

LA COURONNE SOLAIRE ET LA MÉTÉOROLOGIE DE L'ESPACE

Karl-Ludwig Klein, Observatoire de Paris, LESIA et Observatoire radio-astronomique de Nançay, Universités Paris Sciences & Lettres, Paris Cité, Sorbonne Université, Université d'Orléans

Le Soleil est un objet astrophysique proche qui nous permet d'étudier en détail des processus qui ont lieu ailleurs dans l'Univers comme la génération des champs magnétiques, le transport et la génération d'énergie, l'accélération de particules chargées à de hautes énergies. La couronne solaire, couche externe visible à l'œil lors d'une éclipse totale, est un gaz ionisé structuré par le champ magnétique. Elle se révèle fortement variable sur des échelles qui vont de quelques secondes lors d'une éruption solaire à plusieurs années, notamment le cycle solaire d'environ 11 ans. Au travers des rayonnements X, EUV et radio, des éjections de masse et jets de particules de haute énergie, la couronne affecte la technologie humaine basée sur l'espace et les communications par ondes hertziennes, mais aussi le transport d'énergie dans les régions de haute latitude. Cet article donne un aperçu de la physique de la couronne et de quelques implications sur l'environnement spatial de la Terre, qu'on étudie au sein de la météorologie de l'espace.

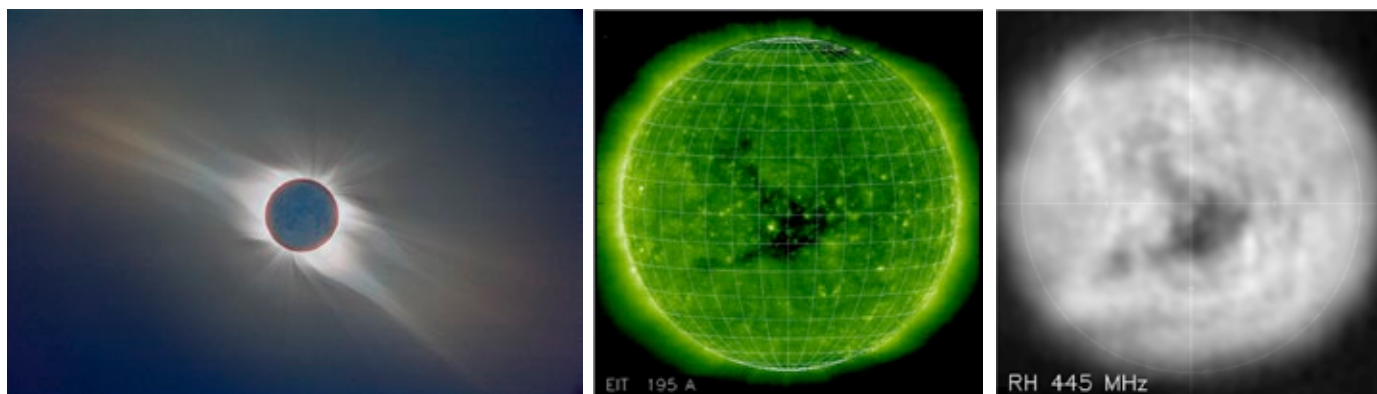


Fig.1. Trois vues de la couronne solaire, en lumière visible lors d'une éclipse solaire totale à gauche (crédit C. Viladrich), en ultraviolet extrême (EUV) au centre ($\lambda = 19,5 \text{ nm}$; SoHO/EIT, crédit ESA/NASA) et en ondes radio à droite ($\lambda = 67 \text{ cm}$; NRH, crédit C. Mercier, Obs. Paris).

La couronne solaire

La couronne solaire que nous voyons à l'œil lors d'une éclipse totale du Soleil (cliché à gauche de la figure 1) est un gaz qui entoure la photosphère visible. Il est très dilué (la densité à la base de la couronne est comparable à celle de l'atmosphère terrestre à 400 km d'altitude) et de ce fait visible seulement quand la photosphère est occultée. Ce gaz est très chaud, à quelques millions de degrés, bien plus que la photosphère et ses 5 800 K. Ce fait intrigant est connu sous le nom du problème de chauffage de la couronne. La forte pression qui résulte de cette haute température pousse la couronne dans l'espace interplanétaire. Un flot continu de protons, électrons, noyaux et ions d'hélium, le vent solaire, est détecté au voisinage de la Terre avec une concentration d'une dizaine de particules par cm^3 et une vitesse de 300 à 800 km/s. Un fait remarquable dans la figure 1 est que, contrairement à la photosphère, la couronne n'est pas ronde. Sa forme

montre que la gravitation n'est pas la seule force à l'œuvre. La brillance des différentes régions reflète la densité des électrons intégrée le long de la ligne de visée. Ces électrons sont confinés dans certaines régions, les « grands jets », qui s'étendent vers le haut à gauche et le bas à droite de l'image d'éclipse, et s'échappent librement notamment des « trous coronaux » visibles dans la direction orthogonale aux grands jets. La force à l'œuvre est magnétique.

La haute température fait que la couronne émet en UV extrême (EUV, image centrale de la figure 1) et en rayons X. Elle émet aussi des ondes radio (image de droite). Ces trois domaines du spectre électromagnétique nous donnent une vue plus complète de la couronne. On voit notamment en EUV et dans le domaine radio une région sombre sur le disque solaire. C'est un trou coronal similaire aux structures au-dessus du limbe du Soleil en lumière visible.

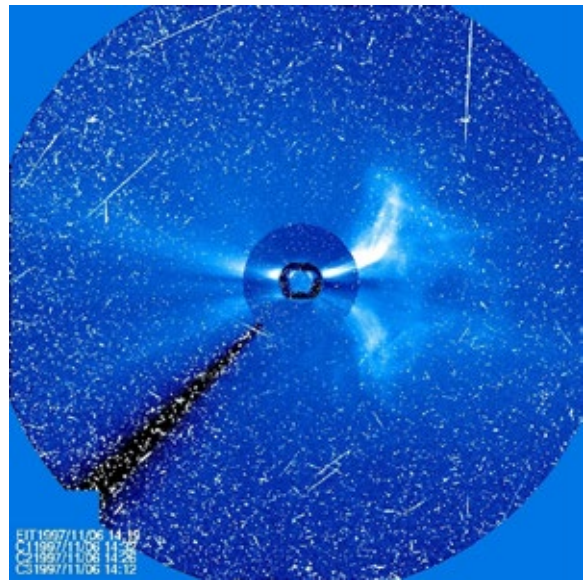
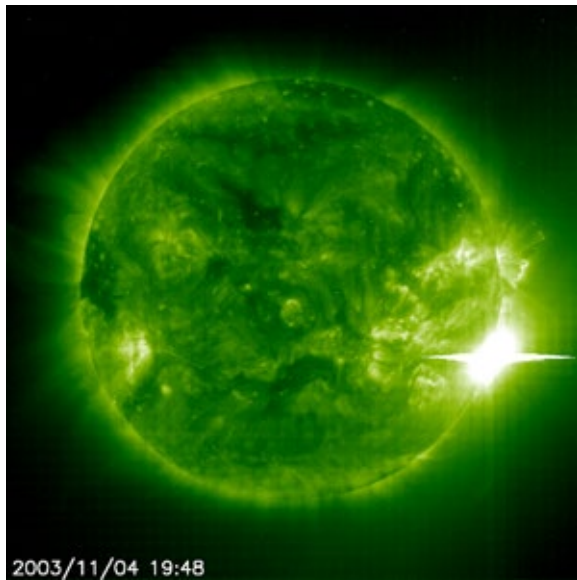


Fig.2. Observations d'une éruption solaire en extrême ultraviolet (image de gauche ; SoHO/EIT) et d'une éjection coronale de masse (à droite ; SoHO/EIT et LASCO). Crédit ESA/NASA.

Le champ magnétique connecte la couronne à la photosphère sous-jacente, dont le gaz est en mouvement, révélant des cellules convectives. La convection, montée de gaz chaud à l'intérieur d'une cellule, qui se refroidit et redescend sur la paroi de la cellule, est le mécanisme de transport de l'énergie solaire vers la photosphère sur le dernier tiers du rayon solaire. Ces mouvements transfèrent de l'énergie au champ magnétique. Elle est transportée dans la couronne par des courants électriques qui circulent le long des lignes de force.

À l'arrivée dans la couronne, elle est convertie en chaleur directement – c'est le processus de chauffage de la couronne – ou emmagasinée, puis relâchée brusquement après plusieurs heures. C'est alors une éruption solaire ou une éjection coronale de masse.

Dans une éruption, un volume de gaz de la couronne est chauffé à plusieurs dizaines de millions de degrés, et quelques particules sont accélérées à des vitesses élevées. Dans certains cas, elles avoisinent la célérité de la lumière. Au cours d'une éjection de masse, une grande structure magnétique de la couronne est éjectée dans l'espace, avec le gaz qu'elle confine. Le chauffage et l'accélération des particules entraînent des augmentations brusques des émissions de la couronne, donc en EUV, rayons X et radio, qui durent quelques minutes à plusieurs heures. La région brillante dans l'image de gauche de la figure 2 illustre ce phénomène. Les particules accélérées peuvent aussi être tracées par leur rayonnement électromagnétique, parfois en rayons gamma. Certaines s'échappent de la couronne et peuvent être mesurées à bord de sondes spatiales. L'image de droite de la figure 2 montre l'instantané d'une éjection de masse. Les traits blancs sur l'image sont les traces de l'impact de protons de haute énergie, accélérés au cours de l'éruption par l'onde de choc qui se forme autour de cette éjection de masse rapide. Les structures magnétiques éjectées traversent l'espace interplanétaire à

des vitesses entre quelques dizaines et plusieurs milliers de km/s – on peut les voir comme des rafales dans le vent solaire.

La structure magnétique de la couronne et la fréquence des événements éruptifs varient avec une période d'environ 11 ans – le cycle d'activité du Soleil, identifié d'abord dans le nombre de taches solaires.

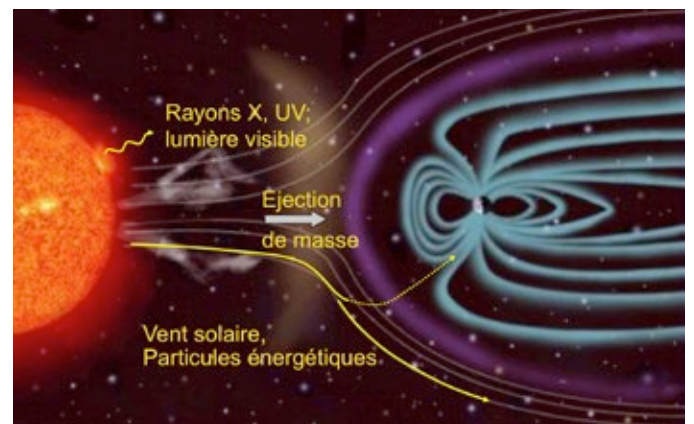


Fig.3. Dessin schématique du système Soleil - magnétosphère terrestre. Les distances ne sont pas à l'échelle.

L'environnement spatial de la Terre et les perturbations solaires

À la différence des autres étoiles, qui constituent un intérêt astrophysique, le Soleil exerce un effet sur l'environnement spatial de la Terre, à savoir le champ magnétique et la haute atmosphère terrestres. Les perturbations solaires atteignent la Terre en 8 minutes pour les ondes électromagnétiques, quelques dizaines de minutes pour les particules de haute énergie, moins d'un jour pour les éjections de masse les plus rapides, deux à quatre jours pour le vent solaire, selon sa vitesse.

La figure 3 montre schématiquement le Soleil et le champ magnétique de la Terre. La distance entre les

deux est réduite pour que la figure reste lisible. Le champ magnétique terrestre est en première approximation dipolaire. Les parties extérieures sont déformées par les particules électriquement chargées du vent solaire : le côté tourné vers le Soleil est comprimé, tandis que du côté opposé la magnétosphère est allongée par le vent solaire qui passe. La plupart des particules chargées, qu'il s'agisse du vent solaire ou de particules énergétiques, sont déviées autour de la magnétosphère. Seuls les cornets polaires, régions de séparation entre les lignes de force qui se bouclent face au Soleil et du côté nuit, laissent une étroite entrée.

Le sol de la Terre est bien protégé contre la plupart des effets de la variabilité du Soleil : les rayonnements EUV et X sont absorbés dans la haute atmosphère, entre quelques dizaines et plusieurs centaines de km au-dessus du sol. Le terme « absorption » signifie que l'énergie de l'onde électromagnétique incidente est utilisée pour dissocier des molécules et ioniser des atomes. Les rayonnements EUV du Soleil créent l'ionosphère de la Terre, une couche qui commence entre 50 et 80 km au-dessus du sol, contenant une fraction d'électrons et d'ions libres. Par ailleurs l'impact des rayonnements sur les atomes et molécules leur donne une énergie élevée, qui se traduit collectivement par le chauffage de l'atmosphère. Un éclairage accru par le rayonnement EUV et X a donc pour conséquence une ionisation accrue et une atmosphère plus chaude, qui s'étend à cause de l'agitation thermique accrue des atomes et molécules.

Les protons, électrons et ions énergétiques, tant que leur énergie ne dépasse pas un certain seuil, n'atteignent l'atmosphère terrestre que dans les cornets polaires. Le premier effet est l'ionisation supplémentaire quand ces particules choquent les molécules et atomes de l'atmosphère. La plupart du temps les effets ne vont pas plus loin. Mais les protons et noyaux d'hélium les plus rapides, accélérés lors de quelques rares éruptions solaires, peuvent casser les noyaux atomiques dans la haute atmosphère et créer des particules secondaires qui ont elles-mêmes des énergies élevées, pouvant casser d'autres noyaux sur leur chemin. Cette cascade atmosphérique peut se poursuivre jusqu'au sol.

La configuration Soleil – environnement spatial de la Terre est loin d'être statique. Le champ magnétique solaire, emporté par le vent solaire et les éjections de masse, interagit avec la magnétosphère terrestre de différentes façons, selon la vitesse et l'orientation du champ magnétique de la perturbation. L'impact sur la magnétosphère va la comprimer plus que d'ordinaire. Si le champ magnétique venant du Soleil fait un angle important

avec celui de la Terre, les deux peuvent se reconnecter, ce qui permet un transfert plus efficace de l'énergie du vent solaire ou de l'éjection de masse à la magnétosphère. Dans tous les cas l'impact crée des courants électriques qui circulent le long des lignes de force de la magnétosphère, surtout aux alentours des cornets polaires, et peuvent se fermer dans l'atmosphère des régions de hautes latitudes. Les courants y chauffent le gaz, créant de l'ionisation supplémentaire. Lors d'éjections de masse ou de courants de vent solaire particulièrement énergétiques, des champs électriques sont induits aussi dans la croûte terrestre. Les transformations de la magnétosphère terrestre lors d'un grand orage géomagnétique conduisent aussi à l'accélération de particules. Une trace visible sont les aurores boréales et australes, visibles à des latitudes géographiques inhabituellement basses lors de certains grands orages – même dans les Caraïbes lors du plus important connu, survenu en 1859.

La météorologie de l'espace

L'ionosphère et la propagation d'ondes radio

La mise en évidence de l'ionosphère terrestre date d'une expérience de télécommunication transcontinentale en 1901, entre Terre-Neuve et l'Angleterre. Il n'y a pas de visibilité directe entre les deux, l'onde radio devait être réfléchiée dans la haute atmosphère – l'ionosphère. La variation, au cours du cycle d'activité solaire ou lors d'évènements sporadiques, de l'intensité du rayonnement EUV qui la crée rend les conditions de propagation des ondes radio variables : absorption aux fréquences utilisées pour la communication à grande distance, déviation du signal de la ligne droite et retards d'arrivée à d'autres fréquences.

Dès la deuxième guerre mondiale les armées utilisaient des observations solaires pour prévoir l'état de l'ionosphère et prédéfinir des fréquences de communication sur de grandes distances. Ce besoin persiste aujourd'hui. La navigation par satellite par exemple repose sur la communication sol-espace et la visée précise vers les satellites. Des communications radio sont aussi utilisées par l'aviation civile sur des routes passant près des pôles, où des satellites qui servent à la navigation aux plus basses latitudes ne sont plus visibles. En cas de fortes perturbations solaires, la précision du positionnement et du temps de propagation du signal est réduite.

Tandis que les émissions EUV et X du Soleil modifient la haute atmosphère de la Terre, les sursauts radio lors des éruptions arrivent au sol. C'est ainsi qu'un fort sursaut perturba les radars de contrôle aérien en novembre 2015, au point que certains aéroports au sud de la Suède arrêtaient le décollage et l'atterrissage pendant une heure.

Les radars scrutant l'horizon au moment du coucher du Soleil prenaient le sursaut de face. D'autres sursauts radio ont occasionné des pertes temporaires de sensibilité de systèmes GPS.

L'atmosphère neutre et l'orbitographie

L'expansion de l'atmosphère terrestre chauffée par le rayonnement EUV-X du Soleil ou par la dissipation des courants électriques des orages géomagnétiques fait qu'un satellite en orbite basse, autour de 400 km d'altitude, se trouvera dans une atmosphère plus dense. Freiné par la friction, le satellite perd de l'altitude. Des manœuvres sont nécessaires pour le remonter. Un cas extrême est la perte du satellite ASTRO D, à la suite d'un freinage atmosphérique accrue lors d'un orage géomagnétique en juillet 2000. La surveillance de débris spatiaux, qui s'accumulent à cause de la prolifération des satellites artificielles, et les activités militaires reliées sont aussi fortement impactées par les changements d'orbite qu'engendre l'activité solaire au travers de la variabilité de la densité de l'atmosphère terrestre.

Particules de haute énergie : électronique embarquée et cellules du vivant

L'impact des ions sur des composants électroniques peut les endommager, avec un effet immédiat ou d'usure sur le long terme. Des ions peuvent aussi créer des incidents ponctuels comme l'induction de commandes erronées dans les calculateurs. La capacité inégale des électrons et ions de pénétrer des matériaux peut conduire à l'accumulation locale de charges et finalement à une décharge électrique. Ce sont des effets bien connus des constructeurs de satellites. On peut se prémunir contre des incidents par des mesures d'ingénierie comme l'utilisation de matériaux résistants ou le doublage de circuits électroniques qui assurent le fonctionnement de l'un quand l'autre est perturbé. Selon les ingénieurs du CNES, la fabrication de satellites avec les spécifications strictes déduites notamment de quelques grands événements solaires à particules et du spectre du rayonnement cosmique galactique, a fait ses preuves pour éviter des pertes. La miniaturisation des électroniques et la course aux équipements à bas coûts peuvent augmenter la vulnérabilité des satellites. Des effets similaires peuvent intervenir dans l'air (avionique) et même au sol, mais l'atmosphère procure une protection largement accrue. L'environnement spatial est surveillé avant les lancements de satellites, qui peuvent être suspendus en cas d'un événement solaire fort, tout comme pendant une situation météorologique adverse.

Les particules de haute énergie peuvent aussi endommager des cellules biologiques. Les cellules vont initier leur

propre réparation, ou bien mourir. La mort d'un nombre trop grand de cellules produira des effets immédiats sur la santé, tandis que la survie et la multiplication de cellules mal réparées augmentent le risque de conséquences tardives, notamment le développement de cancers. Pour le personnel navigant de l'aviation civile, le suivi individuel des doses reçues lors des vols est obligatoire en Europe. En France, cette surveillance est réalisée par l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN). Une prévision des intensités du rayonnement cosmique permanent, venant de la Galaxie, est fournie par l'Observatoire de Paris pour les mois à venir, et en cas d'un événement solaire la dose de radiation supplémentaire est évaluée à partir des mesures par des détecteurs au sol, les moniteurs à neutrons.

Les astronautes ne bénéficient d'aucune protection par l'atmosphère. Les vols vers la Lune et Mars seront exposés de plein fouet aux particules de haute énergie. Des protections matérielles existent, mais ne sont pas complètes : la réaction de particules de haute énergie avec ces matériaux peut créer des particules secondaires qui sont aussi dangereuses que les primaires, sinon plus. C'est un enjeu crucial des vols spatiaux habités.

Au sol de la Terre : réseaux électriques

L'impact d'un courant solaire ou d'une éjection de masse particulièrement rapides crée des variations du champ magnétique de la Terre sur des échelles de quelques secondes à plusieurs minutes. Elles induisent une force électromotrice dans l'atmosphère et à la surface de la Terre, engendrant des courants électriques dans des transformateurs et les réseaux de transmission de l'électricité. Comme sa variation est lente par rapport aux 50 Hz ou 60 Hz des réseaux, la perturbation peut être considérée comme un courant continu se superposant au courant alternatif transporté. Ceci peut conduire à la saturation d'un transformateur pendant un demi-cycle d'opération, avec des conséquences variant avec l'intensité du courant continu et qui peuvent aller jusqu'à la coupure du réseau. En 1989 des transformateurs ont même été détruits dans la province du Québec, créant une panne de courant de plusieurs heures. Ces effets sont plus prononcés à haute latitude magnétique, où les lignes de champ magnétique les plus exposées aux variations solaires entrent dans le sol. Mais deux transformateurs ont également été endommagés en Grande-Bretagne lors de l'orage de mars 1989. L'intensité des courants dépend aussi de la conductivité du sol, ce qui crée des variations géographiques en plus de celles dues à la latitude magnétique. On voit notamment une différence notable entre la Grande-Bretagne et la France, qui fait penser que la France est mieux protégée par sa localisation magnétique et la nature de son sol.

Résumé et conclusion

La variation de la couronne solaire a des répercussions sur l'environnement spatial de la Terre et, au travers de cela, sur la technologie humaine. Ce fait était connu dès la seconde guerre mondiale – la météorologie de l'espace n'est pas une discipline récente. Mais elle s'est beaucoup développée avec l'opération de satellites et la généralisation de services basés sur ceux-ci.

Bien des effets adverses de la météorologie de l'espace sont maîtrisés par des solutions éprouvées d'ingénierie et des activités de prévision. La question est alors de savoir quantifier un évènement solaire extrême qui arrivera très rarement, mais peut avoir un impact lourd. La défaillance de systèmes électriques qui créeraient des pannes prolongées serait un risque majeur pour la société toute entière. Le recul historique que nous permettent les observations est de quelques dizaines d'années, 150 ans pour les orages géomagnétiques. Il y a là des besoins en recherche pour caractériser ces évènements, et il y a un intérêt à améliorer l'échange d'informations entre l'industrie, qui connaît les pannes survenues, et la recherche, qui travaille sur les processus physiques.

La recherche en relations Soleil-Terre a développé en France et ailleurs un certain nombre d'activités qui peuvent déboucher sur des services en météorologie de l'espace. Des collaborations existent avec l'aviation civile et l'armée, avec des intensités d'échange qui varient entre autres avec le cycle solaire. Une réelle activité organisée en météorologie de l'espace doit passer par la collaboration entre les utilisateurs et la recherche. La recherche ne peut se substituer aux utilisateurs pour affirmer l'importance de la météorologie de l'espace. Elle ne peut en général pas organiser une activité opérationnelle. Mais elle est en mesure de fournir des outils et une expertise susceptibles de soutenir des activités opérationnelles menées par les utilisateurs. C'est depuis 2019 le cas pour un service de météorologie de l'espace au bénéfice de l'aviation civile mondiale, fourni par plusieurs consortia internationaux, avec la participation de la France autour de Météo France et des sociétés CLS et ESSP, et avec un fort soutien d'instituts de recherche dans différents pays européens.

