

VÉRONIQUE BOMMIER
LESIA – Observatoire de Paris

LA **Météo** *spatiale*

La météorologie spatiale ou *space weather* s'intéresse aux effets des éjections de matière solaire. Heureusement, sur Terre, nous en sommes protégés par notre atmosphère et par notre champ magnétique.

L'OBJET DE LA MÉTÉOROLOGIE SPATIALE ET SON UTILITÉ

Les particules solaires éjectées sont des particules chargées: essentiellement électrons et protons. L'Univers est essentiellement composé d'hydrogène (90 %) comportant un électron et un proton. Lorsque ces particules chargées arrivent vers la Terre, elles sont déviées vers les pôles en raison de la structure dipolaire du champ magnétique terrestre. Elles pénètrent dans l'atmosphère et perdent leur énergie par collision avec les atomes atmosphériques, principalement l'oxygène qui passe alors dans un état excité. L'atome d'oxygène se désexcite ensuite en émettant une raie spectrale, rouge ou verte, ou plus rarement bleue (voir l'article p. 32), créant les aurores boréales, spectacle magnifique mais inoffensif, visible surtout à la latitude de la Norvège. Il est arrivé qu'on voie des aurores boréales à des latitudes plus basses, telles celles de l'observatoire de Haute-Provence (près de Forcalquier) ou de Sydney en Australie.

A priori l'effet sur Terre est donc faible, bien que de fortes éruptions aient parfois conduit à perturber les circuits électriques et à provoquer des pannes importantes (Québec 1989, Suède 2003) et le *space weather* concerne donc surtout tout ce qui quitte l'atmosphère: les satellites, les fusées, la Station spatiale internationale et ses habitants, et même les avions sur les routes polaires.

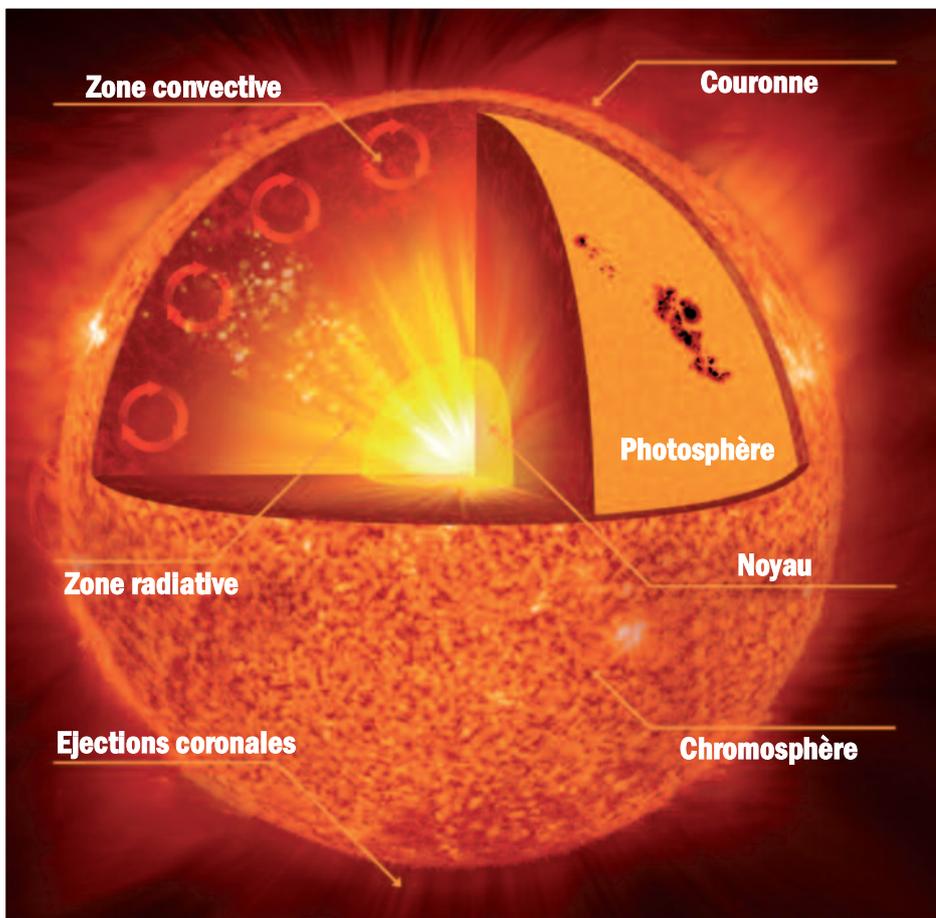


© Nasa/SDO

Le bombardement d'un satellite par les particules solaires énergétiques lourdes¹ (essentiellement des protons) peut créer des perturbations qui détériorent les circuits électroniques ou engendrent des courants induits produisant des signaux parasites. Quant à la communication radio avec un satellite, elle peut être brouillée par les modifications des conditions physiques de l'ionosphère terrestre. Il y a donc nécessité d'une prévision pour choisir le moment de lancement d'une fusée (pour éviter le risque de perturbation informatique interne) ou gérer les satellites (les mettre en veille ou les orienter, afin de protéger les détecteurs et les panneaux solaires).

Les avions sont équipés de détecteurs de radiations qui captent ces particules en temps réel, ne serait-ce que pour surveiller les doses reçues par l'équipage qui fait des voyages fréquents. Quand la dose devient trop forte, l'avion se dévie vers le sud. Mais alors, la route est plus longue et ces déviations ont un coût dû aux retards et aux correspondances manquées. On voit toute la nécessité économique d'une bonne prévision.

Autre effet de ces radiations sur l'homme: en cas de sortie dans l'espace des astronautes de la Station spatiale internationale, ou d'un autre vaisseau spatial, le rayonnement peut s'avérer mortel lors d'une éruption, d'où encore la nécessité d'une meilleure prévision, pour organiser ces sorties. Pour comprendre la météorologie spatiale, il est très important de distinguer entre le « background », ou fond à variation lente et continue comme le vent solaire ou le cycle solaire, et les événements ponctuels et sporadiques comme les éruptions.

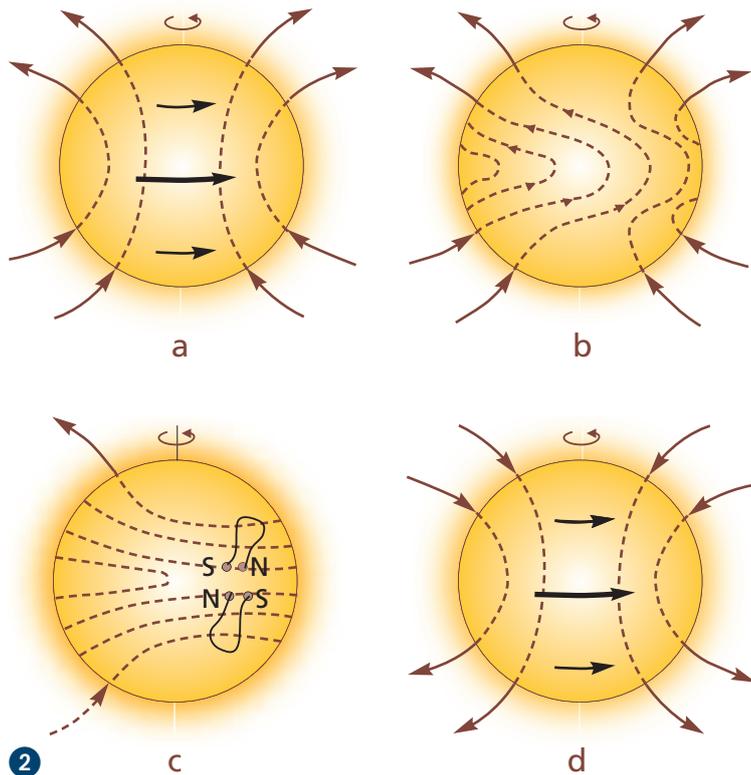


LES ÉVÉNEMENTS À VARIATION LENTE

● LA COURONNE ET LE VENT SOLAIRE

La couronne solaire (visible en éclipse ou dans certains domaines spectraux comme l'UV) entoure le Soleil. Elle est très ténue et très chaude (fig. 1), et peuplée d'électrons, de protons et d'ions. Elle éjecte des particules chargées (électrons, protons) qui constituent ce qu'on appelle le « vent solaire », flux continu de particules qui part vers le milieu interplanétaire en suivant les lignes de force du champ magnétique. Par rapport à la masse du Soleil, la perte de masse est très faible et n'est pas la cause de la mort programmée du Soleil, qui deviendra géante rouge dans 5 milliards d'années.

1. Coupe du Soleil. Du centre vers l'extérieur : le cœur, siège des réactions nucléaires ; la zone radiative et la zone convective dont nous ne recevons directement aucun photon ; la photosphère, qui émet le rayonnement visible en rouge lors de l'éclipse ou dans la raie H α de l'hydrogène ; enfin, la couronne dont il est question dans cet article.



● UN MODÈLE SIMPLE DU CHAMP MAGNÉTIQUE SOLAIRE

Le champ magnétique global du Soleil est, grossièrement, assimilable à celui d'un dipôle, avec des pôles magnétiques nord et sud approximativement alignés sur l'axe de rotation. Cette configuration engendre une « ligne magnétique neutre » (un endroit de champ horizontal) au niveau de l'équateur (fig. 2). Cette ligne sépare deux « polarités », une de champ magnétique sortant du Soleil et une de champ magnétique entrant dans le Soleil. Au cours du cycle, sous l'effet de la rotation solaire, cette ligne se tord sur la surface, puis se coupe en trois. Deux nouvelles polarités apparaissent au niveau de l'équateur et les

2 Schéma de la structure magnétique globale du Soleil et de son évolution au cours du cycle de 11 ans. On remarquera que les lignes de champ sont inversées entre (a) et (d).

3 Éclipse solaire observée par Jean-Marc Leclaire. **4** Observation de la couronne en UV par le satellite TRACE le 25 juillet 2000 à 17,1 nm (couronne à 1 million de degrés).

anciennes polarités migrent vers les pôles, où elles finissent par disparaître au moment du maximum d'activité. Le Soleil a un cycle magnétique de 22 ans, la polarité au pôle changeant de signe tous les 11 ans.

On peut avoir une idée plus réaliste de la forme de ce champ magnétique en regardant des images de la couronne solaire, soit en éclipse, soit en UV ou en rayons X (fig. 3 et 4), car dans la couronne la matière suit les lignes de champ magnétique. Notez la présence de nombreuses boucles, certaines joignant des taches entre elles.

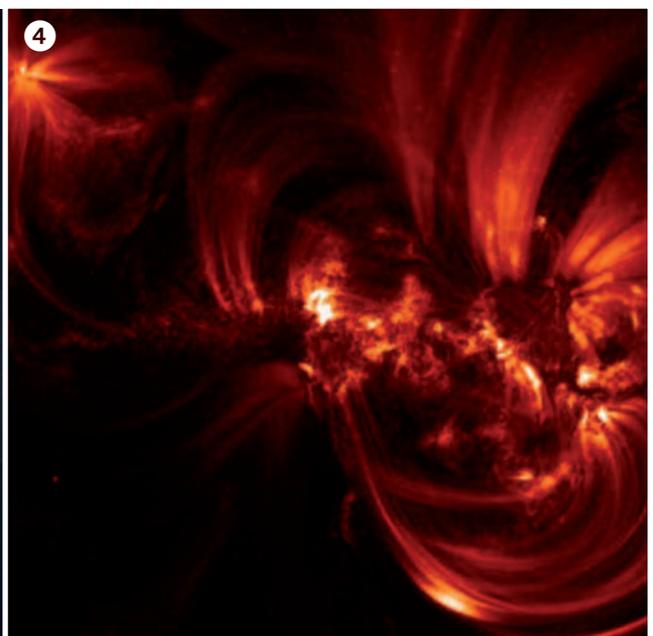
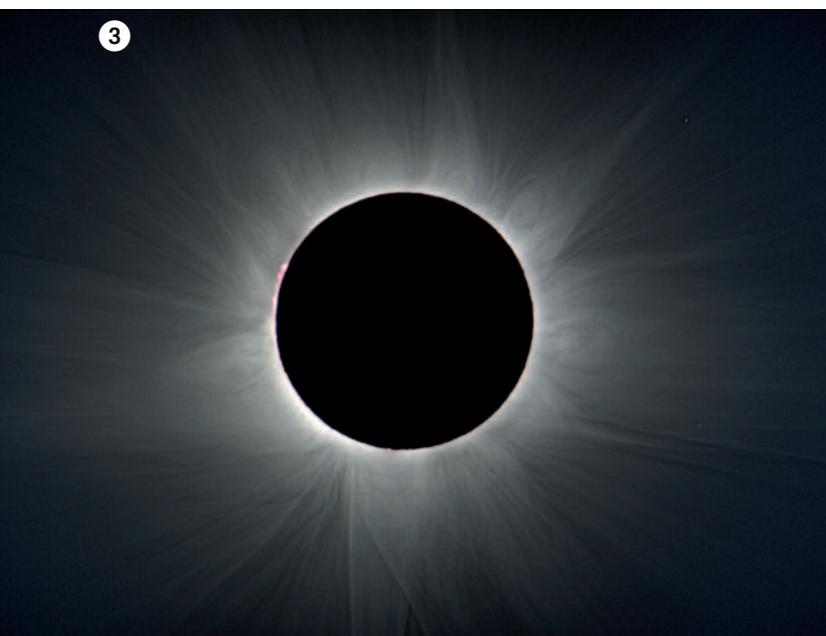
En minimum d'activité, on voit des zones sombres autour des pôles de l'astre: les « trous coronaux », moins denses et moins chauds que le reste de la couronne (fig. 5). Leur champ magnétique ne se résout pas en boucles, il est ouvert vers l'espace interplanétaire.

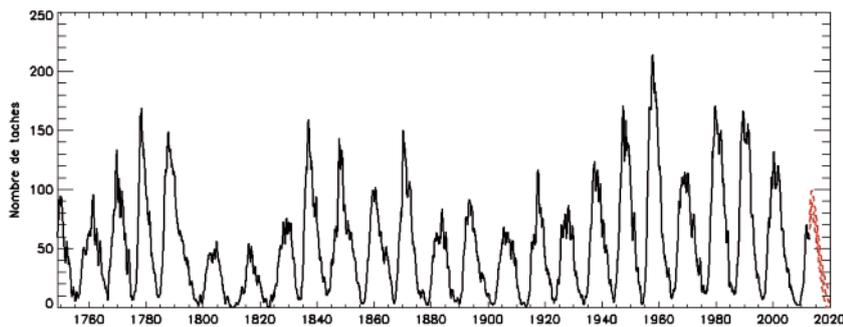
En période de maximum d'activité, il y a moins de trous coronaux et la matière coronale est visible tout autour du Soleil.

● VENT RAPIDE ET VENT LENT

On distingue deux sortes de vent, le « vent lent » (400 km/s), principalement émis dans le plan de l'orbite de la Terre, et le « vent rapide » (800 km/s).

Le vent rapide est émis dans les « trous coronaux », qui sont généralement situés autour des pôles solaires, mais qui peuvent parfois descendre à des latitudes plus basses comme sur la figure 5. Lorsque la Terre se trouve dans la « ligne de mire » d'un trou coronal, les particules éjectées peuvent l'atteindre en suivant les lignes de champ magnétique qui se replient vers le plan de l'écliptique. Comme ces trous coronaux polaires ne sont là qu'en période de minimum, il y a des variations lentes du flux continu de particules solaires, selon le moment dans le cycle d'activité. Ces variations dans le flux continu engendrent des variations cycliques dans les conditions physiques de l'ionosphère terrestre.





1. QUELQUES RAPPELS DE MAGNÉTISME

Rappelons qu'il y a une relation « dans les deux sens » entre champ magnétique et particule chargée en mouvement :

- le champ magnétique oblige les particules chargées en mouvement à spiraler autour de lui, il les guide donc (si elles ne sont pas trop denses), on dit que les particules suivent le champ ;

- les particules chargées en mouvement peuvent être assimilées à un courant électrique. Un courant électrique crée un champ magnétique autour de lui (cf. la loi de Biot et Savart).

Les relations champ-courant sont décrites par les équations de Maxwell. En particulier, le phénomène de l'induction : un champ magnétique variable au cours du temps crée un courant dans une spire (ou un solénoïde) (cela peut être la spire qu'on fait bouger dans un champ magnétique fixe, comme la dynamo de vélo). ●

6 Nombre de taches enregistrées par l'Observatoire de Bruxelles (les courbes rouges sont des prédictions avec une barre d'erreur autour d'une position moyenne).

● EFFETS DU VENT SOLAIRE ET DU RAYONNEMENT

En période de minimum d'activité, les trous coronaux plus nombreux éjectent plus de vent rapide, alors qu'en période de maximum d'activité, les flux X et UV sont plus intenses.

Le flux de particules du vent solaire est susceptible de charger la surface des satellites, effet bien connu et pris en compte dans la construction de ces derniers.

Autre effet « background » : les rayons cosmiques. Ils ne sont pas solaires, ils viennent de l'extérieur du Système solaire. Ce sont aussi des particules chargées énergétiques, susceptibles des mêmes effets. Le champ magnétique global solaire nous en protège, mais la variation cyclique du champ solaire conditionne le flux parvenant à la Terre :

plus de particules en minimum d'activité, plus de particules en présence d'un trou coronal, d'où l'importance de l'alerte au trou coronal citée plus haut. Quant au rayonnement X-UV, il modifie les conditions physiques de l'ionosphère, notamment la scintillation (la scintillation forme des gouttelettes de plasma de conditions physiques différentes qui ralentissent ou troublent la propagation des ondes radio qui assurent la communication avec les satellites).

5 Trou coronal observé par SDO/AIA à 19,3 nm le 28 juin 2010.

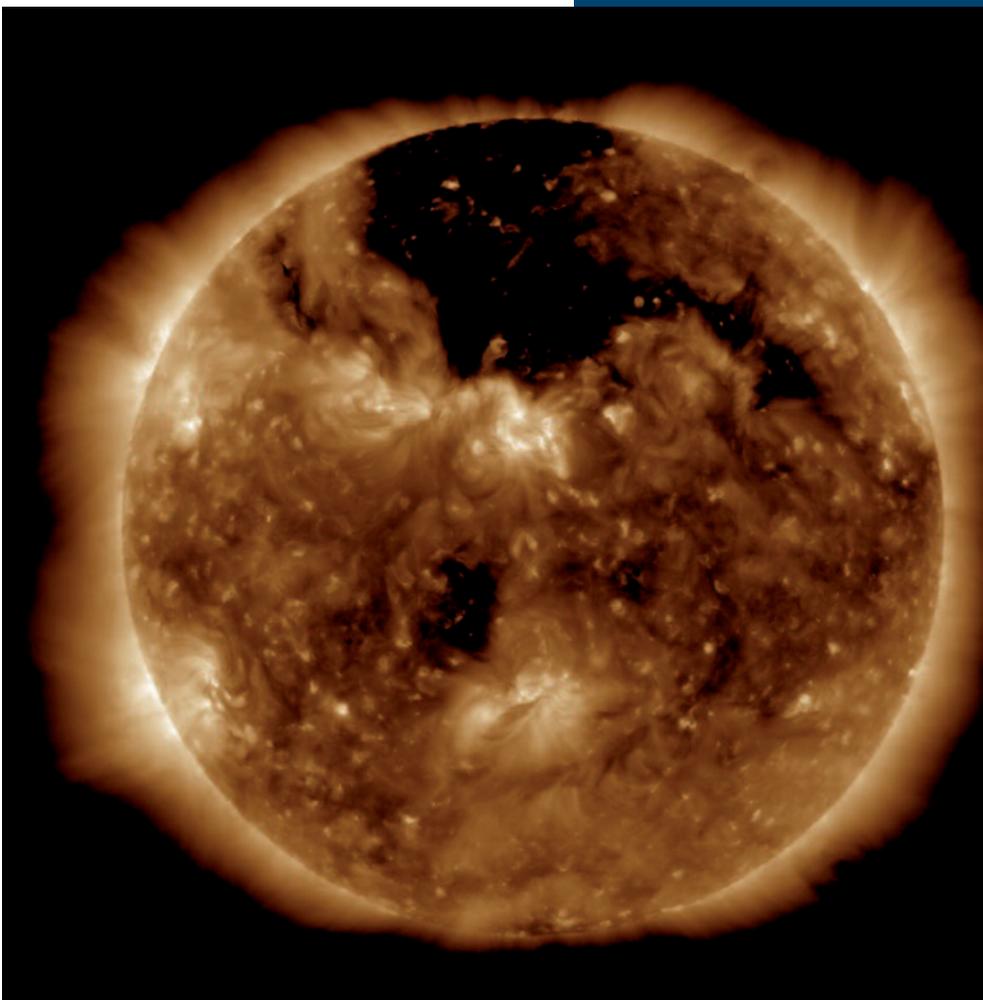
LE CYCLE SOLAIRE

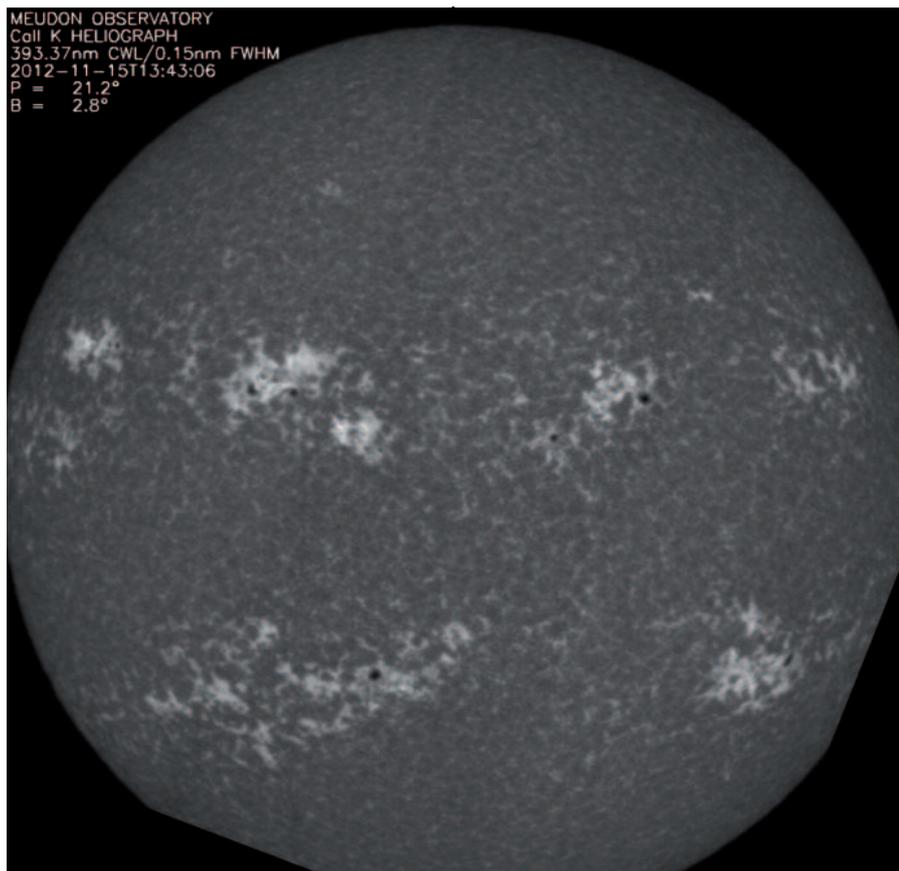
Les taches solaires sont connues depuis l'an 1000, mais on ne les observe que depuis Galilée (qui fut le premier à les regarder et les dessiner avec un instrument vers 1612). On ne les comptabilise que depuis lors. On n'a donc que 400 ans de recul pour étudier la variation du nombre de taches, nombre qui varie selon le cycle de 11 ans (fig. 6). Le nombre de taches au maximum est lui-même variable d'un cycle à l'autre. Il existe certainement des périodes plus longues superposées à la période de 11 ans (on suspecte une période de 100 ans : maxima de 1806, 1906, 2011 moins importants que les autres), mais on n'a pas assez de recul pour être sûr de cette période.

Il y eut un minimum prolongé pendant 70 ans, dit « minimum de Maunder », entre 1650 et 1720 (époque de Louis XIV) avec très peu de taches. Cette période pourrait avoir introduit, début 1700, un « petit âge glaciaire ».

● LA CONSTANTE SOLAIRE ET LE CLIMAT TERRESTRE

La « constante solaire » (nombre de kWm^{-2} reçus sur Terre, de l'ordre de 1,36) varie avec le cycle solaire. Sa variation est très faible, entre un millième et un dix-millième en valeur relative. Elle diminue au moment du minimum du cycle, comme on le verra plus loin. C'est l'énergie totale reçue, c'est-à-dire la puissance multipliée par le temps, cumulée sur 50 ans au minimum, qui a pu





7 Spectrohéliogramme de l'observatoire de Meudon dans la raie K du calcium ionisé. On remarquera les taches solaires en sombre et les régions actives plus lumineuses que le reste de la photosphère.

conduire au petit âge glaciaire. La variation d'un seul cycle faible est trop petite et le temps trop court pour que les effets climatiques sur Terre soient détectables. En cas de nouveau minimum de Maunder, il faudrait attendre 50 ans pour observer un effet notable.

Le Soleil n'est cependant pas « une horloge ». La période de 11 ans n'est pas rigide, elle peut varier légèrement comme on l'a vu récemment lors du dernier minimum qui était attendu pour 2007 et s'est produit en 2008. Le minimum a duré un peu plus longtemps que prévu, mais pas assez longtemps pour conduire à un refroidissement et un nouveau minimum de Maunder. L'activité est actuellement « repartie », mais à un niveau peu élevé comme au début des XIX^e et XX^e siècles. La constante solaire varie peu avec le cycle, mais le rayonnement X-UV varie davantage, de l'ordre de 20 % ; cette partie du spectre ne contribue que peu à la constante solaire dont l'essentiel provient du rayonnement visible. Elle agit sur les hautes couches de l'atmosphère terrestre (l'ionosphère). Nous en sommes protégés au niveau du sol. Les effets de cette variation sur le climat terrestre sont peu modélisés pour le moment, mais peu d'effets sont attendus, car l'ionosphère a une altitude beaucoup plus élevée que la couche nuageuse et les vents terrestres.

● LES RÉGIONS ACTIVES AUTOUR DES TACHES SOLAIRES

Une tache solaire est le lieu d'émergence de forts champs magnétiques verticaux (2 000 gauss ou 0,2 tesla) (fig. 7), qui limitent les mouvements de la matière (convection) provenant des régions plus profondes et plus chaudes. Cette diminution de la convection se traduit par une baisse de la température qui descend à 3 000 K dans « l'ombre de la tache » alors qu'elle est de 6 000 K dans les régions « calmes » (attention, la température varie aussi avec l'altitude). Une tache solaire nous indique donc la présence de champs magnétiques forts. Les taches vont le plus souvent par deux : l'une est de « polarité positive » avec champ sortant du Soleil et l'autre de « polarité négative » avec champ entrant dans le Soleil (fig. 2). La tache située le plus à l'est est dite « en tête » de l'autre, à cause du sens de rotation du Soleil. Le signe de la polarité de la tache de tête dépend de l'hémisphère solaire et change d'un cycle à l'autre (cycle magnétique de 22 ans). Une tache solaire est entourée d'une région active brillante. La tache est sombre et la région active brillante, mais le bilan est positif en matière de constante solaire. Cette constante augmente donc légèrement en maximum d'activité, en raison du nombre de taches et de régions actives.

LES ÉVÉNEMENTS PONCTUELS ET VIOLENTS

● LES ÉRUPTIONS ET LES CME

Comme le champ magnétique est plus « torturé » dans les régions actives, avec des lignes de champ de sens contraires entrant en contact, il se produit des « reconnexion » ou réarrangements des lignes de champ, capables de comprimer la matière et de l'éjecter dans l'espace interplanétaire. C'est le phénomène des éruptions solaires qui se produisent dans les régions actives. Ces éruptions visibles par un « embrillancement » local durent environ 10 minutes (fig. 8). Les plus intenses émettent des rayons X, des particules très énergétiques et rapides, et des « éjections de masse coronale » (Coronal Mass Ejection) (fig. 9), plus lentes mais importantes en nombre de particules.

Cependant, toutes les CME ne proviennent pas d'éruptions solaires proprement dites (ou *solar flares*). Un quart des CME vient de « l'éruption » ou « envol » de filaments, qui mettent probablement moins d'énergie en jeu. Un filament est une sorte de nuage de matière plus sombre et plus froide qui flotte dans la couronne. Observé sur le disque, le nuage absorbe le rayonnement qui provient des couches plus profondes et apparaît comme une région sombre lorsque l'on regarde le Soleil dans les raies de l'hydrogène, en particulier la raie H α à 656,3 nm. Lorsque, suite à la rotation du Soleil sur lui-même, ce nuage arrive au bord du disque, il apparaît en émission et on l'appelle « protubérance ». Ce nuage, sous-tendu par le champ magnétique, peut s'envoler, créant ainsi une CME par un effet différent d'une éruption solaire (fig. 10).

● LES EFFETS DE CES ÉVÉNEMENTS VIOLENTS

Nous allons étudier l'effet des éruptions et des CME, en se rappelant qu'une petite partie des CME vient de l'éjection d'un filament et non d'une éruption solaire au sens strict. Trois effets succèdent à de tels événements :

- 8 minutes après : les rayons UV et X modifient les conditions physiques de l'ionosphère² terrestre et perturbent les communications avec les satellites.
- 20 minutes après : arrivée des particules énergétiques (SEP : Solar Energetic Particles) susceptibles d'endommager les circuits des satellites eux-mêmes, ou d'y créer des courants induits, sources de signaux parasites (SEE : Single Event Effect). Des parasitages de la communication sont perceptibles, avec parfois perte de la communication.
- Au moins 48 heures (de 2 à 4 jours) après l'éruption : arrivée de la CME, ensemble de particules chargées, moins énergétiques, mais en mouvement, créant donc un champ magnétique autour d'elles, qui vient s'ajouter au champ magnétique terrestre. Un « orage magnétique » se

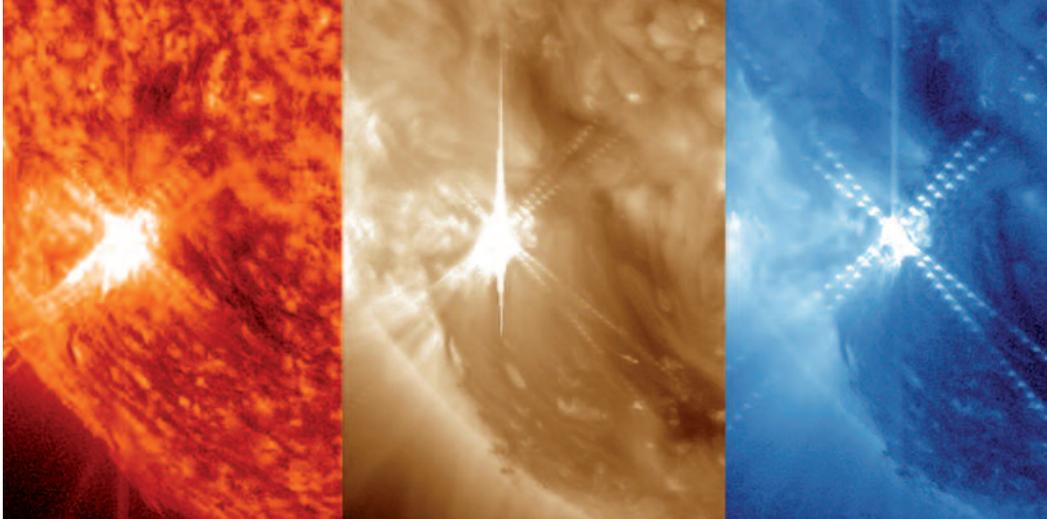
produit à la rencontre de ces deux champs, ce qui entraîne une perturbation du champ magnétique terrestre à cet endroit, qui peut créer de l'induction jusqu'à la surface du sol (qui est conductrice). Les courants induits dans les réseaux électriques ainsi que dans les pipelines font l'objet d'études et de surveillance attentive. La CME peut aussi charger la surface des satellites, créant un champ électrique et des perturbations à l'intérieur. Enfin, l'arrivée de l'éjection de masse coronale peut provoquer les aurores boréales (voir p. 32).

L'ÉTAT ACTUEL DE LA PRÉVISION EN MÉTÉOROLOGIE SPATIALE

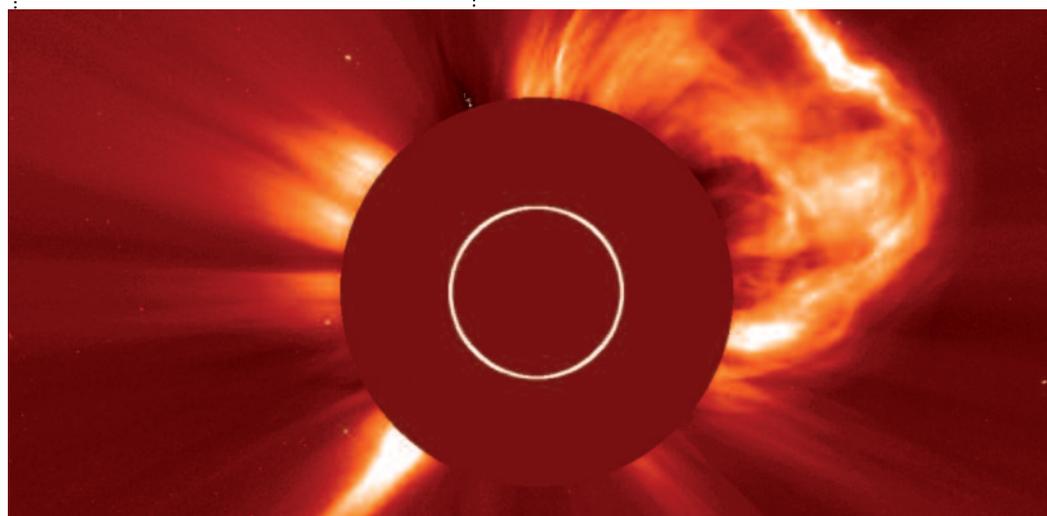
On voit tout de suite qu'il y a deux temps à distinguer dans la prévision. **AVANT L'ÉRUPTION DE LA CME** – On en est encore actuellement à un stade très empirique. Il s'agit de prédire les éruptions solaires. On pourrait utilement faire un parallèle avec la météorologie du climat terrestre. Autrefois, on regardait la forme des nuages. La présence de cirrus annonçait l'arrivée du front chaud de la perturbation, suivie par le front froid quelques heures après. Maintenant, la météorologie du climat terrestre a bien changé: on a des cartes de températures, de vents, de nuages, et on fait « tourner » un modèle qui fait la prévision.

En ce qui concerne le Soleil, on sait reconnaître certains « types » de régions actives et de configurations de champ magnétique pouvant produire des éruptions. Toutefois, on ne sait pas prédire avec précision l'instant du déclenchement de l'éruption. Pour en arriver à une précision semblable à celle de la météorologie terrestre, il est nécessaire de produire régulièrement des cartes du vecteur champ magnétique solaire, d'extrapoler jusque dans la couronne les champs magnétiques mesurés dans la photosphère, et d'y ajouter un modèle évolutif (lire l'encadré 2).

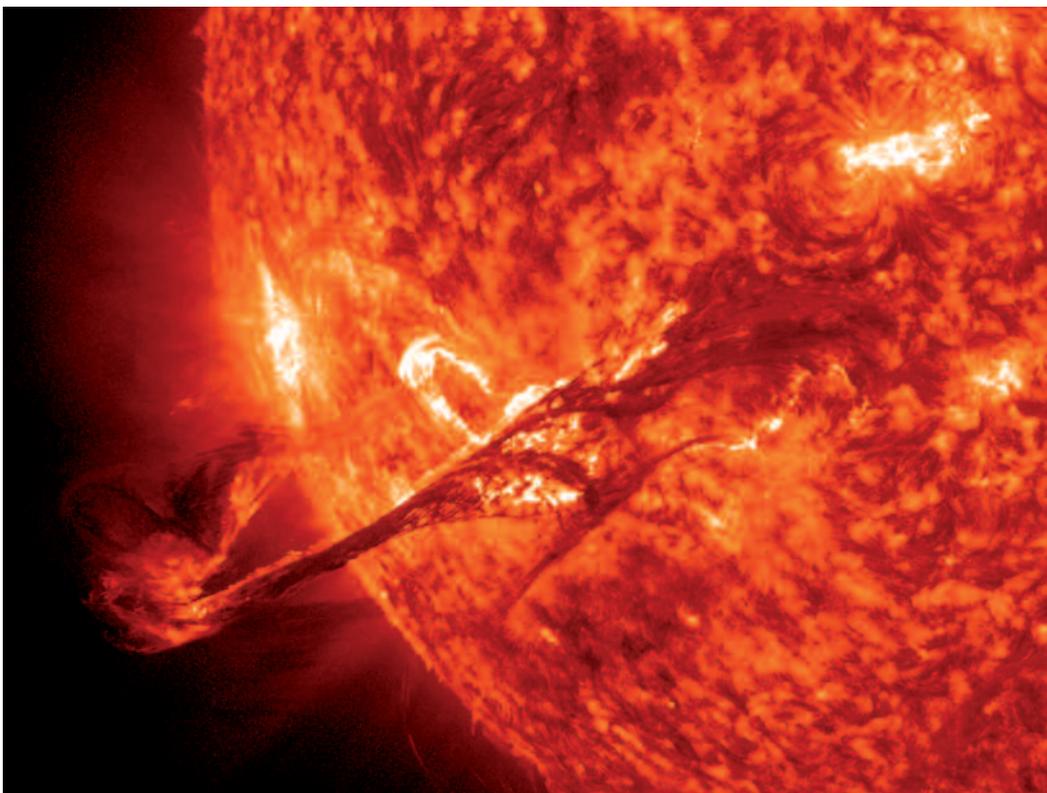
APRÈS L'ÉRUPTION DE LA CME – C'est beaucoup plus facile et plus clair. Les rayons X arrivent tout de suite (mais ils ne sont pas encore les plus dangereux), et les particules très énergétiques 20 minutes après. Pour l'orage magnétique, le délai est de 48 heures. Nous sommes actuellement équipés de satellites surveillant la propagation de la CME: les deux satellites *Stereo A* (comme « ahead », en avant de la Terre sur sa trajectoire) et *B* (comme « behind », en arrière de la Terre), qui observent le Soleil « en stéréo », voient la CME et permettent de la localiser en 3D, ainsi que le satellite *ACE* placé au point de Lagrange³ en avant de la Terre par rapport au Soleil, qui « voit passer » la CME entre une demi-heure et une heure avant qu'elle n'atteigne la Terre. C'est une sentinelle. ■



8 Éruption du 12 novembre 2012 observée par le satellite *SDO* dans 3 longueurs d'onde différentes: 30,4 nm (chromosphère), 19,3 nm et 35,6 nm couronne.



9 Une CME importante observée le 27 janvier 2012 à la suite d'une éruption de classe X1,7. (observation *Lasco/SOHO*).



10 Très bel envol de filament observé par *SDO* le 31 août 2011 à 30,4 nm. (© Nasa)

2. PRODUCTION DE CARTES DU CHAMP MAGNÉTIQUE VECTORIEL SOLAIRE ET EXTRAPOLATIONS

La mesure du champ magnétique se fait par l'analyse de la polarisation du rayonnement. La théorie est capable de donner la polarisation qui devrait être vue pour un champ magnétique donné, mais il nous faut « inverser » cette relation pour remonter de la polarisation observée au champ magnétique qui l'a créée. Cette inversion se fait numériquement en utilisant un algorithme. De plus, la relation n'est pas bijective, et plusieurs vecteurs champ magnétique sont les solutions de la même polarisation observée. En dernière étape, il faut donc résoudre ces ambiguïtés, ce qui se fait en mesurant le champ à deux altitudes voisines et en minimisant $|\text{div}B|$ selon les équations de Maxwell. Les meilleures observations

à l'heure actuelle sont celles fournies par les satellites *SDO* et *Hinode*, mais dans les figures ci-dessous nous présentons une observation faite avec le télescope français sans polarisation instrumentale THEMIS installé sur le site d'Izaña à Ténérife (Espagne), sur lequel nous avons mis au point les méthodes d'inversion.

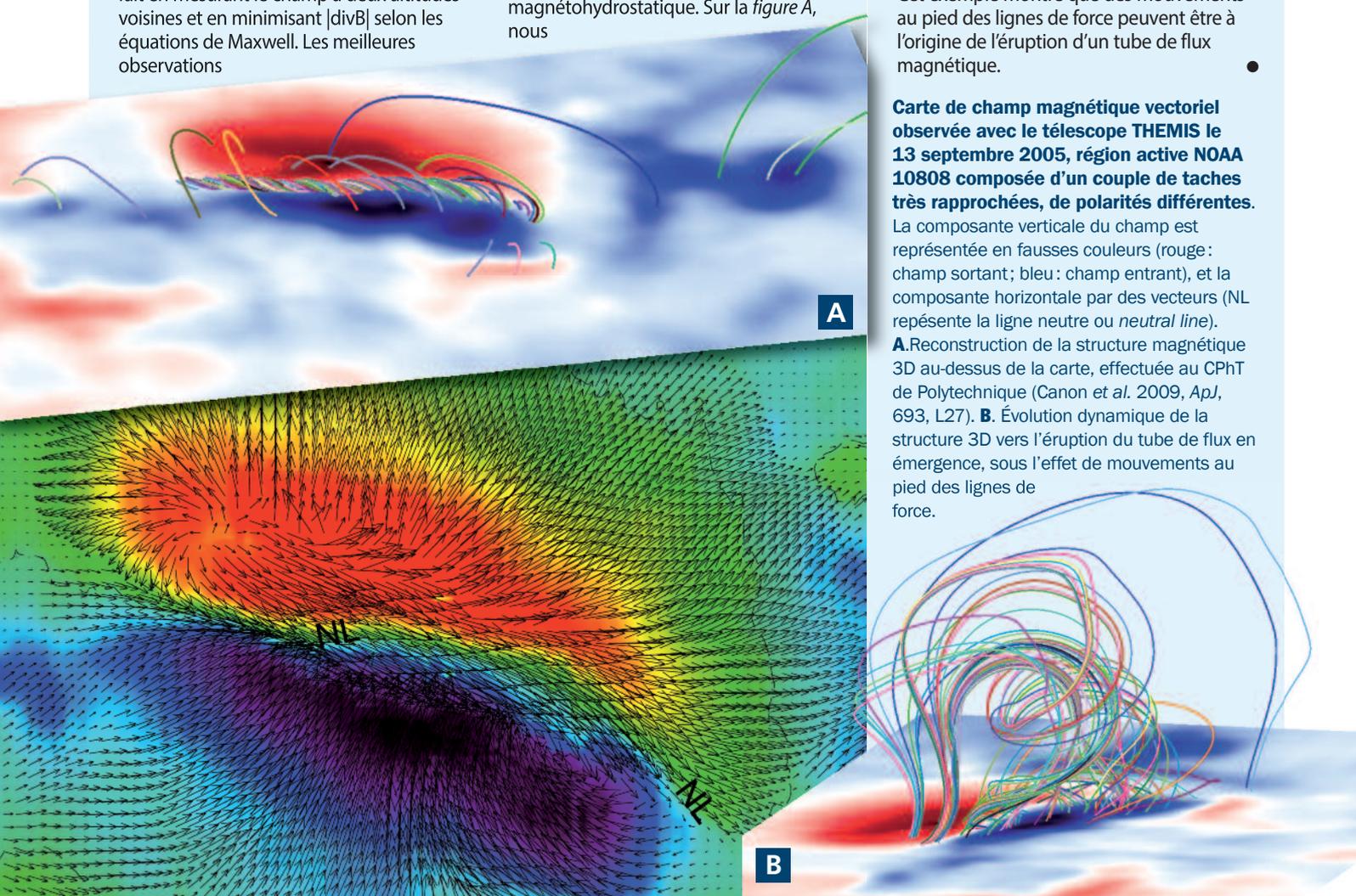
La structure 3D du champ magnétique au-dessus de la tache de la carte s'obtient par reconstruction (aussi appelée extrapolation). La carte sert de conditions aux limites pour la reconstruction, qui utilise des algorithmes basés sur les équations de la magnétohydrostatique. Sur la *figure A*, nous

présentons la reconstruction faite à partir de la carte observée avec THEMIS. Cette reconstruction a été faite dans un laboratoire de l'École polytechnique, le CPhT. Elle a mis en évidence un tube de flux en émergence entre les deux taches. La *figure B* montre l'évolution possible de cette structure magnétique en supposant un mouvement photosphérique au pied de lignes de force magnétique, à l'aide la théorie de la magnétohydrodynamique. Cette recherche, pour les applications de météorologie spatiale, est encore à entreprendre pour devenir systématique. Cet exemple montre que des mouvements au pied des lignes de force peuvent être à l'origine de l'éruption d'un tube de flux magnétique.

Carte de champ magnétique vectoriel observée avec le télescope THEMIS le 13 septembre 2005, région active NOAA 10808 composée d'un couple de taches très rapprochées, de polarités différentes.

La composante verticale du champ est représentée en fausses couleurs (rouge : champ sortant ; bleu : champ entrant), et la composante horizontale par des vecteurs (NL représente la ligne neutre ou *neutral line*).

A. Reconstruction de la structure magnétique 3D au-dessus de la carte, effectuée au CPhT de Polytechnique (Canon *et al.* 2009, *ApJ*, 693, L27). **B.** Évolution dynamique de la structure 3D vers l'éruption du tube de flux en émergence, sous l'effet de mouvements au pied des lignes de force.



1. On appelle souvent ces particules chargées des radiations. Ce sont bien des particules. C'est un abus de langage, car avant la découverte des rayons X on appelait tout « radiation ».

2. L'ionosphère est une couche plasma autour de la Terre. Un plasma est un gaz partiellement ionisé, c'est-à-dire que les constituants ont mis en commun une partie de leurs électrons, et se sont donc transformés eux-mêmes en ions. Cette ionisation est due au rayonnement solaire UV et X et n'atteint pas le sol, nous en sommes protégés.

3. Le point de Lagrange est un point où les attractions du Soleil et de la Terre se compensent : on peut y laisser un satellite en position fixe.

POUR EN SAVOIR PLUS

Space Weather Prediction Center (centre de prévision américain) :

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

Solar monitor :

<http://www.solarmonitor.org/>

L'organisation météorologique mondiale a une section « space weather ».