

DOSSIER

LA-FIN-DU-MONDE.FR



TEMPÊTES SOLAIRES

Dossier : Tempêtes solaire



Posté par [ethanol](#) le 1/31/12 • Classé dans [News, Revue de Net / Presse](#)



Les « [tempêtes solaires](#) » reviennent régulièrement comme l'un des risques les plus importants qui menacent l'existence même de l'humanité, voire de la Terre elle-même. J'ai traduit à plusieurs reprises des articles ou repris les mises en garde de certains scientifiques qui attireraient l'attention sur les dangers potentiels liés à ce type d'événement. La catastrophe de Fukushima a elle aussi contribué à relancer le sujet. Les effets les plus marquants d'un orage magnétique déclenché par une tempête solaire pouvant provoquer des pannes d'appareillages électriques, la question de la fiabilité des pompes refroidissant les centrales nucléaires est, en effet, un sujet préoccupant.

Mais pour un non-scientifique, essayer de se faire sa propre opinion n'est pas une tâche facile. Le sujet est extrêmement compliqué et nécessite des connaissances dans des matières nombreuses et différentes (astronomie, physique, magnétisme, électricité...). Difficile de faire autrement que de s'en remettre aux spécialistes du sujet, malheureusement ceux-ci ne semblent pas vraiment d'accord entre eux.

Récemment interviewé par Bernard de La Villardière pour une « [Enquête Exclusive](#) » consacrée à la fin du monde, [l'astrophysicien Guillaume Aulanier](#) a tenu un discours plutôt rassurant. Il a aimablement accepté de répondre aux questions de la-fin-du-monde.fr pour approfondir le sujet et balayer l'ensemble de ces interrogations. Précisons que [Guillaume Aulanier](#) est LA bonne personne sur ce thème puisqu'il est un

spécialiste de l'activité magnétique du Soleil un des facteurs clés de la météorologie spatiale.



Figure 1 - Guillaume Aulanier interviewé par Bernard de La Villardière pour "Enquête Exclusive"

[Wikipédia](#) (que j'ai intensivement sollicité pour préparer cet interview), nous apprend que ce que l'on nomme généralement « tempête solaire » est en fait une *éjection de masse coronale* (en anglais, coronal mass ejection : CME) est une bulle de plasma produite dans la couronne solaire (...)elles peuvent parcourir la distance Terre-Soleil en quelques jours (typiquement trois jours). Le champ magnétique des CME est très fort : une CME atteignant la Terre peut donc provoquer des orages magnétiques en interagissant avec le champ magnétique terrestre. On observe alors des phénomènes de reconnexion magnétique et certaines lignes de champs peuvent s'ouvrir, affaiblissant ainsi le « bouclier » magnétique de la Terre.

TEMPÊTES SOLAIRES

Avec Guillaume Aulanier, j'ai cherché à approfondir trois points précis,

- la fréquence des tempêtes solaires,
- la mesure de leur dangerosité et les moyens de s'en protéger,
- les effets que la tempête de 1859 pourrait avoir aujourd'hui.

La fréquence des tempêtes solaires.

Quand on se penche sur la littérature, la question de la fréquence des tempêtes solaires est un peu mystérieuse, on parle d'un cycle « de base » de 11 ans (mais qui peut varier de 8 à 15 ans !), d'un autre cycle de 22 ans, d'un troisième de 179 ans (en relation avec le cycle des planètes géantes gazeuses Jupiter et Saturne – Wikipédia), certains auteurs parlent d'éruption centennale... Pour couronner le tout, le cycle actuel (N° 24) semble se comporter de façon légèrement erratique, il a commencé en retard et son « pic », initialement prévu en 2012 s'est vu repoussé en 2013 voir 2014.

La-fin-du-monde.fr : Quand on pense à l'astronomie, on fait référence à des calculs certes compliqués, mais toujours d'une grande précision, il semble que « prédire » l'activité du Soleil ne soit pas si simple. Pouvez-vous nous expliquer cette « imbrication » de différents cycles ?

Guillaume Aulanier : La question est plus vaste qu'elle en à l'air. Il me faut répondre à la problématique des incertitudes sur les

mesures en astronomie, des approximations et limites des modèles physiques, puis de ce que l'on sait sur les fréquences d'occurrence des différentes manifestations cycliques de l'activité solaire, que l'on peut réduire pour simplifier aux taches et aux éruptions solaires, y compris en fonction de leur amplitude.

Allons-y.

Les calculs en astronomie sont effectivement souvent compliqués. Mais ils ne permettent malheureusement pas toujours d'obtenir des résultats très précis. Ça dépend de la situation. C'est un principe bien connu en science, celui-là même qui fait que les enseignants, par exemple de physique, demandent aux élèves de ne pas donner trop de chiffres significatifs dans les résultats de leurs calculs. Il y a plusieurs raisons à cette absence de grande précision.

Premièrement, les mesures à partir desquelles les calculs sont effectués ne sont jamais parfaites. On parle d'incertitudes. La précision, voire la réalité, des résultats chiffrés qui sortent alors de calculs qui utilisent ces mesures, même quand les calculs eux-mêmes sont corrects, est donc soumise aux incertitudes sur les mesures en amont. Ces incertitudes peuvent elles-mêmes être liées à la qualité limitée des instruments de mesure, ou bien au fait qu'il y a trop de choses à mesurer par rapport à ce que l'on peut mesurer, voire les deux.

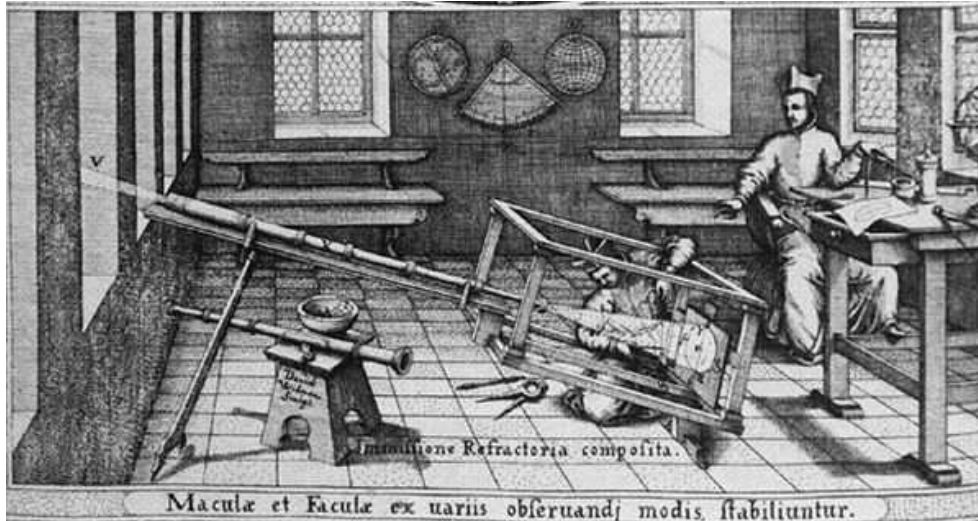


Figure 2 Christoph Scheiner, (1575 - 1650), pionnier de l'optique instrumentale et co-découvreur des taches solaires. Ici étudiant les taches solaires en 1625. (Source : Wikipédia)

Deuxièmement, les calculs eux-mêmes sont toujours effectués à partir de certaines hypothèses théoriques plus ou moins justifiées, et donc plus ou moins correctes. La qualité de leurs résultats en dépend. De plus, certains calculs ne peuvent tout simplement pas se faire autrement qu'avec des outils mathématiques approchés, ou bien avec des programmes qui font appel à des algorithmes numériques imparfaits. La raison est que toutes les équations mathématiques n'ont pas de solution ou de mode de résolution analytique. Tout ceci est source d'une plus ou moins grande imprécision dans les résultats obtenus.

Ces limites se conjuguent surtout dans le cas de phénomènes naturels et d'équipements technologiques complexes. Cela conduit à une difficulté à établir leur description, et leur

prévision. C'est bien connu en météorologie ou en finance par exemple.

I-f-d-m.fr : Mais alors, qu'en est-il en astronomie ?

G.A. : Dans le cas de la mécanique céleste, donc pour établir les éphémérides des astres et pour calculer les positions des satellites, l'astronomie arrive à faire des prodiges de précision, avec plusieurs zéros derrière la virgule. C'est dû à la fois à la qualité des mesures sur la position des objets eux-mêmes (ces objets ont le mérite d'être quasi indéformables, donc leurs masses, tailles, et positions sont bien définies), et à la maîtrise des équations de physique qui régissent les mouvements des astres les uns par rapport aux autres (c'est la théorie de la gravitation de Newton, révisée par la relativité générale d'Einstein).

Le cas de la structure interne du Soleil est aussi un cas de précision impressionnant, surtout lorsqu'on se rappelle que l'on ne peut pas aller regarder à l'intérieur de notre étoile. Le modèle standard, unidimensionnel dans la direction radiale du Soleil, est précis à environ 1% par rapport aux mesures radiales faites par héliosismologie. C'est très bien. Mais ce domaine a néanmoins besoin de s'améliorer. Par exemple, on comprend nettement moins bien la structuration du soleil dans les autres directions que la radiale.

Dans le cas de la physique de l'intérieur des trous noirs, comme des premiers instants du big bang, c'est un autre extrême. D'abord, on ne peut pas directement voir ni les trous noirs, ni le big bang. On ne peut pas non plus les reproduire en laboratoire. Ensuite, on n'est même pas sûr de connaître la physique qui régit la matière, l'énergie, l'espace et le temps dans ces conditions physiques exotiques. Ce sont donc deux domaines typiques où les (astro)physiciens sont bien loin d'établir des connaissances fermes et définitives.

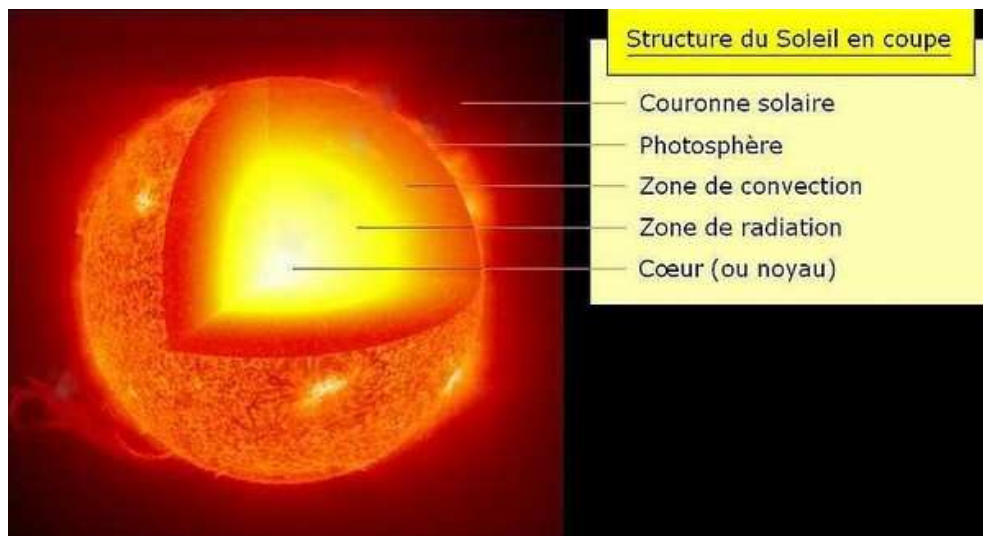


Figure 3 - Représentation schématique du Soleil en coupe (Source : Wikipédia)

I-f-d-m.fr : Et pour les cycles solaires ?

G.A. : Le cas des cycles solaires est entre les deux extrêmes. Les astronomes n'en sont pas au % de précision. Mais ils n'en sont pas non plus à se poser des questions sur la puissance de dix qu'il faut considérer pour rendre compte de ces cycles. Les connaissances sur les éruptions solaires sont, elles, moins précises que celles sur le cycle solaire. Mais elles le sont assez pour répondre qu'il est invraisemblable qu'elles puissent causer ce qui fait le titre de ce blog.

Voyons à présent ces cycles solaires avec un peu de détails.

Les taches solaires sont observées depuis plusieurs siècles, disons 400 ans pour arrondir. C'est ce suivi qui a permis de mettre en évidence une période plus ou moins régulière de 11 ans pour l'apparition et la disparition des taches. On appelle cycle solaire la période qui va d'un minimum du nombre de taches à la surface du Soleil, au suivant. Chaque cycle d'activité présente un pic qui dure environ un an, au cours duquel le nombre des taches à la surface solaire est à son maximum.

On a particulièrement bien observé les taches solaires pendant 23 cycles de 11 ans. C'est à la fois beaucoup, et peu.

C'est peu, car la théorie statistique nous dit que toutes les mesures et tous les calculs que l'on peut faire sur les cycles solaires, à partir des 23 cycles clairement observés, ne seront précis qu'à 5 cycles près environ, autrement dit à 20% près. Pas plus. 23 cycles, c'est peu aussi car ça ne fait que deux siècles et demi. On voit donc tout de suite que parler d'un cycle d'activité à long terme, disons de 90 ans, devient assez délicat puisqu'il n'aurait eu lieu que environ 3 fois au cours de la période d'observation. Parler d'un cycle de 180 ans est encore plus difficile, puisqu'on ne peut pas l'avoir vu se répéter une seule fois en entier.

23 cycles, c'est aussi beaucoup. En effet, ça fait des centaines de milliers de taches observées. Cela permet d'avoir un ensemble statistique des plus complets pour l'étude des taches elles-mêmes, notamment leur taille, leur durée de vie, leur emplacement sur le Soleil, et leurs couplages les unes aux autres.

Peut-être est-il possible regarder plus loin dans le passé que 23 cycles de 11 ans. Mais de façon indirecte seulement. Il semble

que ce soit faisable du fait qu'il que les cycles solaires laissent apparemment des tracent naturelles sur Terre.

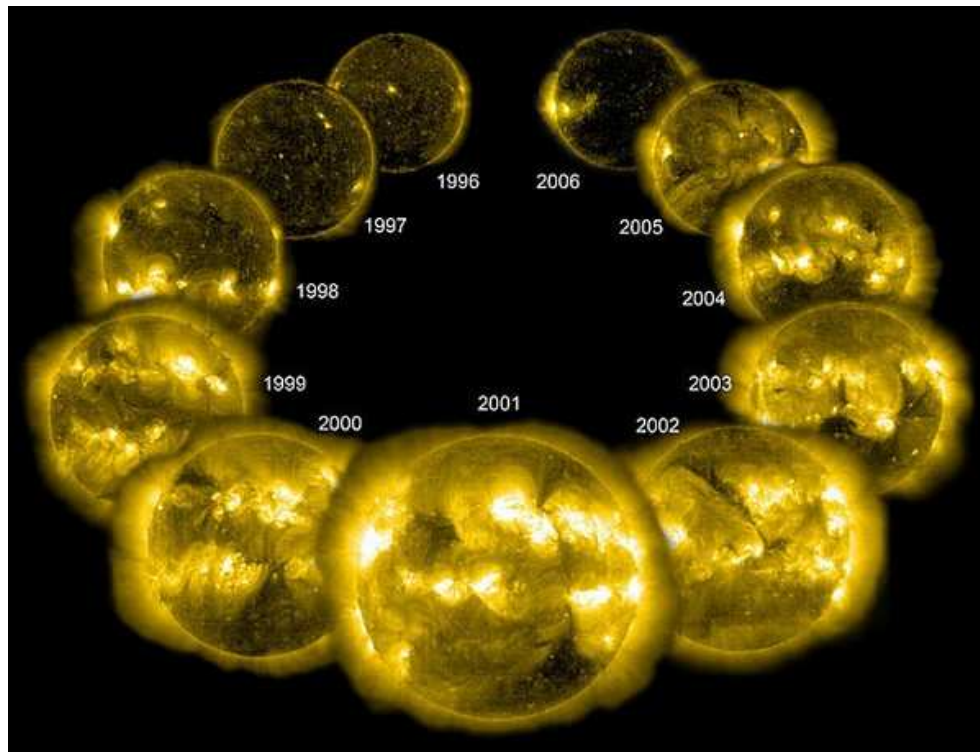


Figure 4 Le cycle solaire n°23, entre 1996 et 2006, vu dans l'ultraviolet par la sonde SoHO (NASA) (Source : Wikipédia)

Par exemple dans les cernes des arbres, et dans les glaces polaires. Lorsque l'on peut les exploiter, ces traces permettent de remonter sur plusieurs milliers d'années dans le passé. Cela permet a priori d'augmenter la statistique de façon très significative. Mais a posteriori, on réalise que la précision de la mesure avec ces traces est nettement moins bonne que ce que

l'on obtient en observant le Soleil directement. De plus, on ne comprend pas bien le processus de formation de ces traces terrestres. On peut donc dire qu'il n'est pas impossible, mais qu'il est très difficile, d'étudier l'activité solaire avant le XVII^e siècle.

Les cycles solaires peuvent aussi être étudiés théoriquement, avec de la physique fondamentale.

Le Soleil est une sphère de gaz turbulent, autogravitant, en rotation, magnétisé et conducteur de l'électricité. Ça fait beaucoup d'effets physiques réunis en un seul objet. Un avantage est que, contrairement aux trous noirs, tous ces effets physiques sont individuellement bien connus. Mais la vraie difficulté est de comprendre leurs couplages les uns avec les autres. Réussir à les calculer d'un seul bloc, en utilisant les valeurs solaires, est encore aujourd'hui un défi.

On peut donc faire ce que l'on appelle des modèles simplifiés du Soleil, et de ses cycles. Mais ces modèles ne sont pas une représentation parfaite de la réalité. Ils n'en demeurent pas moins très utiles, et les plus réalistes d'entre eux sont tout à fait conformes aux observations.

I-f-d-m.fr : Alors où en est-on au sujet de la fréquence et de la variabilité des cycles solaires ?

G.A. : Ce que l'on sait à présent, c'est que : le Soleil a une activité cyclique qui a une période de 11 ans pour ses taches ; cette période n'est pas réglée comme un métronome, elle varie parfois entre 9 et 14 ans ; cette durée correspond, en fait, à une demi-période d'un cycle magnétique de 22 ans, au milieu duquel les polarités magnétiques des pôles du Soleil s'inversent ; le cycle solaire est donc de nature magnétique ; les taches solaires sont le siège des champs magnétiques les plus intenses du Soleil ; les éruptions solaires étant de nature magnétique,

c'est donc au sein et à la périphérie des taches qu'elles se produisent ; le taux de déclenchement des éruptions solaires est donc corrélé au cycle des taches solaires ; le nombre moyen de taches solaires par cycle varie en gros de plus ou moins 50% par rapport à une moyenne, mais la variation d'un cycle à son suivant n'a (presque) jamais été plus brutale qu'une variation d'environ 25% ; la seule anomalie connue a eu lieu sous Louis XIV, au cours d'une période de 70 ans appelée le minimum de Maunder, pendant laquelle le Soleil a produit très peu de taches ; le cycle le plus intense en nombre de taches a été le cycle 19 au milieu de XX^e siècle, et le cycle 10 qui a vu l'éruption de Carrington de 1859 était un cycle tout à fait moyen, moins intense que tous les cycles qui ont lieu au cours des derniers 70 ans.

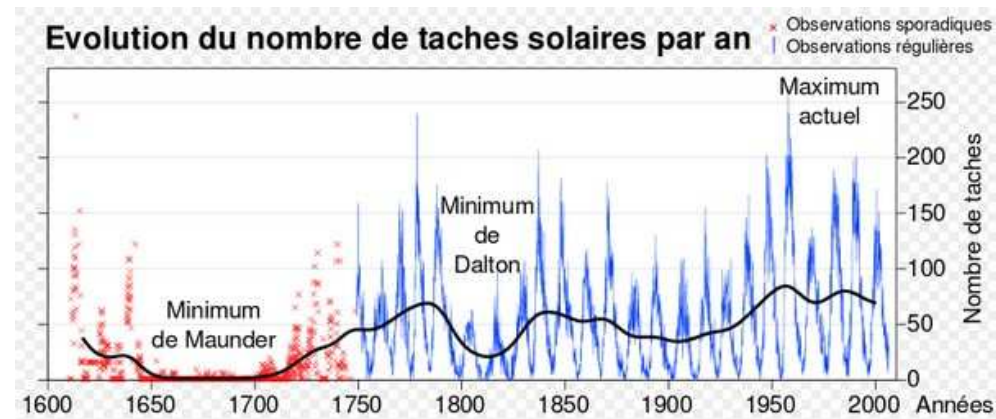


Figure 5 Le minimum de Maunder correspond à un déficit marqué du nombre de taches solaires entre 1645 et 1715. Un siècle après le minimum de Maunder eut lieu le minimum de Dalton, moins profond. Indépendamment de ces périodes de minimum apparaît très clairement une modulation

Voici quelques exemples de choses que l'on croit savoir : il y a peut-être une modulation du cycle de 11 ans sur une période de 90 ans, mais cette modulation n'a pas été observée sur assez de temps pour établir qu'elle est effectivement liée à un effet périodique qui se répète ; les modulations entre un cycle de 11 ans et son suivant, aussi bien en durée qu'en amplitude, doivent être dues au caractère irrégulier et turbulent du transport et de la déformation des gaz magnétisés à l'intérieur du Soleil ; a contrario, la stabilité de l'activité cyclique du Soleil est vraisemblablement liée à la stabilité de la rotation de l'étoile sur elle-même, de sa structure interne, et à l'absence de perturbations extérieures ; il n'existe aucune observation ni aucune théorie sérieuse à ce jour pour affirmer l'existence d'autres cycles ; il semble que les deux hémisphères solaires soient déphasés de quelques mois au cours d'un même cycle ; il semble que, depuis qu'il a achevé sa formation, le Soleil n'a jamais produit de taches solaires notablement plus intenses ou plus nombreuses que ce qui a été directement observé au cours des 400 dernières années ; la variabilité dans la surface et la durée de vie des taches solaires est liée à la taille des poches de gaz magnétisées qui émergent des profondeurs du Soleil vers la surface, mais on connaît mal les mécanismes physiques qui régissent leur détermination.

Ce sont toutes ces incertitudes et imprécisions qui ont fait que les astronomes n'ont pas prévu le minimum prolongé qui a eu lieu autour de 2008, entre le cycle 23, et le cycle 24. Ce sont aussi les mêmes limitations qui font que les spécialistes du cycle solaire ont aujourd'hui du mal à prévoir la date du pic d'activité du cycle 24 à mieux que plus ou moins un an.

I-f-d-m.fr : Jusqu'à présent, vous nous avez parlé que du cycle des taches solaires. Les éruptions solaires sont liées aux taches, qui sont elles-mêmes liées au magnétisme solaire, mais qu'en

est-il de la fréquence d'apparition, et de l'énergie de ces éruptions ?

On est sûr que c'est l'énergie contenue dans les champs magnétiques qui alimente les éruptions solaires. On le sait après plus de 100 ans d'observation et de recherches sur ces phénomènes.

Avec des outils approximatifs, on sait estimer à un facteur 10 près (une incertitude malheureusement classique en astronomie) quelle est l'énergie maximale qui peut servir à alimenter une éruption, lorsque l'on a pu mesurer le champ magnétique des taches solaires et de leur environnement proche.

Lorsque l'on ne dispose pas de mesures du champ magnétique régulières (ce qui est le cas pour les observations datant d'avant la seconde moitié de XX^e siècle), on peut tout de même estimer les champs magnétiques au sein des taches. Pour ce, on mesure leur taille et leur forme, sur les dessins, les photographies et les enregistrements obtenus dans le passé. Les liens entre ces propriétés morphologiques des taches, et leur champ magnétique, ont pu être établis avec des observations de centaines de taches, depuis plusieurs dizaines d'années. Mais ces liens sont assez peu précis. Ils ne permettent alors d'évaluer l'énergie maximale d'une éruption solaire qu'à un à un facteur, disons 10 à 100 près.

Il y a d'autres façons répandues d'estimer l'énergie des éruptions solaires, une fois qu'elles ont déjà eu lieu. Sans entrer dans leur longue description, disons qu'elles sont tout aussi incertaines. Et qu'elles sont d'autant plus incertaines que l'on analyse des éruptions anciennes, pour lesquelles le nombre et la précision des mesures n'était pas ce qu'elle est aujourd'hui.

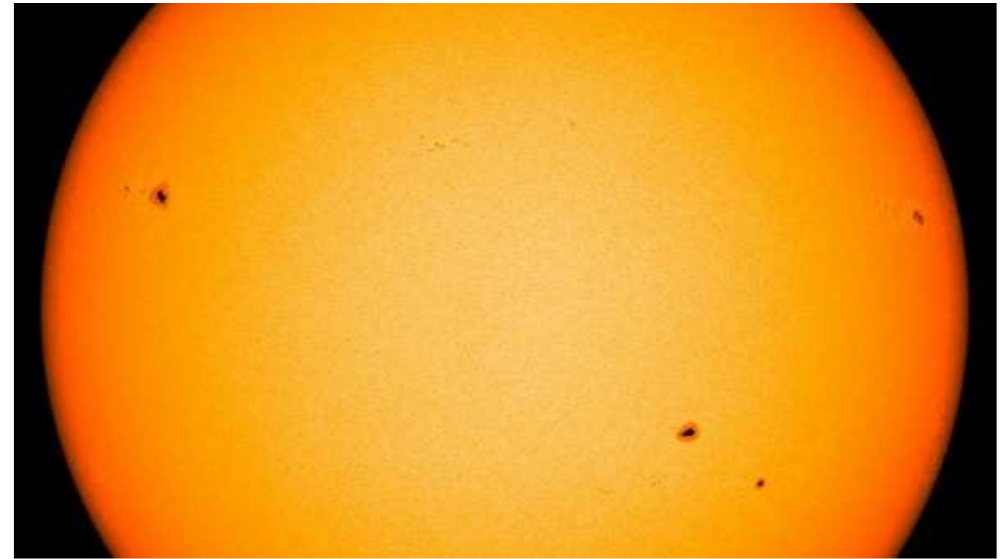


Figure 6 - La photosphère et des taches solaires observées par l'Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) à bord du Solar Dynamics Observatory (SDO). (Ces images, montrant les observations des dernières 48 heures, sont visibles sur les home pages du SDO et de Guillaume Aulanier.

La fréquence d'occurrence des éruptions est un sujet un peu plus compliqué.

En gros, la face visible du Soleil produit au plus jusqu'à 5 (à 10 si l'on compte la face du Soleil opposée à la Terre) éruptions par jour, en période de pic d'activité. Mais lorsque l'on fait une statistique sur plus d'un jour (disons un an, un cycle, ou plus encore), on réalise qu'il y a d'autant plus d'éruptions que leur énergie est faible, et d'autant moins que leur énergie est forte.

La fonction qui relie la fréquence d'apparition en fonction de l'énergie est une loi de puissance. Cette loi est une moyenne, qui tient compte de toutes les incertitudes sur l'estimation des énergies des éruptions. On peut tout de même l'utiliser pour prédire la période moyenne de déclenchement des éruptions d'une énergie donnée, ce qui fonctionne assez bien.

C'est l'extrapolation de cette loi à des valeurs en énergie correspondant à des éruptions jamais encore observées (ou du moins, jamais encore estimées à ces valeurs là) qui peut conduire, avec un risque certain, à prédire la fréquence d'apparition d'une super-éruption hypothétique capable de balayer notre bonne vieille Terre. On trouve alors des périodes plus ou moins longues, selon l'énergie de l'éruption hypothétique que l'on considère.

Mais est-il bien raisonnable d'extrapoler une loi, trouvée pour une certaine gamme d'énergies observées, jusqu'à de grandes énergies elles-mêmes jamais encore observées (ou disons plutôt, estimées) ?

Afin de répondre à cette question, on peut réfléchir par exemple au fait que les astronomes commencent à savoir que ladite loi n'est plus valable aux énergies les plus faibles. On peut aussi se demander si le Soleil sait mettre en œuvre des mécanismes qui pourraient produire de telles super-éruptions. Or à ce jour, aucun n'est connu par les scientifiques. J'y reviens plus bas.

Il reste donc beaucoup de travail à faire pour comprendre, et à terme prédire, les éruptions solaires, et leurs effets.

Développer une telle prévision est important, car les éruptions solaires ont un effet réel sur l'environnement terrestre, voire sur la Terre elle-même. Toutes les grandes éruptions ont eu des

répercussions. Surtout sur des satellites dans l'espace, mais parfois aussi sur Terre, en termes de coupures locales de courant pendant quelques heures. Tout ceci peut être très ennuyeux, et très coûteux.

Des recherches appliquées se font actuellement pour faire ce type de prévision, à partir de ce que la recherche fondamentale a déjà découvert. Ça s'appelle la météorologie de l'espace. C'est une science relativement jeune, et balbutiante, car elle n'a que quelques décennies d'âge. Elle s'appuie tout de même sur des connaissances physiques et des observations du Soleil plus anciennes.

Mais avec un facteur 10 à 100 d'incertitude sur l'estimation de l'énergie des éruptions avant leur déclenchement, tout le monde conviendra que toute prévision sur les éruptions solaires reste, pour le moins, perfectible. De plus, on ne comprend toujours pas parfaitement la façon dont les processus physiques qui régissent les éruptions s'agencent les uns avec les autres. On ne peut donc toujours pas prédire les sites et heures exacts de déclenchement des éruptions sur le Soleil.

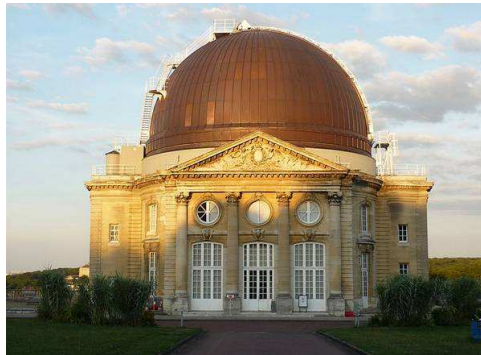
Comprendre les propriétés détaillées des éruptions avec des modèles physiques quantifiés, en vue du développement d'une météorologie de l'espace fiable, relève donc encore à ce jour de la recherche fondamentale.

Actuellement, les astronomes solaires du monde entier commencent tout juste à pouvoir modéliser -a posteriori- des éruptions observées au Soleil, et ce en incorporant dans leurs modèles des données d'observation, par exemple, des mesures à la surface solaire du vecteur champ magnétique autour du site où une éruption a eu lieu. C'est un effort pour lequel l'Observatoire de Paris fait partie des leaders mondiaux. Cette approche permet de mieux évaluer l'énergie des éruptions, à un

facteur 2 ou 3 près. Elle permet aussi de mieux identifier les processus physiques qui sont à l'origine des différents phénomènes qui ont lieu pendant une éruption. Mais, en dépit de progrès substantiels au cours des dernières années, ce type d'étude reste encore peu répandu, il n'a jamais réalisé de prévision, et il est loin d'être automatisable.

Figure 7 - Grande Coupole de Meudon de l'Observatoire de Paris (Source : Wikipédia)

En résumé, l'état des connaissances sur la prévision des éruptions sur le Soleil est un peu comparable à celui pour la prévision des tornades sur Terre. On en comprend les mécanismes. On a beaucoup d'observations. Mais pas assez pour prédire leur apparition et leur amplitude de façon aussi fiable que, disons, le temps qu'il fera demain.



Ceci ayant été dit, les observations passées comme les théories actuelles permettent tout de même d'émettre ce qu'on pourrait qualifier de forts doutes, quant à l'existence d'éruptions solaires suffisamment importantes pour faire tomber en panne tous (ou presque tous) les équipements électriques installés par notre espèce dans le monde, avec les conséquences que l'on peut imaginer, ou lire sur internet.

Avec les outils dont les astronomes disposent pour étudier les éruptions, on peut déduire que : en un peu moins de 160 ans d'observation des éruptions, le Soleil n'a jamais produit une seule

super-éruption avec une énergie suffisante pouvant causer de tels dégâts ; et en 400 ans, on n'a jamais observé de groupe de taches solaires assez grand pour produire, pense-t-on, une telle super-éruption.

Mais, indépendamment de la précision de ces estimations, on peut facilement répondre que 160 ans c'est très court, et que 400 ans ce n'est pas beaucoup plus long. C'est vrai.

Pourtant, 160 d'observations avec, disons pour être prudent, une petite moyenne de 2 éruptions par jour, ça fait quand même un ensemble observé de 100 000 (cent mille) éruptions, au bas mot. Mais on peut objecter que, du fait de la loi de puissance décrite ci-dessus, les grandes éruptions sont rares, et donc qu'elles ne représentent qu'un petit sous-ensemble des 100 000 éruptions observées. C'est vrai.

Le dernier argument qui vient alors contre l'existence de super-éruptions solaires est de nature théorique.

A ce jour, les astronomes ne connaissent pas une façon réaliste d'agencer, théoriquement, tous les processus physiques qui conduisent habituellement aux éruptions, d'une manière qui pourrait produire un tel événement. Ce n'est pas qu'il n'y a pas assez d'énergie dans le Soleil. Il y en a bien assez. C'est qu'on ne sait pas comment une part suffisante de cette énergie pourrait se concentrer en une seule super-éruption.

Pour que ça arrive, il faudrait que toute (ou du moins une très grande part de) l'énergie magnétique du Soleil converge en un seul super-groupe de super-taches. Cette convergence devrait se faire en suivant des déplacements de matière solaire qui iraient à l'encontre de la rotation et de la circulation méridienne de l'étoile, et aussi de ses mouvements de convection internes.

Pourtant, tous ces mouvements sont très réguliers. Ils sont dus, d'une part à l'inertie de la rotation de l'étoile, et d'autre part aux réactions nucléaires qui chauffent son cœur. Il faudrait apporter une énergie considérable pour les contrecarrer. De plus, ce sont certains de ces mouvements qui sont eux-mêmes à la source des champs magnétiques solaires.

Par analogie avec la Terre, c'est comme si on imaginait que presque tous les vents du globe pourraient converger en une seule super-tornade, ou bien que presque tous les points chauds du magma convergeraient en un seul super-volcan. L'un ou l'autre pourraient balayer tout un continent, voire plus. Mais peuvent-ils exister ? Les géophysiciens ne savent tout simplement pas comment la Terre saurait produire de telles catastrophes. C'est la même chose pour les astronomes et le Soleil.

Ce sont tous ces arguments qui me conduisent à penser aujourd'hui que la fréquence d'occurrence d'une super-éruption solaire qui pourrait provoquer un cataclysme à l'échelle planétaire est nulle.

Dossier : Tempêtes solaire 2/4

Suite de notre dossier sur les « tempêtes solaires » et des réponses de l'astrophysicien Guillaume Aulanier.



La-fin-du-monde.fr : Maintenant que nous comprenons mieux la question des cycles de l'activité solaire, pouvez-vous nous expliquer les répercussions sur Terre d'une éruption solaire ?

Guillaume Aulanier : En général, les spécialistes des recherches fondamentales en relations Soleil-Terre, comme des recherches appliquées en météorologie de l'espace, s'attachent à étudier les répercussions des éruptions au niveau du sol de la Terre, mais

aussi et surtout au niveau des hautes couches de l'atmosphère et de l'environnement spatial de la planète. Pourquoi surtout si haut au-dessus du sol ? Tout simplement car les perturbations des éruptions sont d'autant plus fréquentes et importantes qu'elles apparaissent aux plus hautes altitudes.



Les éruptions solaires envoient trois types de choses dans l'espace, depuis le Soleil, parfois vers la Terre :

- des rayonnements lumineux ;
- des particules énergétiques ; et
- des nuages de gaz magnétisés appelés éjections de masse coronales (CME).

Prenons-les dans l'ordre. D'abord, la lumière. Les émissions lumineuses sont isotropes. La Terre reçoit donc la lumière des éruptions où qu'elles aient lieu sur la moitié du Soleil qui lui fait face. Toutes les éruptions émettent dans presque toute la gamme du spectre électromagnétique. Quelle que soit leur énergie, ces rayons lumineux mettent 8 minutes à arriver au niveau de la Terre. Cela veut dire que lorsqu'on commence à observer une éruption, elle a déjà commencé 8 minutes avant. Plusieurs éruptions produisent des émissions lumineuses dans la gamme radio du spectre électromagnétique. Lorsque le Soleil est bas sur l'horizon, ces ondes radios solaires peuvent être responsables de parasites importants dans les communications radio au sol entre deux stations alignées avec le Soleil. Ces émissions ont d'ailleurs été découvertes pendant la Seconde Guerre mondiale, elles créaient de fausses détections

d'attaques aériennes sur la Grande-Bretagne et elles perturbaient les communications des navires dans le Pacifique.

Les embrillancements les plus importants des éruptions, qui sont aussi ceux qui ont les effets terrestres les plus notables, se situent dans les bandes extrêmes ultraviolettes (EUV), X mous (SXR) et X durs (HXR) du spectre électromagnétique. Les [éruptions sont classées](#) en fonction de leur luminosité SXR. Les éruptions les moins intenses sont de classe A, puis viennent les B, les M et les X qui sont les plus énergétiques. Chaque classe correspond à des flux lumineux SXR dix fois plus intenses que la classe précédente. La classe X est, elle, une échelle ouverte.

A haute dose, les rayonnements EUV, et surtout SXR et HXR, sont très dangereux pour la santé des êtres vivants. Fort heureusement, leur absorption par les gaz de l'atmosphère terrestre, sur toute son épaisseur, fait qu'ils ne parviennent pas jusqu'au sol.

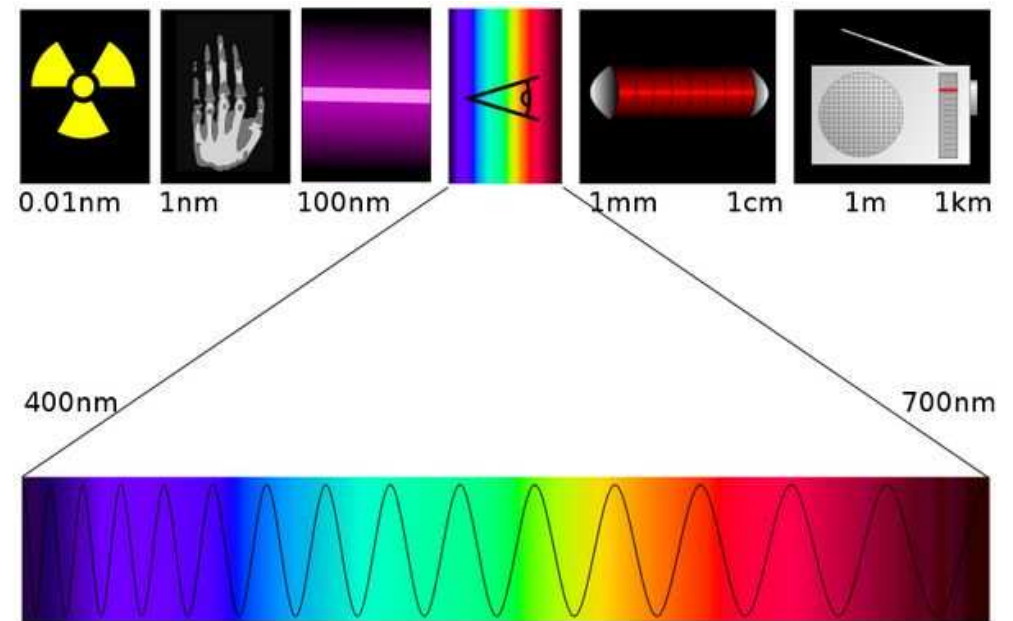


Figure 8- Le spectre électromagnétique (Source : Wikipédia)

C'est la raison pour laquelle les astronomes doivent envoyer des équipements coûteux dans l'espace, pour observer ces émissions du Soleil. Les EUV et rayons X se propageant dans l'espace, ils peuvent poser un sérieux problème pour les astronautes, notamment pour les éruptions de classes M et X.

Indépendamment des êtres vivants, ces rayonnements ont des effets directs sur les hautes couches diluées de l'atmosphère terrestre. Les rayons EUV, en particulier, ont un impact sur la chimie de la mésosphère et de la thermosphère, à plus de 50km du sol. Ces mêmes EUV ainsi que les SXR ont aussi pour effet de chauffer radiativement la thermosphère au-delà de 100 km d'altitude, qui gonfle en réponse au chauffage. Cela contribue à augmenter de façon temporaire l'épaisseur de l'atmosphère.

Ça n'a, pense-t-on, aucun effet au niveau du sol, ni au niveau de l'altitude de croisière des avions (environ 10km), mais ça contribue à freiner les satellites et les stations spatiales que les hommes ont placés en orbite. Il est déjà arrivé que cet effet, cumulé suite à plusieurs éruptions consécutives, conduise à terme à perdre des satellites n'ayant pas de système de surveillance ni de correction orbitale suffisamment efficace.

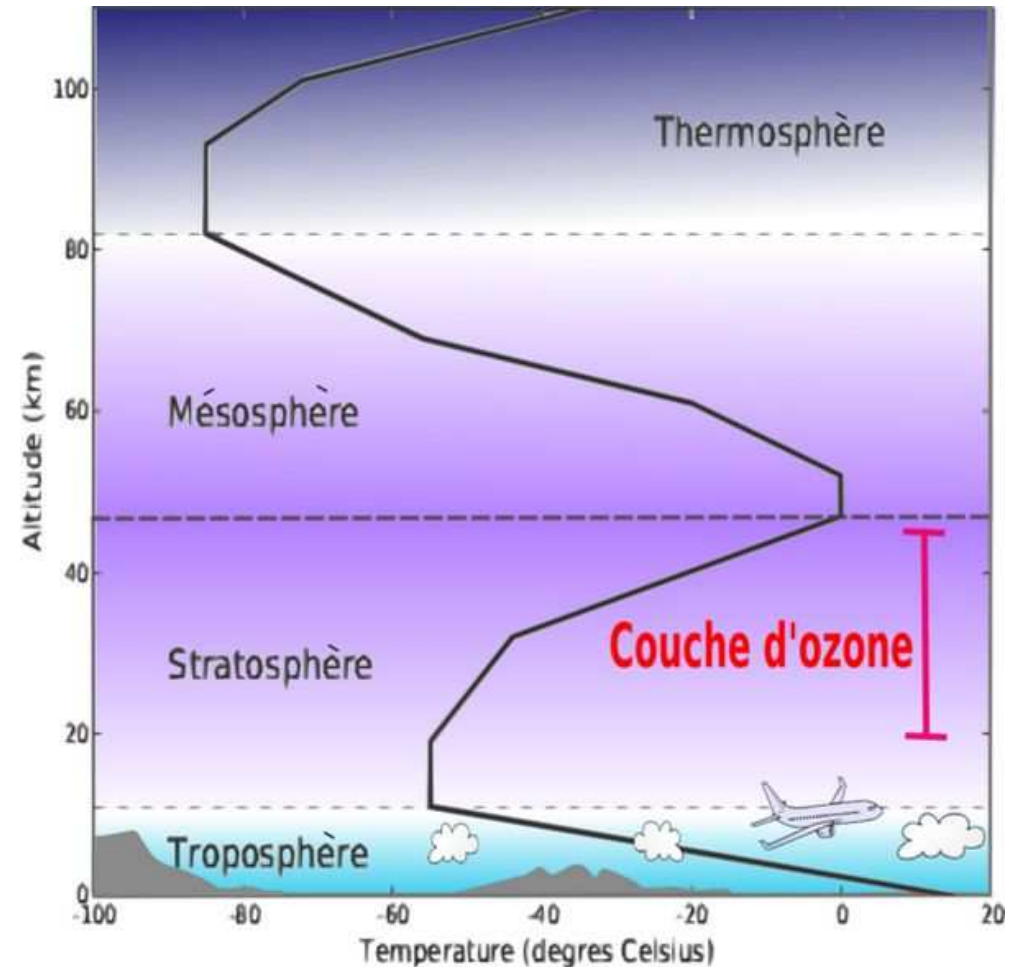


Figure 9 - L'atmosphère terrestre (Source : Wikipédia)

Les émissions SXR liées aux éruptions solaires les plus fortes créent aussi des courants électriques dans l'[ionosphère](#) terrestre. Cela est dû à l'ionisation accrue du gaz due au rayonnement X. Ces courants ionosphériques induisent à leur tour une variation

transitoire du champ magnétique terrestre. On appelle cela un crochet magnétique. Les champs induits au niveau du sol terrestre peuvent atteindre plusieurs dizaines de nT (nanoTesla), à comparer au champ géomagnétique moyen qui est de l'ordre de 30,000 (trente mille) nT. Cet effet, qui ne dure que quelques heures, n'est typiquement pas assez long pour induire des courants électriques importants au niveau du sol terrestre. En revanche, l'ionisation accrue de l'ionosphère peut perturber les communications radio, soit à longue distance au sol, soit entre le sol et les satellites. On parle de scintillation ionosphérique. Plusieurs systèmes de communication au sol, et plusieurs opérations satellitaires, ont déjà été ainsi perturbés à cause de ces scintillations.

Pour toutes ces raisons, les variations du flux solaire en EUV et en rayons X, les plus intenses étant dues aux éruptions de classe X, sont très surveillées.

Passons aux particules énergétiques.

Les éruptions solaires, notamment de classes M et X, accélèrent et émettent des particules élémentaires, surtout des électrons, mais aussi des protons et des neutrons. Les énergies atteintes peuvent être supérieures à 10 MégaélectronVolt (MeV), voire plusieurs centaines de MeV pour des éruptions de classe X.

Les particules voyageant moins vite que la lumière, elles arrivent au niveau de la Terre typiquement entre 3 et 30 minutes après la lumière, selon leur énergie. On a donc peu de temps pour se préparer à l'arrivée de ces particules, après avoir constaté le déclenchement d'une éruption au Soleil, mais ce n'est pas impossible.

Hormis les neutrons qui se propagent librement, les protons et les électrons sont chargés électriquement. Leur émission n'est pas isotrope, ni lors de leur accélération, ni au cours de leur propagation. La raison est que la couronne solaire et le milieu interplanétaire sont structurés par des champs magnétiques. Et

ces derniers imposent des trajectoires spécifiques aux particules chargées. C'est comme le CERN ou le LHC, dont le champ magnétique impose des mouvements courbes ou circulaires aux particules qu'ils accélèrent. Dans la situation habituelle, la structure du champ magnétique interplanétaire, emporté par le vent solaire, forme une spirale d'Archimède. Cette spirale impose que seules les particules accélérées entre 40 et 70 degrés de longitude solaire Ouest (à droite -pas à gauche- du méridien central) peuvent atteindre la Terre, selon la vitesse locale du vent solaire. Malheureusement, ce critère est peu satisfait pour beaucoup d'éruptions, ce qui le rend peu utilisable pour la prévision. Plusieurs idées liées à la présence de CME ont été proposées pour comprendre pourquoi ce critère n'est pas toujours satisfait, j'y reviens plus bas.



Figure 10 - Le champ magnétique interplanétaire (Source : wattsupwiththat.com)

En tout cas, cela veut dire qu'il n'est pas toujours facile de prédire si une éruption solaire émettra ou non ses particules énergétiques vers la Terre. Quand ça arrive, la plupart des particules solaires sont tout de même arrêtées avant d'atteindre le sol. Elles n'y posent donc pas de risque. Si d'une part le blocage des rayonnements lumineux EUV et X est dû à l'atmosphère terrestre, les particules chargées d'autre part n'arrivent presque jamais au sol car elles ont du mal à pénétrer la [magnétosphère terrestre](#), dont la frontière côté solaire est située plusieurs rayons terrestres de la planète. La raison est que les particules sont fortement confinées aux champs

magnétiques interplanétaires, qui ne viennent presque jamais se connecter à la Terre.

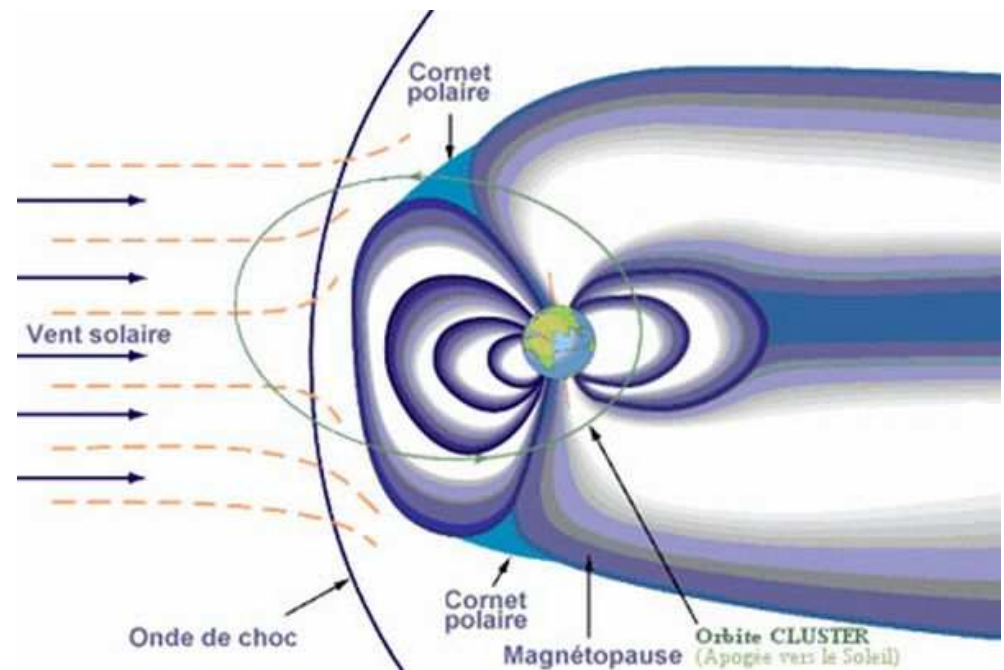


Figure 11 - La magnétosphère terrestre (Source : CNES.fr)

Cependant, les particules les plus énergétiques sont plus faiblement confinées par le champ magnétique. Certaines d'entre elles pénètrent donc dans la magnétosphère, et elles atteignent finalement l'atmosphère. Le champ magnétique terrestre tend à les guider préférentiellement vers les hautes latitudes. Ces particules n'atteignent cependant jamais le sol : elles sont désintégrées par des collisions avec les atomes atmosphériques. Les éruptions à proton, typiquement de classe X, produisent alors des gerbes atmosphériques. Les dernières particules produites par ces gerbes finissent par atteindre le sol

aux hautes latitudes. On appelle cela un **Ground Level Enhancement** (GLE). C'est le même processus qui se produit lorsque les rayons cosmiques, autrement plus énergétiques, mais heureusement beaucoup moins nombreux que les particules solaires, atteignent la Terre. Ces rayons cosmiques sont, d'ailleurs, modulés par le cycle solaire : la Terre en reçoit d'autant moins que l'on est proche du pic d'activité, car ils sont défléchis par les champs magnétiques interplanétaires.

L'arrivée des rayons cosmiques et l'occurrence des GLE fait l'objet d'une surveillance permanente : en période de forts flux de particules, les compagnies d'aviation dévient leurs vols transpolaires, afin de limiter les doses d'irradiations que les personnels naviguant pourraient recevoir de façon cumulative ; ceci ne pose pas de problème pour les passagers qui, eux, ne passent que peu de temps à 10km d'altitude au-dessus des régions polaires chaque année. L'Observatoire de Paris contribue à cette surveillance, en tant que responsable scientifique de plusieurs détecteurs de particules installés sur Terre, aux hautes latitudes.

Au niveau de l'espace, les particules solaires, notamment les protons, sont spécialement néfastes pour l'électronique de bord des satellites, et naturellement pour les astronautes. Pour les satellites, les particules issues d'éruptions de classe X (voire M) peuvent engendrer des surtensions temporelles. Certaines se convertissent en commandes erratiques. L'impact des particules peut aussi endommager de manière irréversible des composants embarqués. Certains satellites ont été totalement perdus de ce fait.

Pour les astronautes en orbite terrestre, la protection naturelle offerte par la magnétosphère combinée à l'existence de caissons isolants dans les véhicules spatiaux, permet une protection relativement efficace. Par contre, les vols en dehors de la magnétosphère, par exemple vers la Lune et peut-être un jour vers Mars, ou au-delà, posent de sérieux problèmes. On sait

à présent que les astronautes peuvent être exposés à des flux létaux de particules chargées issues des éruptions M et surtout X, au cours de ce type de voyage. On ne le savait pas lors des missions Apollo. Rétrospectivement, les astronautes de ce programme ont eu beaucoup de chance. Cette question devient un enjeu primordial pour l'exploration spatiale lointaine.

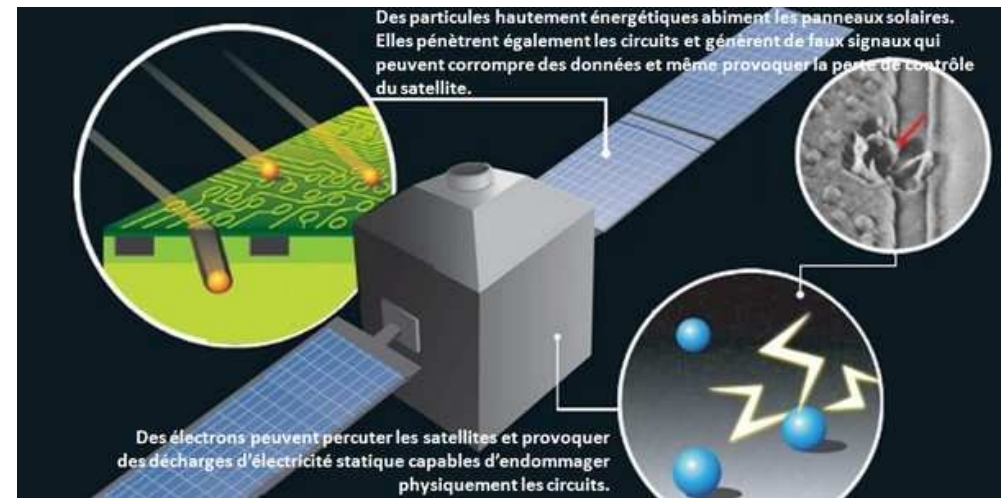


Figure 12 - Source : scientificamerican.com

Les particules solaires accélérées par les éruptions sont donc particulièrement gênantes, pas au niveau du sol, mais un peu au niveau des vols transpolaires, et surtout pour les satellites et les hommes envoyés dans l'espace. A ce titre, elles constituent -de loin- les effets les plus importants des éruptions au niveau de la Terre, et font donc l'objet d'études poussées en météorologie de l'espace.

Regardons à présent les nuages de gaz éjectés, que l'on appelle des éjections de masse coronale (CME).

De nombreuses éruptions, mais pas toutes, envoient dans l'espace une CME. Les CME contiennent entre un et dix milliards de tonnes de gaz solaire, et elles quittent le Soleil à des vitesses entre 0.3 et 10 millions de km/h. Lorsqu'une CME est dirigée vers la Terre, elle l'atteint typiquement entre 1 et 4 jours. On a donc le temps de se prémunir de l'arrivée d'une CME.

Mais toutes les CME qui vont vers la Terre n'y produisent pas d'effet notable. Les conditions pour qu'une CME soit géoeffective sont connues, mais elles sont difficilement prévisibles au moment où elles quittent le Soleil. Cependant, certains satellites d'observation mesurent les conditions physiques internes aux CME à 1 million de km en amont de la Terre. Ils permettent donc de connaître à l'avance si une CME sera géoeffective ou non. Mais l'intervalle de temps entre le passage d'une CME au niveau de ces satellites, et leur arrivée à la Terre, n'est environ que de 20 minutes. On se retrouve donc avec le même délai d'alerte que pour les particules énergétiques, qui sont arrivées entre 1 et 3 jours avant.

La réduction du facteur 30 entre les CME les plus rapides et les plus lentes au niveau du Soleil, jusqu'à un facteur 4 seulement pour leur temps d'arrivée à la Terre, peut paraître surprenante. Il est dû au couplage aérodynamique des CME avec le vent solaire, au cours de leur trajet. Même en l'absence d'éruption solaire, l'espace n'est pas aussi vide qu'on peut le croire.

Les CME emportent avec elles une part des champs magnétiques solaires. On sait que ces champs magnétiques peuvent atteindre 0.2 T en surface, au cœur des taches. Mais lorsqu'une CME a parcouru une distance de 150 millions de km (la distance Soleil-Terre), son expansion dans toutes les directions conduit à diluer, et donc à diminuer son champ magnétique. Selon la CME, ce dernier atteint des valeurs pouvant aller de 5 à 50 nT, au niveau de la Terre.

Plus une éruption est intense, plus elle a des chances de produire une CME. Par contre, de nombreuses CME sont éjectées du Soleil au cours d'éruptions faiblement intenses, du point de vue

de la classification A,B,M,X basée sur les émissions en rayons X. Donc contrairement aux rayonnements lumineux et aux flux de particules, les CME dans leur ensemble ne sont pas bien corrélées aux éruptions de classe X. Par contre, les CME les plus rapides et les plus magnétisées sont, elles, plutôt bien corrélées à ces éruptions les plus énergétiques.

Les CME sont plus ou moins directement importantes pour les particules solaires et les GLE évoqués ci-dessus. D'une part, les CME produisent un choc d'étrave dans le milieu interplanétaire. Comme l'éruption solaire elle-même le fait, ce choc peut accélérer des particules énergétiques. Son importance est néanmoins débattue pour les particules aux énergies les plus hautes, donc pour les GLE. D'autre part, une CME constitue une forte perturbation du champ magnétique interplanétaire. Des particules solaires accélérées par une éruption ayant lieu plusieurs heures (ou plusieurs jours) après l'envol d'une CME précédente voient donc leurs trajectoires et leurs temps de parcours fortement modifiés. C'est un aspect de la prédiction des GLE qui commence tout juste à être compris, grâce à des recherches menées notamment à l'Observatoire de Paris. Il est très important pour la météorologie de l'espace, car en période du pic d'activité d'un cycle solaire donné, les éruptions X et les CME tendent à venir par série d'événements successifs. Cela a été le cas, par exemple, pour l'événement de Carrington de 1859 et pour les éruptions d'Halloween de 2003.

Revenons aux CME elles-mêmes, et à leurs effets au niveau de la Terre. Et notons au passage que tous les effets qui suivent peuvent aussi être produits, mais dans une moindre mesure, par des irrégularités du vent solaire.

Le premier effet d'une CME au niveau de la Terre est qu'elle comprime temporairement la magnétosphère et la thermosphère. Plus l'énergie cinétique (donc la masse, et la vitesse) de la CME est grande, plus la compression est forte. À

une altitude fixée, cela conduit à augmenter légèrement le champ géomagnétique, et la densité du plasma magnétosphérique. Au niveau du sol, cela se traduit par une augmentation du champ de 10 ou 20 nT seulement (toujours à comparer aux 30,000 nT du champ terrestre habituel). Les autres effets d'une CME dépendent beaucoup de l'orientation de son champ magnétique amont. C'est un paramètre clé qui ne peut pas encore être estimé au moment où les CME quittent le Soleil. Plus le champ magnétique de la CME tend à être antiparallèle au champ magnétique du côté jour de la magnétosphère, plus la CME va être géoeffective. Ensuite, les effets sont d'autant plus prononcés que l'amplitude du champ magnétique et de la vitesse de la CME sont fortes. L'impact d'une CME géoeffective avec la magnétosphère terrestre produit ce qu'on appelle un orage (ou une tempête, si l'on traduit le terme anglais) géomagnétique. Ces orages comprennent les effets suivants, avec plus ou moins d'amplitude selon la CME. Quelques particules solaires de la CME réussissent à pénétrer dans la magnétosphère. L'origine de ces fuites fait encore débat, mais il semble qu'il soit lié à des reconnexion du champ magnétique. Ces particules dérivent alors au travers du champ magnétique terrestre. Elles renforcent un courant électrique qui circule naturellement autour de la Terre, dans l'espace. Comme le passage de la CME autour de la Terre dure un jour ou plus, ce courant induit une baisse du champ magnétique terrestre sur cette même durée. Cette baisse qui peut aller à jusqu'à plusieurs centaines de nT. C'est ce que mesure un indice appelé Dst (**Disturbance storm time**). Les orages géomagnétiques les plus intenses observés à ce jour ont rarement excédé un Dst plus fort que -1000 nT. Cette valeur extrême représente quand même 3% du champ magnétique terrestre, ce qui n'est pas négligeable. Heureusement, le pic de l'indice Dst ne dure que quelques heures au cours d'un orage géomagnétique qui dure, lui, un ou plusieurs jours.

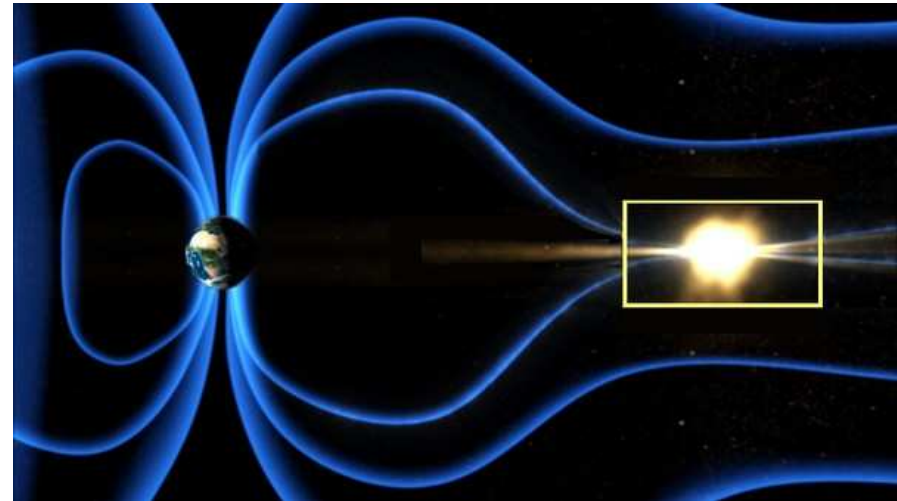


Figure 13 - Reconnexions du champ magnétique Source : sci.esa.int

Il convient aussi de noter que l'indice Dst, pris seul, n'est pas suffisant pour prédire le déclenchement et l'amplitude des autres effets que je décris ci-dessous ; ces derniers sont dus à d'autres processus physiques, plus locaux, alors que l'intensification du courant annulaire qui produit le Dst est un effet global. Le Dst teste donc un indice intéressant. Mais ce n'est qu'un indice.

La poussée régulière de la CME sur la magnétosphère, pendant un jour ou plus, provoque un étirement progressif de la traînée magnétique de la Terre, du côté nuit. Cette queue magnétique est déjà habituellement allongée, du fait de la pression dynamique du vent solaire. Pourtant, les CME l'étirent encore plus, créant un feuillet étroit de courants électriques. Mais à l'instar d'un chewing-gum que l'on étire entre deux doigts, le feuillet de courants électriques ne peut pas s'étendre à l'infini. Vient un moment où il rompt. Plusieurs théories s'attachent à expliquer cette rupture. Certaines sont basées sur des instabilités

dites de ballonnement, d'autres sur des phénomènes plasma de double-couches, d'autres encore sont basées sur la reconnexion magnétique.

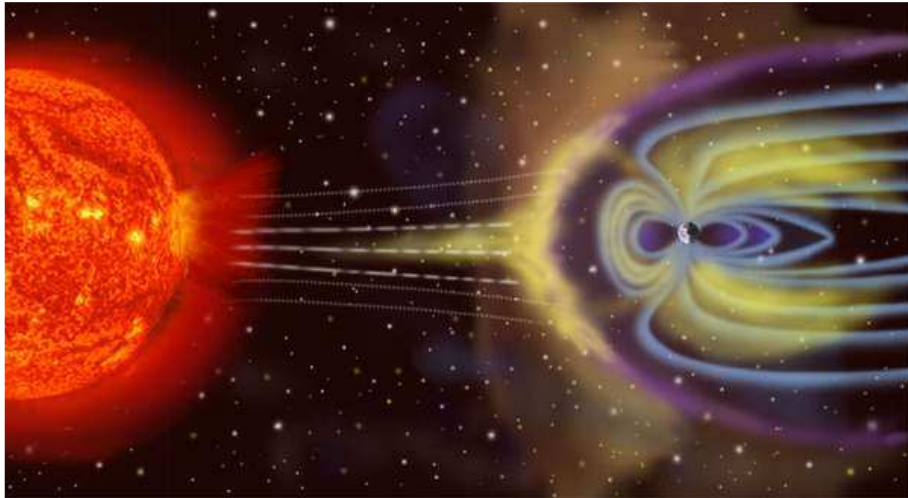


Figure 14 - Vue artistique de la magnétosphère déviant le vent solaire (l'échelle n'est pas respectée) (Source : Wikipédia)

Quoi qu'il en soit, lorsque le feuillet se déchire, il accélère un flux de particules issues de la magnétosphère elle-même, et non pas du Soleil, vers le côté nocturne de la surface terrestre. Les énergies de ces particules magnétosphériques, essentiellement des électrons, sont de l'ordre de quelques dizaines de keV (kilo électron Volt). C'est très faible par rapport aux particules solaires accélérées par les éruptions elles-mêmes. Mais c'est suffisant pour produire des courants électriques et des collisions intenses dans les hautes couches de l'atmosphère terrestre. Le mouvement de ces particules magnétosphériques étant, lui aussi, contraint par le champ magnétique terrestre, les particules précipitent essentiellement le long de deux arcs, situés autour des deux pôles terrestres. C'est au niveau de ces deux arcs que

se produisent les aurores polaires. Ce phénomène est appelé un sous-orage magnétique. Les sous-orages peuvent se répéter plusieurs fois au cours d'un même orage. C'est un peu comme la traînée d'un navire, qui se déchire et change plusieurs fois de forme, lorsqu'une grosse vague vient frapper le navire. Pour compliquer l'affaire, il y a aussi parfois des sous-orages en l'absence d'orages.

Lors de la diminution brutale des courants électriques dans le feuillet qui se déchire au cours d'un sous-orage, le champ magnétique varie brutalement à plusieurs rayons terrestres de distance de la planète, du côté nuit. Ses variations lointaines sont transportées vers l'ionosphère terrestre. Elles y perturbent alors le phénomène régulier de convection ionosphérique, essentiellement autour des arcs auroraux. Ces variations de champ magnétique induisent des champs électriques, qui peuvent alors créer des courants électriques transitoires aux hautes latitudes dans l'ionosphère. Notons qu'il existe plusieurs théories concurrentes pour expliquer la formation de tels courants ionosphériques. Dans tous les cas, ces courants induisent à leur tour des champs magnétiques au niveau de la surface terrestre, tout aussi variable. Les variations temporelles du champ géomagnétique créent un champ électrique de surface. C'est cette longue chaîne de processus qui conduit, pense-t-on, à induire finalement des courants électriques à la surface de la Terre, que l'on appelle des courants géomagnétiquement induits (**Geomagnetically Induced Currents**, ou **GIC**).



Les GIC touchent donc principalement les régions aux grandes latitudes magnétiques. Mais lorsqu'e la quantité de mouvement et/ ou le champ magnétique d'une CME géoeffective est particulièrement intense, les latitudes de formation des arcs auroraux, et donc des GIC, peuvent être plus faibles : on a déjà vu -rarement- des aurores au Sud de l'Europe et des USA.

Au niveau du sol, les GIC se concentrent dans les structures conductrices d'électricité les plus longues, notamment les câbles à haute tension et les pipelines. Du fait du chauffage

Le principe de fonctionnement du chauffage ohmique est basé sur l'effet Joule, à savoir qu'un corps ou une matière traversée par un courant produit une énergie égale à $E = RI^2$

Ohmique, notamment, les GIC peu intenses conduisent à des détériorations graduelles et maintenant surveillées de ces équipements. La fréquence des variations de champs magnétique à l'origine des GIC étant de l'ordre du Hz (Hertz), les courants électriques s'y comportent comme des courants directs (DC). C'est très néfaste pour les systèmes électriques, qui sont faits pour transporter du courant alternatif(AC). Des GIC intenses ont donc déjà produit des pannes massives de réseaux électriques. Le plus long (quelques heures) et le plus étendu (presque tout un pays) fut celui de [mars 1989, au Québec](#). D'autres pannes moins spectaculaires, liées à des GIC moins intenses, ont déjà eu lieu dans d'autres pays.



Figure 15 - Dommages irrémédiables provoqués à la centrale nucléaire de Salem (New Jersey) par un orage géomagnétique le 13 mars 1989 (Photo PSE&G Source : NASA)

En 1989, on n'imaginait pas que les orages solaires pouvaient causer des problèmes aussi importants que ceux qu'on a constatés. Aujourd'hui, les pays des deux hémisphères situés aux latitudes magnétiques les plus hautes (ce qui inclue les USA - puisque le pôle magnétique est situé au Canada, et non pas au pôle géographique- mais aussi l'Afrique du Sud par exemple) travaillent donc à se prémunir des GIC causés par les orages magnétiques, en créant des équipements qui y sont moins sensibles. En parallèle, les chercheurs en météorologie de l'espace étudient aussi les éruptions solaires récentes, et revisitent les observations des plus anciennes, afin de définir des méthodes de prédiction des GIC.

Figure 16 - Estimation du champ électrique de surface qui a induit des GIC dans le réseau électrique pendant le pic de la tempête géomagnétique du 30 octobre 2003. Source : BGS (NERC)

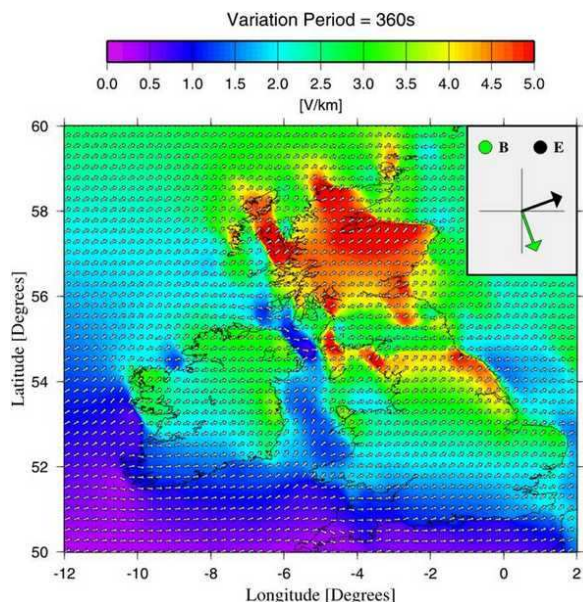


Figure 17 - Figure 9 - Estimation du champ électrique de surface qui a induit des GIC dans le réseau électrique pendant le pic de la tempête géomagnétique du 30 octobre 2003. Source : BGS (NERC)

Prédire les GIC n'est donc pas une tâche aisée. Mais compte tenu de ce que l'on sait des éruptions solaires et des CME elles-mêmes (en se basant aussi bien sur des arguments théoriques qu'observationnels -j'en ai parlé précédemment), et du fait des adaptations technologiques mises en œuvre depuis 20 ans pour s'en prémunir, on imagine mal qu'un GIC futur puisse faire tomber en panne d'un coup et/ou de façon durable tout le système électrique des pays industrialisés, et créer ainsi des conséquences désastreuses. Par contre, les GIC à venir pourraient très bien créer de nouveaux dommages locaux et temporaires à des installations électriques. Cela implique des coûts de maintenance (et le cas échéant, de réparation)

importants. C'est cette dernière raison qui fait que les GIC sont surveillés et étudiés.

Dossier : Tempêtes solaires 3/4

Suite de notre dossier sur les « tempêtes solaires » et des réponses de l'astrophysicien Guillaume Aulanier. Aujourd'hui, « l'événement de Carrington » en 1859

La-fin-du-monde.fr : Toute personne qui s'est intéressée aux tempêtes solaires à forcément entendu parlé de « l'événement de Carrington » qui eut lieu pendant l'été 1859. Décrite comme la « tempête du siècle » ou « tempête parfaite » selon les auteurs, elle frappe les esprits par ses conséquences terrestres (ou « Geomagnetically Induced Currents ») (GIC) comme nous l'avons appris dans la réponse précédente). Les plus frappantes de ces conséquences concernent le réseau télégraphique (à l'époque la seule infrastructure de ce type) dont certaines stations prirent feu et dont certains opérateurs furent frappés par des décharges électriques.

Je ne reviendrais pas sur le pronostic d'une date possible pour qu'une tempête solaire comparable se produise de nouveau (cf. 1re partie), mais quelles seraient les conséquences d'un tel événement aujourd'hui dans un monde devenu hautement dépendant de ses infrastructures technologiques ?

Guillaume Aulanier : Avant tout, il convient de bien rappeler une chose importante. L'événement de Carrington est survenu il y a plus de 150 ans. C'était une autre époque.

Côté physique, les plasmas n'étaient pas vraiment connus. Côté astrophysique, les CME n'étaient pas connues, donc pas observées. En effet, elles n'ont été découvertes que dans les années 1970. Et elles ne sont observées de façon régulière que depuis 1996. Côté observations, les instruments de l'époque

n'étaient ni aussi performants, ni aussi nombreux qu'aujourd'hui. L'ensemble des données d'observation disponibles pour cet événement est donc très incomplet.

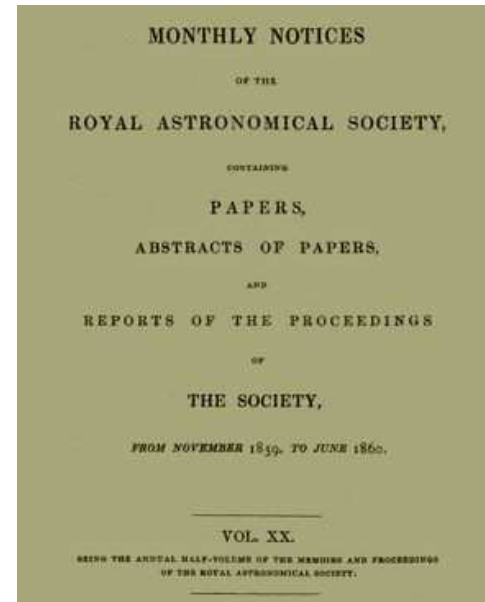
TEMPÊTES SOLAIRES

De ce fait, la plupart des indices modernes qui permettent de caractériser le degré de géoeffectivité d'une éruption solaire sont assez mal estimés pour cet événement de 1859. Pour certains de ces indices, les incertitudes peuvent facilement conduire à une surestimation d'un facteur 3 (donc une erreur de 300%). C'est le cas pour le flux de rayons X, pour le flux des protons solaires arrivant sur Terre, et pour l'indice Dst de l'orage magnétique qui a suivi l'éruption au Soleil. Je reviens plus bas sur les raisons de ces grandes incertitudes.

Ces incertitudes sont très ennuyeuses pour estimer précisément l'effet du même événement sur le monde actuel, ainsi que le caractère unique ou non de cet événement. En effet, de toutes les éruptions solaires et orages magnétiques observées depuis 1859, ce sont très précisément pour ces trois valeurs, les plus incertaines, que l'événement de Carrington est souvent qualifié de la plus grande tempête solaire observée.

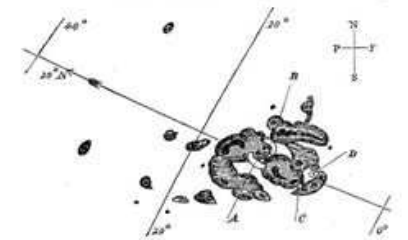
Malgré tout, ces incertitudes sont suffisamment petites pour dire que l'événement de Carrington n'était, finalement, pas terriblement plus énergétique que d'autres qui ont lieu depuis, si tant est qu'il ait réellement été plus énergétique. De plus, aucune des valeurs qui ont été évaluées, pour tous les indices qui le caractérisent, ne sont suffisamment élevées pour produire les effets apocalyptiques que l'on peut lire ou entendre ici ou là. Pour que ces derniers arrivent, il faudrait un événement développant des énergies plus fortes de plusieurs ordres de grandeur (c'est-à-dire plusieurs puissances de dix).

Il est néanmoins important de caractériser cet événement. En effet, il a sûrement été un des plus spectaculaires. Avec 10 ou 20 autres, il fait partie de l'ensemble qui est aujourd'hui étudié, afin de comprendre les conditions d'une météorologie de l'espace extrême qui peut se reproduire.



Description of a Singular Appearance seen in the Sun on September 1, 1859. By R. C. Carrington, Esq.

While engaged in the forenoon of Thursday, Sept. 1, in taking my customary observation of the forms and positions of the solar spots, an appearance was witnessed which I believe to be exceedingly rare. The image of the sun's disk was, as usual with me, projected on to a plate of glass coated with distemper of a pale straw colour, and at a distance and under a power which presented a picture of about 11 inches diameter. I had secured diagrams of all the groups and detached spots, and was engaged at the time in counting from a chronometer and recording the contacts of the spots with the cross-wires used in the observation, when within the area of the great north group (the size of which had previously excited general remark), two patches of intensely bright and white light broke out, in the positions indicated in the appended diagram by the letters A and B, and of the forms of the spaces left white. My



first impression was that by some chance a ray of light had penetrated a hole in the screen attached to the object-glass, by

Figure 18 - Monthly Notices of the Royal Astronomical Society dans lesquelles Richard Christopher Carrington publia ses observations.

Source : adsabs.harvard.edu

Commençons donc par discuter des incertitudes sur les rayons X, et de leurs effets.

Il n'y avait pas en 1859 d'observation du Soleil en rayons X-mous (SXR), ceux-là mêmes qui servent aujourd'hui à classer les éruptions. Les rayons X n'allaient être découverts que plusieurs décennies après. Par contre, les crochets magnétiques

terrestres, liés aux SXR, étaient bien observés et mesurés avec une grande précision. De plus, Carrington avait observé des embrillancements solaires directement en lumière blanche. L'analyse de ces deux observations conduit à penser aujourd'hui que l'éruption de 1859 était au moins de la classe X10. Il y en eu d'autres depuis. Les évaluations les plus optimistes (ou pessimistes, selon le point de vue) le portent à la classe X40 ou X60. À comparer avec l'éruption du 4 novembre 2003, de classe X28, donc entre 30 et 50 % moins énergétique que celle de 1859.

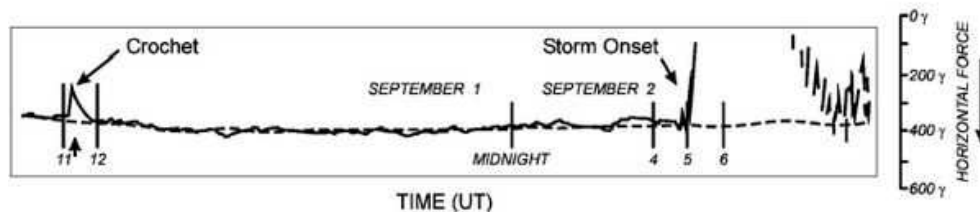


Figure 19 - Courbe de la composante horizontale du champ magnétique terrestre relevée à l'observatoire de Kew les 1er et 2 septembre 1859, montrant le crochet magnétique à 11 h 15 UT du 1er septembre et la tempête géomagnétique qui a suivi 17,6 heures plus tard.

Courbe de la composante horizontale du champ magnétique terrestre relevée à l'observatoire de Kew les 1er et 2 septembre 1859, montrant le crochet magnétique à 11 h 15 UT du 1er septembre et la tempête géomagnétique qui a suivi 17,6 heures plus tard. Source : "The 1859 Solar-Terrestrial Disturbance and the Current Limits of Extreme Space Weather Activity," by E. W. Cliver and L. Svalgaard, Solar Physics (2004)

On peut en déduire que les effets des rayonnements X de l'événement de Carrington, sur la thermosphère et l'ionosphère, devraient être du même ordre de grandeur, voire de 2 à 3 plus forts (en étant pessimiste), que ce qui s'est produit fin 2003. L'éruption de Carrington, arrivant aujourd'hui, aurait donc des perturbations certaines, mais temporaires, sur les communications radio au sol, comme avec nos satellites mis en orbite autour de la Terre (ce qui inclut GPS et autres satellites de communication).

Aussi, elle serait dangereuse pour des astronautes. Tout ceci serait très gênant pendant quelques heures, tout au plus. Mais ça pourrait être critique, lors d'opérations ponctuelles impliquant l'usage de satellites ou le décollage de véhicules spatiaux. Malgré tout, ces effets seraient totalement imperceptibles au sol, grâce à l'atmosphère terrestre.

Passons à présent la question des protons solaires.

Les détecteurs de particules n'existaient pas en 1859. On ne connaissait même pas le proton, dont on peut dater la découverte à un demi-siècle après. On n'avait donc pas non plus inventé le terme de GLE. Le flux de protons pour cet événement n'est estimé aujourd'hui qu'à partir des traces indirectes qu'il a laissé dans les glaces profondes aux pôles terrestres. L'exploitation de ces traces suggère que le flux de protons arrivant à la Terre, pour l'éruption de Carrington, serait entre 2 et 3 fois supérieures à celui produit par d'autres événements à protons, comme le 14 juillet 2000 et le 28 octobre 2003, et qu'il serait à tout à fait similaire à ceux des deux événements à protons majeurs, le 20 janvier 2005 (le plus fort GLE connu) et le 23 janvier 2012 (cette semaine). Malheureusement, la formation de ces traces est loin d'être comprise, quantitativement.

Le flux des protons de 1859 est donc, en fait, très mal estimé. On peut donc prendre le GLE de 2005 comme étalon pour déduire les effets contemporains des protons de l'éruption de Carrington : quelques satellites seraient temporairement inopérants,

d'autres verraient leur électronique irrémédiablement endommagée, et il faudrait empêcher tous les vols d'avion de passer au milieu de l'ovale auroral à leur altitude de croisière habituelle. Une particularité est que, puisque l'ovale auroral était bien plus étendu en 1859 qu'en 2005, un simple détournement des vols d'avion aux plus hautes latitudes pourrait ne pas suffire : il faudrait peut-être diminuer l'altitude de croisière d'un très grand nombre de vols, afin d'augmenter la protection naturelle offerte par les couches de l'atmosphère plus denses à basse altitude.

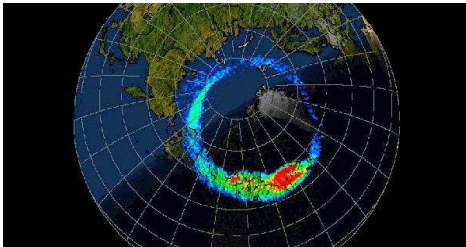


Figure 20 - Ovale auroral - Source : cse.ssl.berkeley.edu

Tout ceci coûterait cher, et demanderait une certaine logistique et une grande réactivité.

A ne pas oublier, des astronautes pris dans le faisceau de protons seraient soumis à des doses de radiation particulièrement élevées, bien plus qu'à bord des avions. Dans l'ISS, ils devraient aller se réfugier dans un compartiment protecteur. Sinon, en orbite basse ils seraient mis en danger, et en dehors de la magnétosphère (par exemple en transit vers la Lune), une exposition à ces particules serait certainement létale. Ce sont tous ces effets liés aux particules énergétiques solaires qui préoccupent, en priorité, les organismes intéressés à la météorologie de l'espace.

Voyons maintenant les effets géomagnétiques, en incluant l'indice Dst.

Cet indice global, qui mesure l'intensité des orages géomagnétiques, n'existait tout simplement pas en 1859. Des mesures locales du champ géomagnétique existaient, mais elles ne sont pas suffisantes pour évaluer aujourd'hui le Dst avec précision. Certaines mesures de 1859 indiquent des variations locales, pas globales, du champ géomagnétique de 1500 nT. Avec des modèles un peu ad hoc, ces mesures ont été utilisées pour recalculer un indice Dst de plus de 1700 nT. Du jamais vu : le Dst de l'orage de mars 1989, le plus haut jamais mesuré, était de 550 nT.

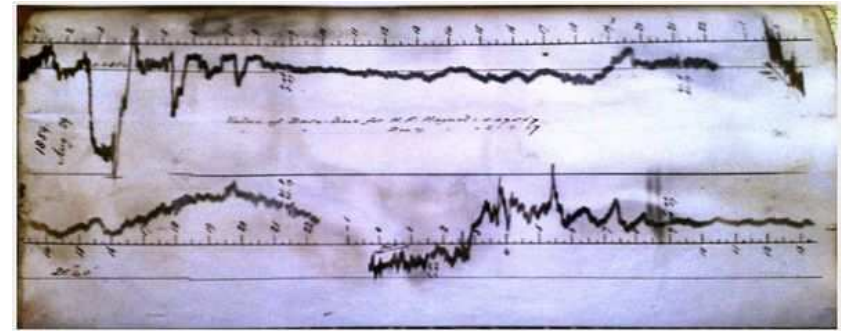


Figure 21 - Magnétogramme du 28 août 1859 réalisé à l'observatoire de Greenwich - Source : geomag.bgs.ac.uk

Cela fait-il de l'orage de Carrington le plus intense jamais observé, et de loin ? Pas sûr. D'une part, avec d'autres modèles, il n'a pas été possible de reproduire l'évolution temporelle d'un Dst d'une telle ampleur. D'autre part, des mesures locales de plus de 1000 nT ont aussi été observées pour d'autres événements depuis 1859, par exemple en 1941.

Or ce même événement de 1941 a eu un Dst égal à 450 nT. C'est 18% moins intense qu'en 1989, et c'est bien inférieur à 1700 nT. La seule chose que l'on puisse donc dire avec certitude, c'est que cet événement est parmi les plus géoeffectifs que l'on n'a jamais observé.

Il existe quand même quelques mesures précises de 1859. On peut en tirer des enseignements pour quantifier les effets contemporains, au niveau du sol, et dans l'espace, pour un événement identique.

Premièrement, on a observé à l'époque un décalage précis en temps de 17.6 heures seulement, entre l'éruption au Soleil et le début de ses effets sur Terre.

Cette mesure nous montre aujourd'hui qu'une CME très rapide a dû être éjectée du Soleil vers la Terre. À ce jour, une seule CME plus rapide a été mise en évidence, en février 1972. Des délais inférieurs à 24h n'ont été observés que pour 10 à 15 CME depuis cet événement (au lieu des 1 à 4 jours habituels). On pense aujourd'hui qu'ils sont dus à des envois de CME en série : les premières CME permettraient de balayer le vent solaire, et donc de limiter le freinage aérodynamique qu'il exerce sur les CME suivantes. On croit que c'est ce qui s'est passé récemment, par exemple pendant les éruptions d'Halloween en 2003 : celles du 28 et du 29 octobre 2003 sont parvenues à la Terre en 20 heures, soit à peine 14% moins vite environ que la CME de 1859.

L'éruption de mars 1989, quant à elle, a eu un temps de transit entre le Soleil et la Terre bien plus classique.

Deuxièmement, on a observé en 1859 l'apparition d'aurores à des latitudes aussi basses que 20 degrés.

Des aurores sont rarement observées à des latitudes aussi basses : depuis 1859, seule une dizaine ont été observées à des latitudes inférieures à 45 degrés. Pour donner des exemples, les orages géomagnétiques de février 1872, février 1958, mars 1989, et octobre 2003 ont respectivement produit des aurores à peu près jusqu'à des latitudes de 19, 28, 29 et 40 degrés. C'est important, puisqu'on a vu précédemment que les GLE et les GIC se produisaient au sein de l'ovale auroral. Donc plus ce dernier est grand, plus la zone de risque pour les GLE et les GIC est étendue.



Figure 22 - 2 septembre 1859 - 05:00 UTC – Les observatoires de Greenwich et Kew détectent des perturbations magnétiques, la seconde CME arrive sur Terre après 17,5 heures d'un voyage réalisé à 2380 km/s avec une orientation magnétique sud ; des aurores apparaissent au sud aussi bas que le Venezuela. (les points rouges indiquent les lieux où des aurores ont été observées) - Source : scientificamerican.com)

J'ai déjà évoqué les effets du GLE prévisible ci-dessus. Voyons donc ce qu'on peut dire au sujet des GIC.

Il est intéressant de remarquer, à titre de comparaison, que depuis la seconde moitié du XXe siècle, les CME de fin 2003 ont été presque aussi rapides que celle de 1859, et qu'elles ont bien produit des GIC, mais que c'est la CME de 1989, plus lente, qui a produit les GIC les plus intenses, et des aurores presque aussi basses qu'en 1859. On voit alors que :

- d'une part, l'éruption de Carrington n'a pas produit de CME bien plus rapide, ni des aurores bien plus étendues, que ce que d'autres événements plus récents ont pu produire depuis (la vitesse de propagation de sa CME et l'étendue de son oval auroral ont tout de même été parmi les plus grandes observées).

- Mais d'autre part, elle cumule le caractère rapide de la CME, et le caractère étendu des aurores, qui depuis 1859 n'ont jamais eu lieu en même temps et avec une telle magnitude, pour un seul et même événement.

Donc, si l'on se réfère aux autres événements que celui de 1859, plus récents et mieux observés, et lorsque l'on considère le caractère rapide de la CME de 1859, ainsi que la grande étendue de sa région aurorale, et aussi son indice Dst probablement très fort, on peut déduire que le même événement que celui de 1859, arrivant aujourd'hui, devrait former sur Terre des GIC d'une amplitude comparable à ceux produits en mars 1989, et peut-être même un peu plus intenses du fait de la grande vitesse de la CME.

On pourrait alors prédire :

- d'une part des perturbations, ou de petites pannes, du réseau électrique à plusieurs endroits du globe. C'est déjà arrivé plusieurs fois. Mais dans ce cas, ces perturbations couvriraient probablement des régions géographiques plus étendues qu'en 1989 ou 2003. C'est dû au fait que la région aurorale s'est formée, en 1859, 10 degrés (respectivement, 20 degrés) plus près de l'équateur qu'en 1989 (respectivement, 2003).
- D'autre part des risques élevés d'avoir des pannes d'une ou plusieurs heures, aux plus hautes latitudes (si l'on s'en réfère à 1989 et 2003) du réseau électrique.

Mais du fait de la rareté de ce type d'événement extrême, il est difficile d'évaluer, avec précision, si les développements technologiques, qui ont été faits depuis 1989, réussiraient à empêcher des pannes, et s'ils ne les empêcheraient pas, à quel point ils réussiraient quand même à en limiter la portée. Par ailleurs, il est malvenu de transposer les dégâts subits par les équipements du télégraphe de la fin du XIXe siècle, suite à

l'éruption de 1859, à ce qui pourrait se passer avec des équipements électriques construits dans la seconde moitié du XXe siècle, et plus tard. Les réseaux télégraphiques étaient d'une simplicité tout autre que les réseaux électriques modernes. Même si ces derniers ne sont pourtant pas totalement à l'abri de tout problème, les événements de 1989 et de 2003 le prouvent bien.

Finissons avec un commentaire sur le qualificatif de tempête parfaite, pour l'événement de Carrington.

Cet événement a ceci de remarquable que, lorsqu'on le compare à d'autres événements importants, il est le seul à se situer dans le peloton tête de tous les classements, indice par indice. Tous les autres événements, comme ceux de juillet 2000, octobre et novembre 2003, janvier 2005 et janvier 2012, ne cumulent pas en même temps un indice élevé pour la classe de l'éruption, un flux important de protons arrivant à la Terre, un temps court de transit de la CME, un indice Dst très élevé, et une basse latitude aurorale. C'est cette singularité qui fait de l'événement de Carrington une tempête dite parfaite : tous les ingrédients sont là, en même temps, pour créer d'un seul coup tous les effets terrestres qui se produisent au cours d'autres événements.

Il convient tout de même de rappeler que tous ces ingrédients ne sont pas cumulatifs dans leurs effets physiques. Par exemple, l'amplitude du GLE ne va pas avoir d'effet sur celle du GIC, et inversement. Par contre, ils sont bien cumulatifs sur les coûts impliqués.

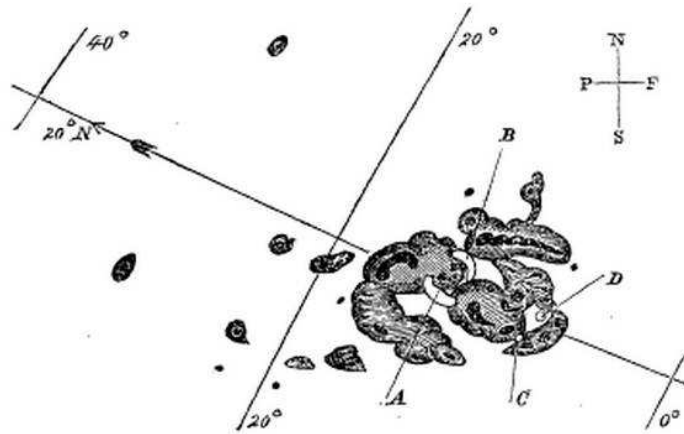


Figure 23 - Croquis du groupe de taches solaires à l'origine de la seconde phase de l'éruption solaire, dessiné par Richard Carrington. Les quatre zones labélisées de A à D correspondent aux lieux où sont apparus les flashes de l'éruption brillants en lumière blanche – Source Wikipédia

Concluons.

A moins d'une énorme surprise -ce dont on est jamais à l'abri en physique- il est peu probable que ce soit la dépendance croissante de l'humanité à l'énergie électrique, et donc que ce soient les GIC, qui constituent la motivation principale dans le développement de recherches en météorologie de l'espace. Aujourd'hui, aucune connaissance scientifique chiffrée ne justifie d'être alarmiste sur cette question. Les GIC n'en restent pas moins gênants, et une attention bien légitime doit leur être portée.

En revanche, vu que les effets physiques et les coûts induits par les éruptions solaires font principalement intervenir l'ionosphère et l'espace, on peut s'attendre à ce que la météorologie de l'espace prenne de plus en plus d'importance au niveau sociétal, au fur et à mesure que nos sociétés utiliseront ou dépendront de plus en plus l'espace, voire lorsqu'elles s'y

implanteront.

Les recherches fondamentales et appliquées doivent préparer cela. La surveillance des phénomènes naturels, en l'occurrence du Soleil et l'environnement spatial de la Terre, s'inscrit dans cette démarche. C'est un effort auquel de nombreux scientifiques de plusieurs pays participent.

Dossier : Tempêtes solaire 4/4



Suite et fin de notre dossier sur les « tempêtes solaires » et des réponses de l'astrophysicien Guillaume Aulanier. Aujourd'hui, « le consensus scientifique ».

La-fin-du-monde.fr : Vous avez tenu un discours plutôt rassurant dans vos réponses, néanmoins certains scientifiques ne semblent pas partager votre optimisme et il semblerait qu'il n'y ait pas de consensus sur ce sujet. Voici quelques exemples de déclarations nettement plus alarmistes :

- Bruce Tsurutani, un physicien spécialiste des plasmas au Jet Propulsion Laboratory de la NASA déclarait : « [Cela \(une nouvelle tempête solaire\) pourrait très bien être encore plus intense que ce qui est arrivé en 1859](#) » .
- Michio Kaku, un physicien théoricien américain répondant aux questions de l'émission « Varney & C° » sur Fox News, comparait les conséquences d'une CME à un « [tsunami solaire](#) ».
- Le Dr. William R. Graham, (former Science Advisor to the President and NASA Deputy Administrator in Congressional Testimony) déclarait lors d'un séminaire de l'Electric Infrastructure Security (EIS) Council, une organisation internationale qui s'attache, entre autres, à la protection des infrastructures électrique contre les menaces électromagnétiques : « [... La dégradation des infrastructures pourrait avoir des effets irréversibles sur la capacité du pays à subvenir aux besoins de sa population.](#) »

Comment expliquez-vous ces différences de point de vue ?



Guillaume Aulanier : Comme je l'ai abondamment décrit précédemment, les effets des éruptions solaires sur la Terre sont problématiques, et ils induisent des coûts non négligeables. Il est donc normal que plusieurs personnalités et organisations se saisissent du sujet, et donc fassent des interventions visant des publics très divers. Mais lorsqu'il s'agit de vulgarisation scientifique, de discours politique, ou d'exposé stratégique, les raccourcis sont inévitables. Le caractère qualitatif des superlatifs qui sont utilisés, l'imperfection des analogies qui sont faites, et parfois l'extraction d'une phrase hors de son contexte, peuvent laisser libre cours à ces surinterprétations alarmistes, et ce, malgré le choix pourtant prudent du mode conditionnel auquel les verbes sont souvent conjugués. En dépit de leur longueur, mes propres interventions sur ce site ne sont elles-mêmes pas exemptes de ces limitations.

Mais à ma connaissance, aucun chercheur dans le domaine de la physique de relations Soleil-Terre, publiant régulièrement sur le sujet dans des revues à comité de lecture, et présentant ses travaux à ses pairs lors de réunions scientifiques internationales, n'a jamais prétendu ni publiquement ni en privé, qu'une éruption solaire ou un orage magnétique pourrait provoquer l'effondrement des sociétés industrialisées actuelles, et encore moins une catastrophe naturelle à l'échelle de la Terre elle-même. Sur cet aspect du problème, au moins, il y a bien consensus.



La-fin-du-monde.fr : Voilà, ce dossier est fini, et je tenais à remercier encore une fois Guillaume Aulanier pour son investissement personnel dans le développement de ce dossier. Loin de l'image du « savant » enfermé dans sa tour d'ivoire et coupé du vulgum pecus, M. Aulanier a su prendre sur son précieux temps pour nous permettre de comprendre simplement un sujet éminemment complexe. Si cette position était plus répandue, toutes les théories catastrophistes issues des pseudosciences se porteraient certainement moins bien.

Merci également au Soleil qui a patiemment attendu notre dossier pour lancer son opération n° 24 en nous offrant deux superbes éruptions [M9](#) et [X3](#) !

Pour compléter ce dossier, je vous propose ci-dessous une section « En + » remplie de liens vers des sites incontournables sur le sujet.

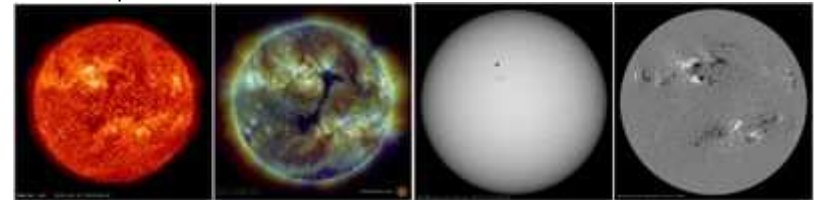
Sommaire du dossier

- [la fréquence des tempêtes solaires,](#)
- [la mesure de leur dangerosité et les moyens de s'en protéger,](#)
- [les effets que la tempête de 1859 pourrait avoir aujourd'hui.](#)
- Conclusion

En + :

- [La Home Page de Guillaume Aulanier](#) En bas de la page, 4 images animées du soleil prises pendant les dernières 48

heures par le satellite SDO



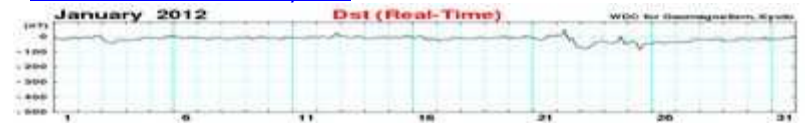
- Le site du [LESIA](#) (Laboratoire d'études spatiales et d'instrumentation en astrophysique) un des laboratoires de l'Observatoire de Paris



- Les données recueillies par le satellite GOES sur [SolarMonitor.org](#). Suivez en temps réel les éruptions solaires et découvrez si une éruption de classe X est en cours !



- Suivez l'indice DST en temps réel sur le site de l'[Observatoire de Kyoto](#)



- Le site du [Solar Dynamic Observatory \(SDO\)](#)



- Le site de [SOHO](#) (SOHO, the Solar & Heliospheric Observatory)



- La page de l'Agence spatiale européenne consacrée à la météorologie spatiale



Ce(tte) oeuvre, exception faite des extraits de textes et images restant la propriété de leurs auteurs respectifs, est mise à disposition selon les termes de la [Licence Creative Commons Paternité - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 2.0 France](#). Toute copie partielle ou totale de ce site doit mentionner www.la-fin-du-monde.fr