrestre :

[https://fr.wikipedia.org/wiki/Champ\\_magn%C3%A9tique\\_terrestre](https://fr.wikipedia.org/wiki/Champ_magn%C3%A9tique_terrestre)

Modélisation de la reconnexion magnétique

<https://svs.gsfc.nasa.gov/4188/>

## Annexe 13 Couches atmosphériques et ionosphériques

(J.Lilensten, F. Pitout, M.Gruet, J.P. Marques, 2021)

« L'ionosphère est la partie de l'atmosphère composée d'ions et d'électrons libres. Elle est divisée en couches selon la concentration en électrons libres qu'on y trouve et des propriétés du plasma. La couche D se situe autour de 70-90 km d'altitude, dont l'ionisation provient des particules cosmiques ou des photons X très énergétiques. Une partie de l'ionisation provient aussi de la désintégration des météores. Entre 90 et 120 km environ se trouve la couche E, la plus conductrice de courants électriques. Au-dessus, la couche F, la plus dense. »

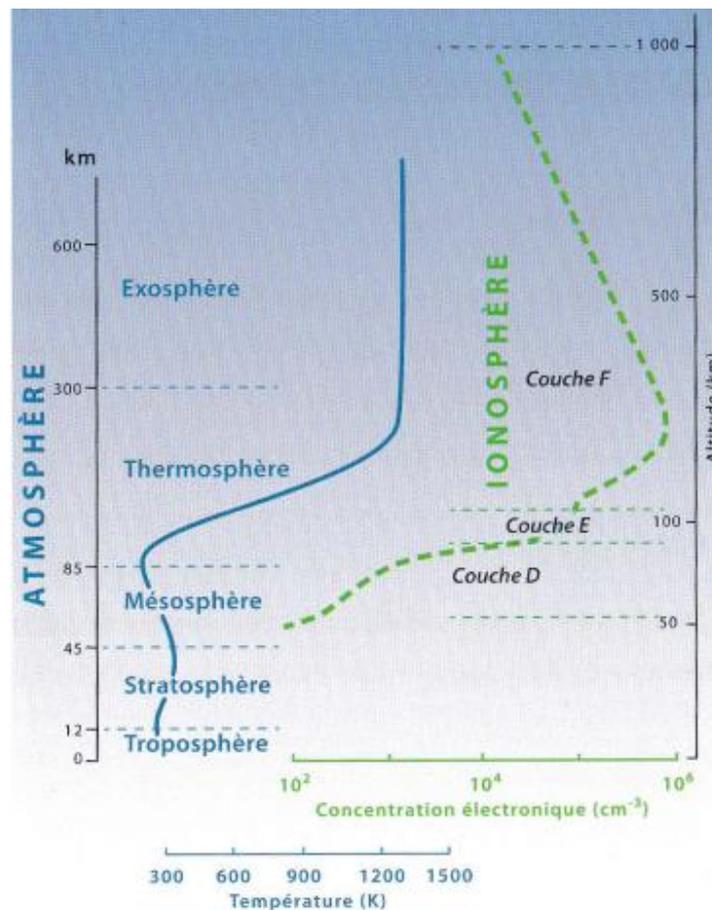
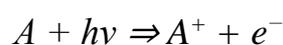


Figure 20 : Les différentes couches atmosphériques (en fonction de la température des espèces neutres) et ionosphériques (en fonction de la concentration électronique).

(Lointier, 2008) Chap.1 §1.1

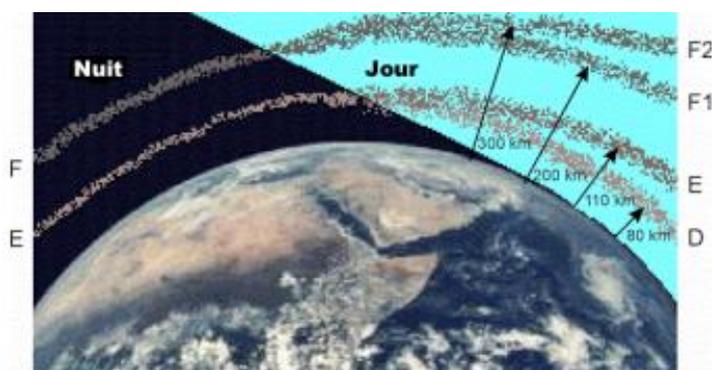
« La formation d'une ionosphère requiert deux ingrédients : une atmosphère neutre et des sources d'ionisation. La source principale d'ionisation est la photo-dissociation des espèces neutres par les radiations ultraviolettes (UV), ultraviolet extrême (EUV) et X provenant du Soleil. Ce rayonnement excite les espèces neutres des couches supérieures de l'atmosphère libérant ainsi un électron et un ion positif.



Où  $A^+$  est l'ion positif associé à l'espèce chimique  $A$ ,  $h$  la constante de Planck et  $\nu$  la fréquence de la radiation. Les précipitations de particules énergétiques contribuent également au processus d'ionisation pour certaines régions de l'ionosphère. Ce processus peut être représenté par l'équation suivante :



où pour cet exemple, l'électron  $e^{-*}$  correspond à la particule pénétrante. Une partie de son énergie est absorbée lors de la collision avec l'espèce neutre  $A$ . Si l'énergie absorbée est suffisante, la collision libère un électron pour former un ion associé à l'atome ou à la molécule neutre. Ces particules ionisantes peuvent être soit des rayons cosmiques provenant du milieu interplanétaire, soit des particules énergétiques provenant du vent solaire, de la magnétosphère ou encore de l'ionosphère elle-même. Bien que ces deux processus expliquent assez bien la production primaire de paires ion-électron, le processus d'ionisation ne s'arrête pas là et une cascade peut être observée. »



*Fig. 63 Vue d'artiste des différentes couches constituant l'ionosphère.  
Les quatre zones se révèlent lorsque l'ionosphère est du côté jour,  
Expansion lié au chauffage par rayonnement.*



## Annexe 15 Echelles NOAA

### Geomagnetic Storms

| Scale | Description | Effect  | Physical measure       | Average Frequency (1 cycle = 11 years) |
|-------|-------------|---|------------------------|--|
| G 5   | Extreme     | <p><b>Power systems:</b> Widespread voltage control problems and protective system problems can occur, some grid systems may experience complete collapse or blackouts. Transformers may experience damage.</p> <p><b>Spacecraft operations:</b> May experience extensive surface charging, problems with orientation, uplink/downlink and tracking satellites.</p> <p><b>Other systems:</b> Pipeline currents can reach hundreds of amps, HF (high frequency) radio propagation may be impossible in many areas for one to two days, satellite navigation may be degraded for days, low-frequency radio navigation can be out for hours, and aurora has been seen as low as Florida and southern Texas (typically 40° geomagnetic lat.).</p> | Kp = 9                 | 4 per cycle (4 days per cycle)         |
| G 4   | Severe      | <p><b>Power systems:</b> Possible widespread voltage control problems and some protective systems will mistakenly trip out key assets from the grid.</p> <p><b>Spacecraft operations:</b> May experience surface charging and tracking problems, corrections may be needed for orientation problems.</p> <p><b>Other systems:</b> Induced pipeline currents affect preventive measures, HF radio propagation sporadic, satellite navigation degraded for hours, low-frequency radio navigation disrupted, and aurora has been seen as low as Alabama and northern California (typically 45° geomagnetic lat.).</p>  | Kp = 8, including a 9- | 100 per cycle (60 days per cycle)      |
| G 3   | Strong      | <p><b>Power systems:</b> Voltage corrections may be required, false alarms triggered on some protection devices.</p> <p><b>Spacecraft operations:</b> Surface charging may occur on satellite components, drag may increase on low-Earth-orbit satellites, and corrections may be needed for orientation problems.</p> <p><b>Other systems:</b> Intermittent satellite navigation and low-frequency radio navigation problems may occur, HF radio may be intermittent, and aurora has been seen as low as Illinois and Oregon (typically 50° geomagnetic lat.).</p>   | Kp = 7                 | 200 per cycle (130 days per cycle)     |
| G 2   | Moderate    | <p><b>Power systems:</b> High-latitude power systems may experience voltage alarms, long-duration storms may cause transformer damage.</p> <p><b>Spacecraft operations:</b> Corrective actions to orientation may be required by ground control; possible changes in drag affect orbit predictions.</p> <p><b>Other systems:</b> HF radio propagation can fade at higher latitudes, and aurora has been seen as low as New York and Idaho (typically 55° geomagnetic lat.).</p>   | Kp = 6                 | 600 per cycle (360 days per cycle)     |
| G 1   | Minor       | <p><b>Power systems:</b> Weak power grid fluctuations can occur.</p> <p><b>Spacecraft operations:</b> Minor impact on satellite operations possible.</p> <p><b>Other systems:</b> Migratory animals are affected at this and higher levels; aurora is commonly visible at high latitudes (northern Michigan and Maine).</p>   | Kp = 5                 | 1700 per cycle (900 days per cycle)    |

### Radio Blackouts

| Scale | Description | Effect   | Physical measure            | Average Frequency (1 cycle = 11 years) |
|-------|-------------|--|-----------------------------|--|
| R 5   | Extreme     | <p><b>HF Radio:</b> Complete HF (high frequency) radio blackout on the entire sunlit side of the Earth lasting for a number of hours. This results in no HF radio contact with mariners and en route aviators in this sector.</p> <p><b>Navigation:</b> Low-frequency navigation signals used by maritime and general aviation systems experience outages on the sunlit side of the Earth for many hours, causing loss in positioning. Increased satellite navigation errors in positioning for several hours on the sunlit side of Earth, which may spread into the night side.</p> | X20 (2 x 10 <sup>-3</sup> ) | Less than 1 per cycle                  |
| R 4   | Severe      | <p><b>HF Radio:</b> HF radio communication blackout on most of the sunlit side of Earth for one to two hours. HF radio contact lost during this time.</p> <p><b>Navigation:</b> Outages of low-frequency navigation signals cause increased error in positioning for one to two hours. Minor disruptions of satellite navigation possible on the sunlit side of Earth.</p>   | X10 (10 <sup>-3</sup> )     | 8 per cycle (8 days per cycle)         |
| R 3   | Strong      | <p><b>HF Radio:</b> Wide area blackout of HF radio communication, loss of radio contact for about an hour on sunlit side of Earth.</p> <p><b>Navigation:</b> Low-frequency navigation signals degraded for about an hour.</p>  | X1 (10 <sup>-4</sup> )      | 175 per cycle (140 days per cycle)     |
| R 2   | Moderate    | <p><b>HF Radio:</b> Limited blackout of HF radio communication on sunlit side, loss of radio contact for tens of minutes.</p> <p><b>Navigation:</b> Degradation of low-frequency navigation signals for tens of minutes.</p>   | M5 (5 x 10 <sup>-5</sup> )  | 350 per cycle (300 days per cycle)     |
| R 1   | Minor       | <p><b>HF Radio:</b> Weak or minor degradation of HF radio communication on sunlit side, occasional loss of radio contact.</p> <p><b>Navigation:</b> Low-frequency navigation signals degraded for brief intervals.</p>   | M1 (10 <sup>-5</sup> )      | 2000 per cycle (950 days per cycle)    |

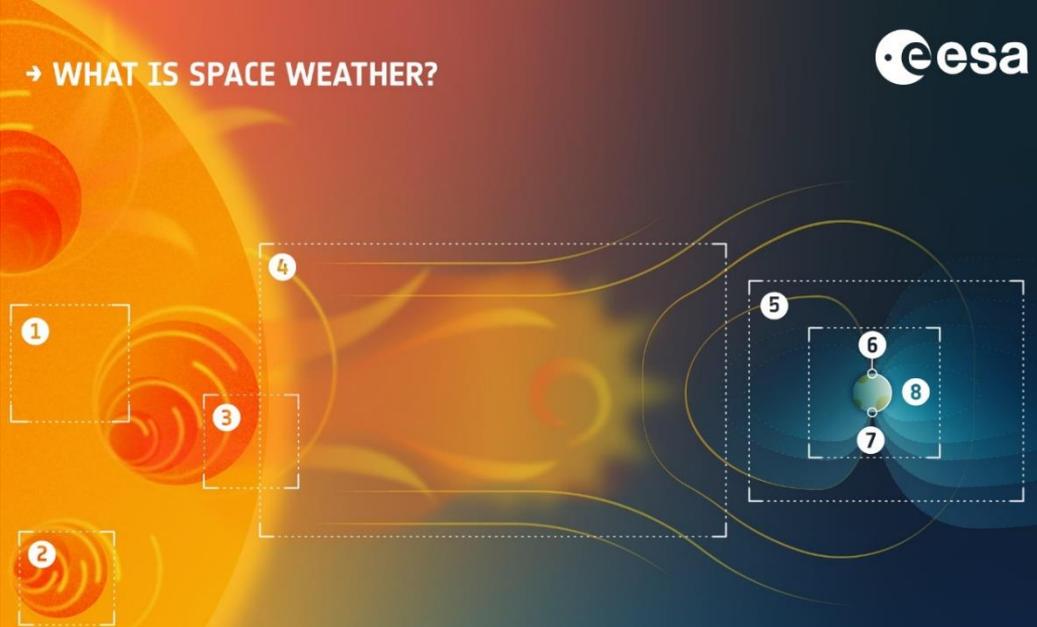
## Solar Radiation Storms

| Scale | Description | Effect   | Physical measure<br>(Flux level of<br>$\geq 10$ MeV<br>particles) | Average Frequency<br>(1 cycle = 11 years) |
|-------|-------------|--|---|---|
| S 5   | Extreme     | <p><b>Biological:</b> Unavoidable high radiation hazard to astronauts on EVA (extra-vehicular activity); passengers and crew in high-flying aircraft at high latitudes may be exposed to radiation risk.</p> <p><b>Satellite operations:</b> Satellites may be rendered useless, memory impacts can cause loss of control, may cause serious noise in image data, star-trackers may be unable to locate sources; permanent damage to solar panels possible.</p> <p><b>Other systems:</b> Complete blackout of HF (high frequency) communications possible through the polar regions, and position errors make navigation operations extremely difficult.</p> | $10^5$  | Fewer than 1 per cycle                    |
| S 4   | Severe      | <p><b>Biological:</b> Unavoidable radiation hazard to astronauts on EVA; passengers and crew in high-flying aircraft at high latitudes may be exposed to radiation risk.</p> <p><b>Satellite operations:</b> May experience memory device problems and noise on imaging systems; star-tracker problems may cause orientation problems, and solar panel efficiency can be degraded.</p> <p><b>Other systems:</b> Blackout of HF radio communications through the polar regions and increased navigation errors over several days are likely.</p>  | $10^4$  | 3 per cycle                               |
| S 3   | Strong      | <p><b>Biological:</b> Radiation hazard avoidance recommended for astronauts on EVA; passengers and crew in high-flying aircraft at high latitudes may be exposed to radiation risk.</p> <p><b>Satellite operations:</b> Single-event upsets, noise in imaging systems, and slight reduction of efficiency in solar panel are likely.</p> <p><b>Other systems:</b> Degraded HF radio propagation through the polar regions and navigation position errors likely.</p>   | $10^3$  | 10 per cycle                              |
| S 2   | Moderate    | <p><b>Biological:</b> Passengers and crew in high-flying aircraft at high latitudes may be exposed to elevated radiation risk.</p> <p><b>Satellite operations:</b> Infrequent single-event upsets possible.</p> <p><b>Other systems:</b> Small effects on HF propagation through the polar regions and navigation at polar cap locations possibly affected.</p>  | $10^2$  | 25 per cycle                              |
| S 1   | Minor       | <p><b>Biological:</b> None.</p> <p><b>Satellite operations:</b> None.</p> <p><b>Other systems:</b> Minor impacts on HF radio in the polar regions.</p>   | 10  | 50 per cycle                              |

## Annexe 16 Infographie, Fiches synthétiques

« Space Weather » ESA

### → WHAT IS SPACE WEATHER?





**1**

Our Sun is an enormous ball of hot gas and plasma. Dark **sunspots** are visual indicators of active regions, caused by local intense magnetic activity. Active regions are sources of solar flares and Coronal Mass Ejections (CMEs).



**2**

Solar flares are huge explosions in which electromagnetic energy is emitted into space as radio waves, visible light, ultraviolet radiation and X-rays. **Flares** can be associated with ejections of energetic protons, electrons and heavier particles into space at near light speed.



**6**

**Auroras** are spectacular phenomena that occur at northern and southern polar latitudes. During strong geomagnetic storms, aurora can be visible also at latitudes nearer the equator.



**7**

Geomagnetic storms can **affect or damage satellites in space** as well as induce currents in power grids, damaging transformers, on ground. They also disturb radio signals travelling through the upper atmosphere. In 1989, a CME caused a geomagnetic storm that led to a 9-hour power blackout in Quebec. In 2003, many satellites were damaged or temporarily affected by the 'Halloween storms', a series of powerful solar events. **In 2012 a massive CME just missed Earth.**



**3**

Active regions can give rise to **CMEs**, when billions of tonnes of matter are flung into space at speeds reaching 3000 km/s. CMEs are often associated with solar flares but can also occur independently.



**4**

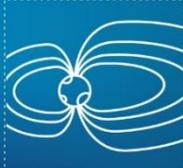
the interplanetary magnetic field. Pressure from the solar wind gives Earth's magnetic field its characteristic shape, compressed on the day side and extended into a long tail on the night side.

**Solar wind** is a continuous stream of electrons, protons and heavier particles from the upper atmosphere of the Sun. Embedded within the solar wind is



**5**

When a CME hits Earth's magnetic field, it can trigger a **geomagnetic storm** that affects satellites in space and critical infrastructure, such as power grids, on ground.



**8**

ESA has established the **European Space Weather System**, which links existing European space weather expertise – located at scientific institutes, national research centres, industry and observation systems on ground and in space – with ESA's Space Weather Coordination Centre, Brussels. Working with regional Expert Service Centres,



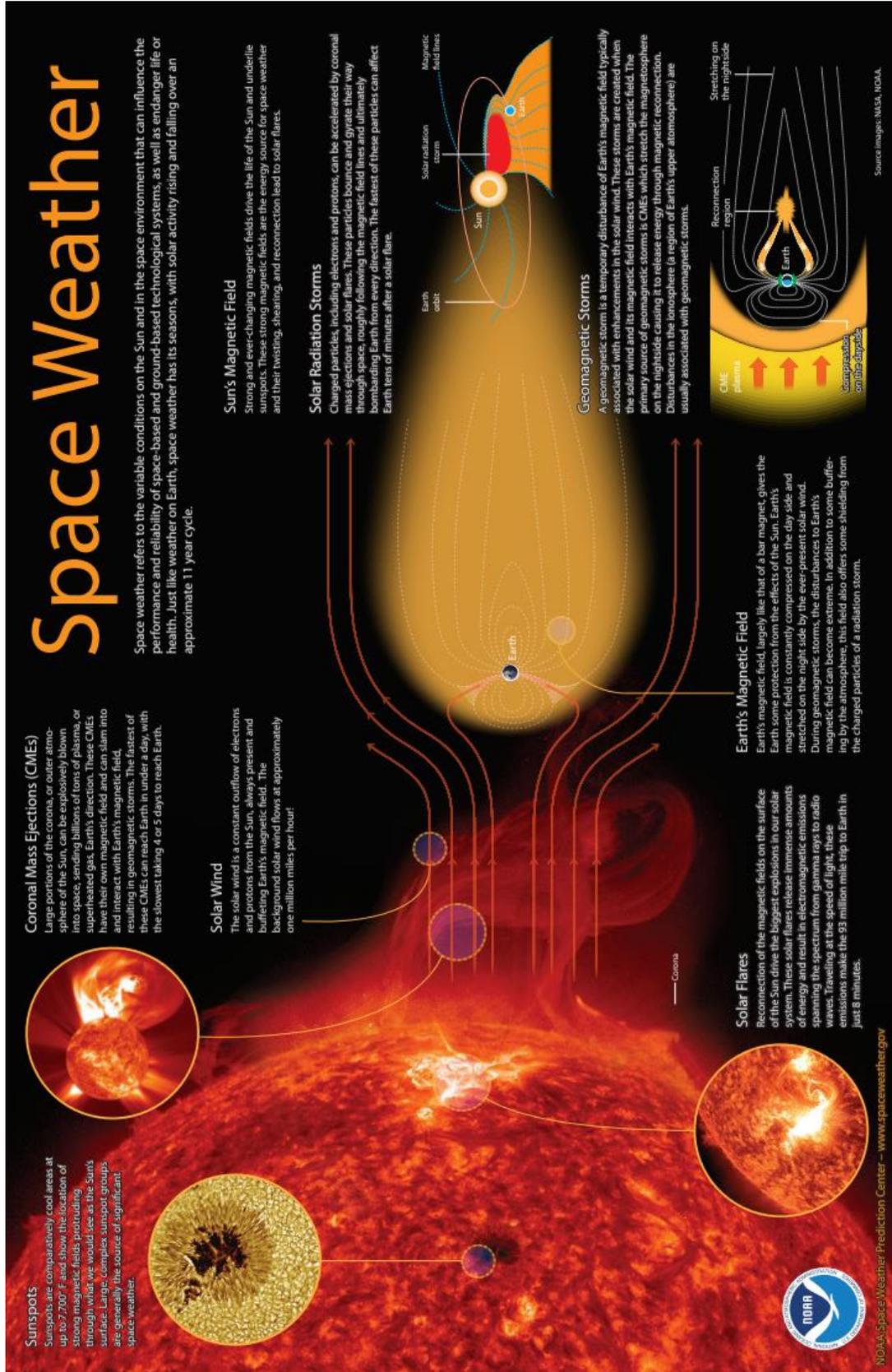
[#Space19plus](#) [#SolarHazards](#) [#LagrangeMission](#)

Space19 

Infographie « space Weather » NOAA

# Space Weather

Space weather refers to the variable conditions on the Sun and in the space environment that can influence the performance and reliability of space-based and ground-based technological systems, as well as endanger life or health. Just like weather on Earth, space weather has its seasons, with solar activity rising and falling over an approximate 11 year cycle.



**Sunspots**  
Sunspots are comparatively cool areas at up to 7,200° F and show the location of strong magnetic fields protruding through what we would see as the Sun's surface. Large complex sunspot groups are generally the source of significant space weather.

**Coronal Mass Ejections (CMEs)**  
Large portions of the corona, or outer atmosphere of the Sun, can be explosively blown into space, sending billions of tons of plasma, or superheated gas, Earth's direction. These CMEs have their own magnetic field and can slam into and interact with Earth's magnetic field, resulting in geomagnetic storms. The fastest of these CMEs can reach Earth in under a day, with the slowest taking 4 or 5 days to reach Earth.

**Solar Wind**  
The solar wind is a constant outflow of electrons and protons from the Sun, always present and buffering Earth's magnetic field. The background solar wind flows at approximately one million miles per hour.

**Solar Flares**  
Reconnection of the magnetic fields on the surface of the Sun drive the biggest explosions in our solar system. These solar flares release immense amounts of energy and result in electromagnetic emissions spanning the spectrum from gamma rays to radio waves. Traveling at the speed of light, these emissions make the 93 million mile trip to Earth in just 8 minutes.

**Earth's Magnetic Field**  
Earth's magnetic field, largely like that of a bar magnet, gives the Earth some protection from the effects of the Sun. Earth's magnetic field is constantly compressed on the day side and stretched on the night side by the ever-present solar wind. During geomagnetic storms, the disturbances to Earth's magnetic field can become extreme. In addition to some buffering by the atmosphere, this field also offers some shielding from the charged particles of a radiation storm.

**Solar Radiation Storms**  
Charged particles, including electrons and protons, can be accelerated by coronal mass ejections and solar flares. These particles bounce and gyrate their way through space, roughly following the magnetic field lines and ultimately bombarding Earth from every direction. The fastest of these particles can affect Earth tens of minutes after a solar flare.

**Geomagnetic Storms**  
A geomagnetic storm is a temporary disturbance of Earth's magnetic field typically associated with substorms in the solar wind. These storms are created when the solar wind and its magnetic field interact with Earth's magnetic field. The primary source of geomagnetic storms is CMEs which stretch the magnetosphere on the nightside causing it to release energy through magnetic reconnection. Disturbances in the ionosphere (a region of Earth's upper atmosphere) are usually associated with geomagnetic storms.

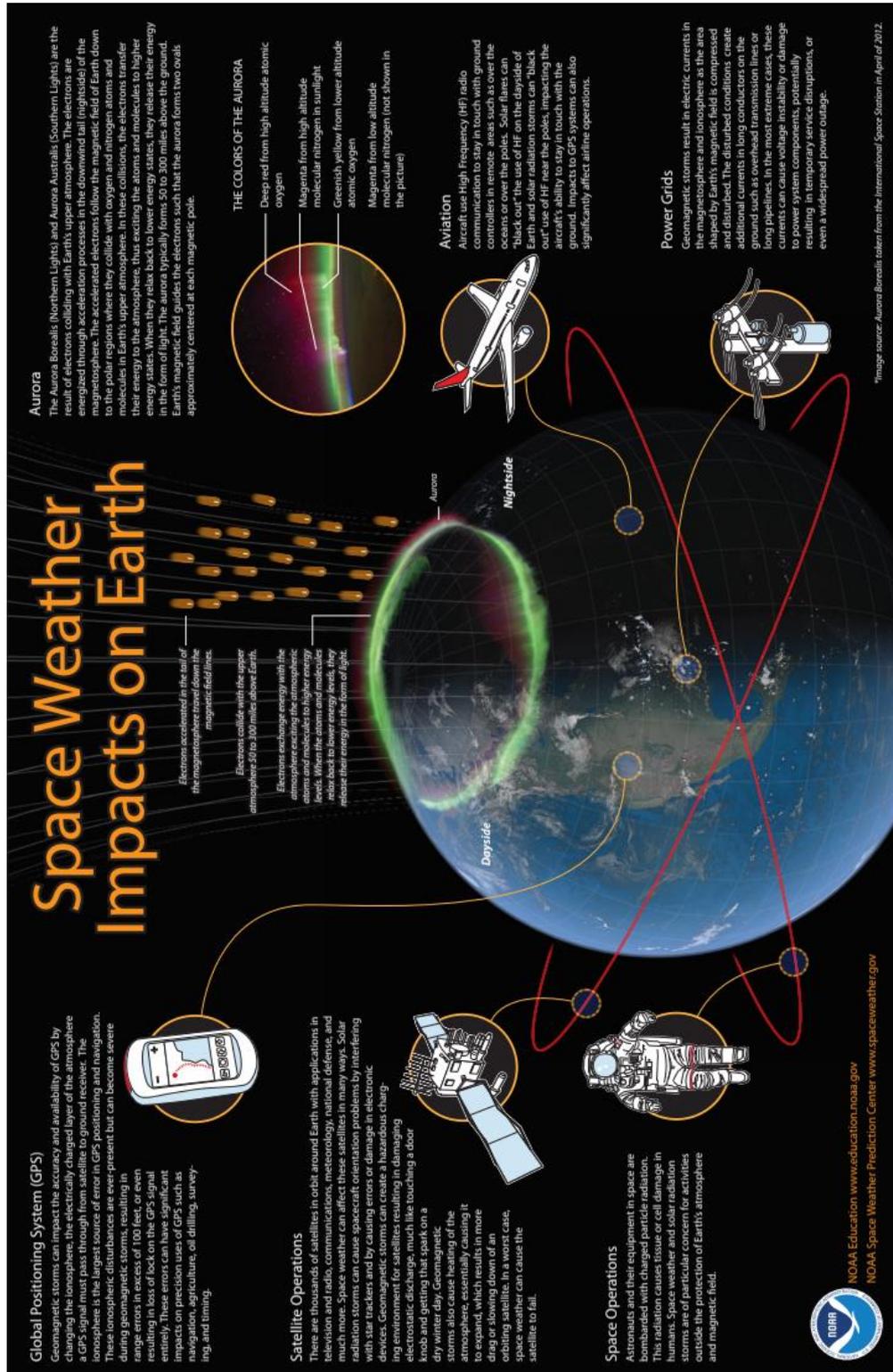
**Sun's Magnetic Field**  
Strong and ever-changing magnetic fields drive the life of the Sun and underlie sunspots. These strong magnetic fields are the energy source for space weather and their twisting, shearing, and reconnection lead to solar flares.

**Geomagnetic Storms**  
A geomagnetic storm is a temporary disturbance of Earth's magnetic field typically associated with substorms in the solar wind. These storms are created when the solar wind and its magnetic field interact with Earth's magnetic field. The primary source of geomagnetic storms is CMEs which stretch the magnetosphere on the nightside causing it to release energy through magnetic reconnection. Disturbances in the ionosphere (a region of Earth's upper atmosphere) are usually associated with geomagnetic storms.

Source: images, NASA, NOAA.

NOAA Space Weather Prediction Center - [www.spaceweather.gov](http://www.spaceweather.gov)

Infographie "Impact"



# Space Weather Impacts on Earth

**Global Positioning System (GPS)**  
Geomagnetic storms can impact the accuracy and availability of GPS by changing the ionosphere, the electrically charged layer of the atmosphere through which signals pass through in order to be received and navigation. These ionospheric disturbances are ever present but can become severe during geomagnetic storms, resulting in range errors in excess of 100 feet, or even entirely. These errors can have significant impacts on precision uses of GPS such as navigation, agriculture, oil drilling, surveying, and timing.

**Satellite Operations**  
There are thousands of satellites in orbit around Earth with applications in television and radio, communications, meteorology, national defense, and much more. Space weather can affect these satellites in many ways. Solar radiation storms can cause spacecraft orientation problems by interfering with star trackers and by causing errors or damage in electronic devices. Geomagnetic storms can create a hazardous charging environment for satellites, resulting in damaging arcs and (in extreme cases) the loss of the satellite. On a dry winter day, geomagnetic storms also cause heating of the atmosphere, essentially causing it to expand, which results in more drag or slowing down of an orbiting satellite. In a worst case, space weather can cause the satellite to fail.

**Space Operations**  
Astronauts and their equipment in space are bombarded with charged particle radiation. This radiation causes tissue or cell damage in humans. Space weather and solar radiation storms are of particular concern for activities outside the protection of Earth's atmosphere and magnetic field.

**Aurora**  
The Aurora Borealis (Northern Lights) and Aurora Australis (Southern Lights) are the result of electrons colliding with Earth's upper atmosphere. The electrons are energized through acceleration processes in the downwind tail (highside) of the magnetosphere. The accelerated electrons follow the magnetic field of Earth down to the polar regions where they collide with oxygen and nitrogen atoms and molecules in Earth's upper atmosphere. In these collisions, the electrons transfer their energy to the atmosphere, thus exciting the atoms and molecules to higher energy states. When they relax back to lower energy states, they release their energy in the form of light. The aurora typically forms 50 to 300 miles above the ground. Earth's magnetic field guides the electrons such that the aurora forms two ovals, approximately centered at each magnetic pole.

**THE COLORS OF THE AURORA**  
Deep red from high altitude atomic oxygen  
Magenta from high altitude molecular nitrogen in sunlight  
Greenish yellow from lower altitude atomic oxygen  
Magenta from low altitude molecular nitrogen (not shown in the picture)

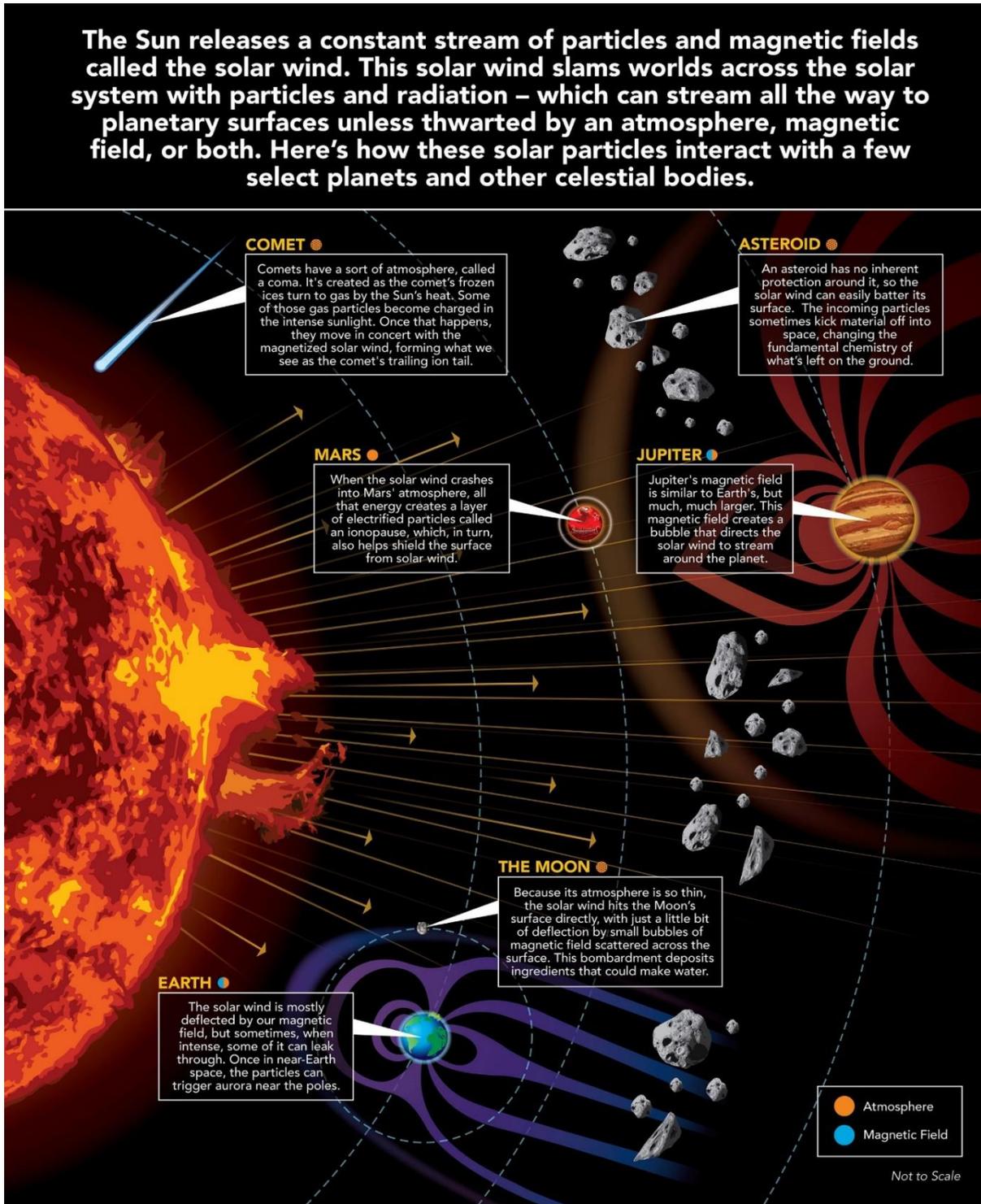
**Aviation**  
Aircraft use High Frequency (HF) radio communication to stay in touch with ground controllers in remote areas such as over the oceans or over the poles. Solar flares can "black out" the use of HF on the dayside of Earth and solar radiation storms can "black out" use of HF near the poles, impacting the aircraft's ability to stay in touch with the ground. Impacts to GPS systems can also significantly affect airline operations.

**Power Grids**  
Geomagnetic storms result in electric currents in the magnetosphere and ionosphere as the area shaped by Earth's magnetic field is compressed and disturbed. The disturbed conditions create additional currents in long conductors on the ground such as overhead transmission lines or long pipelines. In the most extreme cases, these currents can cause voltage instability or damage to power system components, potentially resulting in temporary service disruptions, or even a widespread power outage.

**Image source: Aurora Borealis taken from the International Space Station in April of 2012.**

NOAA Education [www.education.noaa.gov](http://www.education.noaa.gov)  
NOAA Space Weather Prediction Center [www.spaceweather.gov](http://www.spaceweather.gov)

Infographie “Solar Wind”



## 8 Références

---

### 8.1 Sitographie

#### 8.1.1 La météorologie de l'espace :

##### ➤ Sites institutionnels

La météorologie de l'espace en France et à l'international – OFRAME (Organisation Française pour la Recherche Applicative en Météorologie de l'Espace)

[http://meteo-espace.irap.omp.eu/sw\\_france/fr](http://meteo-espace.irap.omp.eu/sw_france/fr)

Base de données Solaire Sol – BASS200

<https://bass2000.obspm.fr/webcam.php>

Météorologie de l'espace Européenne (ESA space weather service network)

<https://swe.ssa.esa.int/current-space-weather>

SIIG : Service International des indices géomagnétiques - ISGI : International Service of Géomagnétic Indices.

<https://isgi.unistra.fr/index.php>

Météorologie de l'espace en Norvège - Tromso Geophysical Observatory (TGO), Norwegian Centre for Space Weather (NOSWE)

<https://site.uit.no/spaceweather/>

Météorologie de l'espace en Suède – Swedish Space Weather Center, Instutet for RYMDFYSIK (IRF)

<https://www.spaceweather.se/>

Météorologie de l'espace USA (NOAA – Space Weather Prediction Center, SWPC)

<https://www.swpc.noaa.gov/>

Météorologie spatiale au Canada

<https://spaceweather.ca/index-fr.php>

Météorologie spatiale en Australie (Australian Space Weather Forecasting Center)

<https://www.sws.bom.gov.au/>

Météorologie de l'espace du « Royal Observatory of Belgium »

<https://www.sidc.be/>

Météorologie de l'espace au Japon ( Space Weather Forecast – National Institute and Communication Technology).

<https://swc.nict.go.jp/en/>

Météorologie en Afrique du sud – South African National Space Agency (SANSA)

<https://spaceweather.sansa.org.za/>

Météorologie de l'espace en Chine – Space Environment Prediction Center, Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences.

<http://www.sepc.ac.cn/eng/index.php>

Météorologie de l'espace en Russie – SpaceWeather.Ru

<http://spaceweather.ru/>

SILSO – Sunspot Index and Log-term Solar Observation

<https://www.sidc.be/SILSO/eisnplot>

➤ *Sites privés*

Tony Philips

<https://spaceweather.com/>

SpaceWeatherLive, Parsec vzw : Sander Vancanneyt, Marcel de Bont, Sam Warfel

<https://www.spaceweatherlive.com/fr/activite-solaire.html>

Atmospheric Imaging Assembly (AIA)

<https://suntoday.lmsal.com/suntoday/>

Jan Alvestad – Solar Terrestrial Activity Report

<http://solen.info/solar/>

Radio station VE3EN

<https://www.solarham.net/>

8.1.2 Les satellites

Toutes les missions solaires

<https://www.thesuntoday.org/missions/all-missions/>

SOHO (Solar and Heliospheric Observatory)

<https://soho.nascom.nasa.gov/spaceweather/>

SDO (Solar Dynamics Observatory)

<https://sdo.gsfc.nasa.gov/>

SMILE (Solar wind-Magnetosphere-Ionosphere Link Explorer)

<https://www.cosmos.esa.int/web/smile/mission>

PARKER SOLAR PROBE (PSP), (Solar Probe Plus)

<https://parkersolarprobe.jhuapl.edu/>

SOLAR ORBITER

<https://solar-orbiter.cnes.fr/fr>

STEREO A & B (Solar TERrestrial Relations Observatory)

<https://science.nasa.gov/mission/stereo>

THEMIS (ARTEMIS)

<https://science.nasa.gov/mission/themis-artemis>

DSCOVR (Deep Space Climate Observatory)

<https://www.ngdc.noaa.gov/dscovr/portal/#/>

WIND solar

<https://www.eoportal.org/satellite-missions/wind#spacecraft>

GOES (Geostationary Operational Environmental Satellites)

<https://svs.gsfc.nasa.gov/14554/>

Hinode

<https://science.nasa.gov/about-hinode>

PROBA-2 (Project for OnBoard Autonomy)

<https://proba2.sidc.be/about/mission>

## 8.2 Bibliographie

- Acker, A., 2013. *Astronomie, astrophysique*, 5e éd. (nouvelle prés.). ed. Dunod, Malakoff (Hauts-de-Seine).
- Amari, Tahar, Canou, 2018. Magnetic cage and rope as the key for solar eruptions. *Nature* Cité par B. Perri dans sa thèse, chap 5, 211–215.
- Aulanier, G., 2013. Le Soleil et ses effets sur notre environnement terrestre. <https://doi.org/10.60527/XDKQ-0733>
- B. Perri, 2019. Le soleil magnétique et la météorologie de l'espace : étude du couplage non-linéaire entre dynamo, activité magnétique et vent solaire. Université de Paris - Paris Diderot.
- Benacquista, R., 2017. Impact des structures du vent solaire sur les ceintures de radiation terrestre. Université de Toulouse, Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace.
- Bernoux, G., 2022. Apprentissage profond pour la prévision de l'activité géomagnétique. Université Fédérale Toulouse Midi-Pyrénées.
- Canou, A., 2011. Caractérisation de l'environnement magnétique de la couronne solaire (Thèse). Ecole Polytechnique.
- Courtillot, V., Gallet, Y., Le Mouél, J.-L., Fluteau, F., Genevey, A., 2007. Are there connections between the Earth's magnetic field and climate? *Earth Planet. Sci. Lett.* 253, 328–339. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.10.032>
- Futur Global Shocks - Improving risk governance - OECD Review of Risk Management Policies (No. OECD 2011 ISBN : 978-94-09520-5), 2011. , OECD publishing.
- G. Belmont, L. Rezeau, C. Riconda, A. Zaslavsky, 2018. Introduction à la physique des plasmas, ISTE editions. ed.
- Griton, L., 2018. Simulations de l'interaction du vent solaire avec les magnétosphères planétaires : de Mercure à Uranus, le rôle de la rotation planétaire. Université de recherche Paris Sciences et Lettres.
- Gruet, M., 2018. Intelligence artificielle et prévision de l'impact de l'activité solaire sur l'environnement magnétique terrestre. Université Fédérale Toulouse Midi-Pyrénées.
- J. Liliensten, Th. Dudok de Wit, K. Matthes, n.d. Earth's climate response to changing Sun, EDP, Sciences. ed.
- Janvier, M., Garcin, S., 2023. Les secrets du soleil. Alisio sciences, Paris.
- J.Liliensten, F. Pitout, M.Gruet, J.P. Marques, 2021. *Météorologie de l'espace: vivre demain avec notre soleil*, Sciences et plus. De Boeck supérieur, Louvain-la-Neuve Paris.
- J.M. Malherbe, T. Roudier, 2010. Tab 3 Caractéristiques de la chromosphère.
- Jouandou, P.-O., 2017. Rayonnement Ultraviolet Solaire et répercussion sur l'atmosphère terrestre. Obspm DU SU.
- Kliem, Su, Van Ballegooijen, Deluca, 2013. Magnetohydrodynamic Modeling of the Solar Eruption on 2010 April 8. *APJ* Cité par B. Perri dans sa thèse, chap 5, 129.
- Koskinen, H., Transkanen, E., Pirjola, R., Pulkkinen, A., Dyer, C., Rodgers, D., Cannon, P., Mandeville, J.-C., Boscher, D., 2001a. SPACE WEATHER EFFECTS CATALOGUE (No. ESWS-FMI-RP-0001 ESTEC/Contract No. 14069/99/NL/SB ESA Space Weather Study (ESWS) WP 310 Range of space weather and effects).
- Koskinen, H., Transkanen, E., Pirjola, R., Pulkkinen, A., Dyer, C., Rodgers, D., Cannon, P., Mandeville, J.-C., Boscher, D., 2001b. Space Weather Effects Catalogue (No. ESWS-FMI-RP-0001 ESTEC/Contract No. 14069/99/NL/SB ESA Space Weather Study (ESWS) WP 310 Range of space weather and effects). ESTEC ESA Space Weather Study.
- Lavraud, B., Rouillard, A., 2013. Properties and processes that influence CME geo-effectiveness. *Proc. Int. Astron. Union* 8, 273–284. <https://doi.org/10.1017/S1743921313011095>
- Le Chat, G., 2010. Etude du vent solaire à grande échelle. Université de Paris - Paris Diderot.
- Le Chat, G., Issautier, K., 2015. Planetary Effect on nanodust in the solar wind.
- Lesia obspm, 2012. Caractéristiques générales du vent solaire.
- Liliensten, J., 2019. Les énergies solaires. *Encycl. Environ.*
- Liliensten, J., Blelly, P.-L., 1999. Du soleil à la terre: aéronomie et météorologie de l'espace, Collection Grenoble sciences. Presses Universitaires de Grenoble [u.a.], Grenoble.

- Lilensten, J., Bornarel, J., 2001. Sous les feux du soleil: vers une météorologie de l'espace, Collection Grenoble sciences. EDP sciences, Les Ulis.
- Lilensten, J., Dudok de Wit, T., Matthes, K., European Cooperation in the Field of Scientific and Technical Research (Organization) (Eds.), 2015. Earth's climate response to a changing sun. EDP sciences ; COST, European Cooperation in Science and Technology, Les Ulis, France : [Brussels, Belgium].
- Lion, S., 2017. Analyse multi-satellite et multi-échelle de la turbulence dans le vent solaire. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI.
- Lointier, G., 2008. Vers une surveillance en temps réel des régions magnétosphériques à partir des radars cohérents HF SuperDARN. Université d'Orléans.
- Malherbe, J.-M., 2008. Cours : Les champs magnétiques solaires.
- Malherbe, J.-M., n.d. Cours : Le soleil : principales caractéristiques.
- Malherbe, J.-M., Roudier, T., 2010. Cours d'astronomie Astrophysique niveau L3/M1 - Introduction à la physique solaire, Cours obspm.
- Maynard, T., Smith, N., Gonzalez, S., 2013. SOLAR STORM RISK TO THE NORTH AMERICAN ELECTRIC GRID (No. Lloyd's 2013). Lloyd's, AER.
- Mays, M.L., Taktakishvili, A., Pulkkinen, A.A., MacNeice, P.J., Rastaetter, L., Odstrcil, D., Jian, L.K., Richardson, I.G., LaSota, J.A., Zheng, Y., Kuznetsova, M.M., 2015. Ensemble modeling of CMEs using the WSA-ENLIL+Cone model. *Sol. Phys.* 290, 1775–1814. <https://doi.org/10.1007/s11207-015-0692-1>
- Miyake, F., Panyushkina, I.P., Jull, A.J.T., Adolph, F., Brehm, N., Helama, S., Kanzawa, K., Moriya, T., Muscheler, R., Nicolussi, K., Oinonen, M., Salzer, M., Takeyama, M., Tokanai, F., Wacker, L., 2021. A Single-Year Cosmic Ray Event at 5410 BCE Registered in <sup>14</sup>C of Tree Rings. *Geophys. Res. Lett.* 48, e2021GL093419. <https://doi.org/10.1029/2021GL093419>
- Mottez, F., 2018. La magnétosphère : sous l'influence de la Terre et du Soleil. *Encycl. Environ.*
- Mottez, F., 2017a. Aurores polaires: la Terre sous le vent du soleil. Belin, Paris.
- National Research Council, N. academies, 2008. Severe Space Weather events - Understanding societal and economic impact.
- Noraz, Q., 2022. Magnétisme et dynamique des étoiles de type solaire -Rôle de la rotation et de la métallicité sur la dynamo et le vent stellaire. Université Paris Cité.
- Obspm, L. cercle, n.d. Chapitre 6 Le cycle solaire, in: *Previ.Obspm*.
- Odenwald, S., 2009. Space Weather - Impacts, Mitigation and Forecasting. *Natl. Inst. Aerosp.* 45.
- Pariat, E., 2019a. Propriétés magnétiques des structures éruptives solaires (HDR).
- Perri, B., 2019a. Le soleil magnétique et la météorologie de l'espace : étude du couplage non-linéaire entre dynamo, activité magnétique et vent solaire. Université de Paris - Paris Diderot.
- Perri, B., Brun, A.S., 2024. Des relations Soleil-Terre à la météorologie de l'espace. *L'Astronomie* 26.
- Poirier, N., 2022. Transition du plasma confiné de l'atmosphère solaire vers le milieu interplanétaire. Université toulouse 3 - Paul Sabatier.
- Robert, E., 2023. Interprétation des données satellites et sols pour la météorologie de l'espace, pour le monitoring des particules de basses énergies en zone aurorale. Université Grenoble Alpes.
- Savoini, P., 2011. Plasmas : de l'Espace au laboratoire - M2, LPP - Sorbonne Universités UPMC.
- Shibata, Kazunari, Magara, Tetsuya, 2011. Solar Flares : Magnetohydrodynamic Processes. *Living Rev. Sol. Phys.* Cité par B. Perri dans sa thèse, chap 5, 6.
- Siscoe, G., 2007. Space weather forecasting historically viewed through the lens of meteorology, in: *Space Weather - Physic and Effects*, Springer-Praxis Books in Environmental Sciences. pp. 5–30.
- Techno-Science, .netWikipédia, n.d. La force de Lorentz.
- Zarka, P., 2007. L'environnement magnétique des planètes. *Astronomie* 121.
- Zhao, Dryer, 2014. Issue Information. *Space Weather* 12. <https://doi.org/10.1002/swe.20084>
- Zhelyazkov, I., Ramesh, C., 2021. Kelvin-Helmholtz instability in solar atmospheric jets. *World scientific*, Singapore.
- Zouganelis, I., 2005. Physique du vent solaire : modèles cinétiques et distributions non thermiques. Paris 7 - Denis Diderot.