

QUELQUES ÉRUPTIONS SOLAIRES PASSÉES

Chantal et Georges Lecoutre

Les éruptions solaires et les éjections coronales de masse sont des phénomènes extrêmes de l'activité solaire qui ont des effets importants sur notre environnement. Prenons le temps de regarder quelques événements passés et les effets qu'ils ont eu sur Terre.

Une éruption solaire se produit à la surface de la photosphère et projette au travers de la chromosphère des jets de matière ionisée. Elle est provoquée par une accumulation d'énergie magnétique dans des zones de champs magnétiques intenses, probablement à la suite d'un phénomène de reconnection magnétique. Les éruptions solaires sont parfois suivies d'éjections violentes de matière à plus grande échelle : les éjections coronales de masses (CME).

CME = coronal mass ejection ou éjection coronale de masse. L'expression souvent utilisée, éjection de masse coronale est trompeuse puisqu'elle pourrait faire croire que la matière éjectée provient de la couronne, or c'est de la matière chromosphérique qui est éjectée.

Que peut constater un observateur sur Terre ? L'apparition d'aurores polaires, plus ou moins abondantes et à des latitudes plus basses que la normale, l'impossibilité de passer des appels téléphoniques, un GPS qui met du temps à le localiser sur une carte ou qui ne le localise plus, l'arrêt du flux internet....

Mais ces manifestations ne sont pas les seules et d'autres phénomènes encore plus importants peuvent être enregistrés comme nous allons le voir dans la suite.

Septembre 1859, première observation d'une éruption solaire

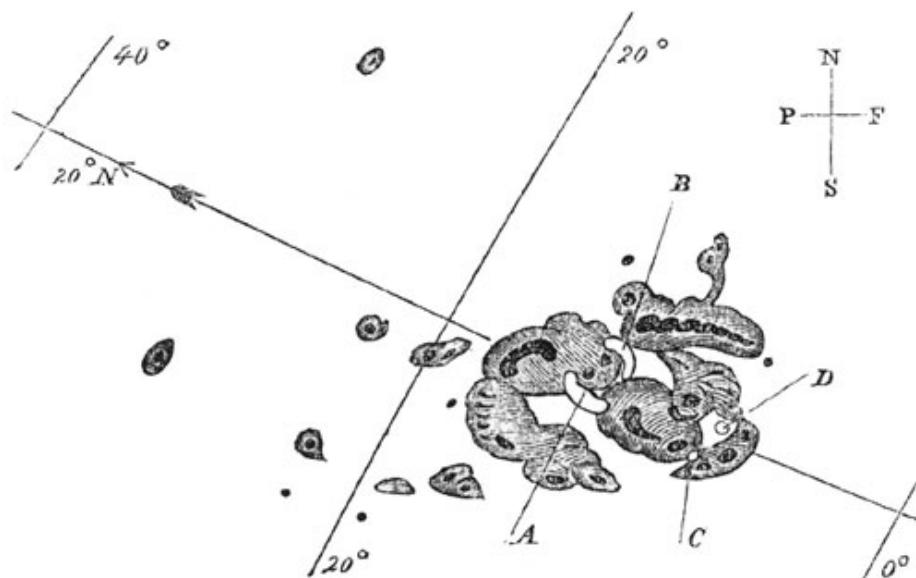
La première relation de l'observation d'une éruption solaire est due à l'astronome britannique Richard Carrington. Le 1^{er} septembre 1859, il constata l'apparition d'une tache très lumineuse à la surface du Soleil (pendant à peu près cinq minutes). Simultanément l'astronome amateur Richard Hodgson fit la même observation. Tous deux envoyèrent immédiatement leur compte-rendu à la Royal Astronomical Society qui les publia dans l'édition de novembre 1859¹.

Cette éruption propagea également des courants électriques dans le sol. Des surtensions dans les lignes télégraphiques furent constatées,

¹ Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 20, Issue 1, November 1859

choquant les techniciens et incendiant leur papier télégraphique. On rapporta aussi que ces courants firent fondre certains câbles électriques et déclenchèrent localement des incendies. Les magnétomètres du monde entier enregistraient de fortes perturbations du champ magnétique terrestre pendant plus d'une semaine. Cette éruption exceptionnelle donna lieu à des aurores boréales qui, le 2 septembre 1859, furent visibles jusqu'en Amérique centrale, au Venezuela (6° N) et aux Açores (38° N, 28° O) alors que généralement elles se cantonnent à une latitude supérieure à 66° N.

Carrington a été le premier à faire le lien entre ces divers phénomènes. Selon une étude de E.W. Cliver et L. Svalgaard publiée dans la revue « *Solar Physics* » en 2005 cette tempête solaire qualifiée de « super-tempête » par les spécialistes, fut



Dessin de taches solaires de 1859 par Richard Carrington (Wikimedia / American Scientist nov-déc 2007).

probablement le résultat d'une CME accompagnant deux éruptions chromosphériques majeures et successives dont la première fut d'une classe très supérieure à X10². Cette analyse a posteriori a démontré qu'il s'était probablement écoulé moins de 18 heures avant que cette CME n'atteigne la Terre (propagation à plus de 2 000 km/s). Elle a aussi laissé des traces dans les glaces du Groenland sous forme de beryllium 10, ce qui a permis d'en évaluer la puissance. La fréquence d'événements aussi violents pourrait être de 0,7 à 1,2 par siècle.

À la lecture des « Archives des journaux sur la météo spatiale »³ on constate l'abondance de ces phénomènes solaires qui n'ont bien sûr pas tous la même importance.

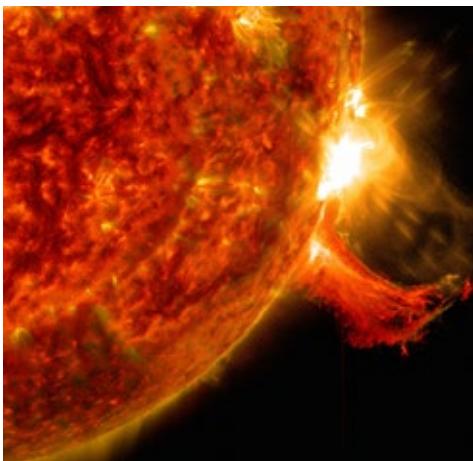
Intéressons-nous à quelques événements marquants.

Octobre 1903

Cette tempête a eu la particularité de se produire pendant un minimum d'activité solaire. Elle possède la plus grande intensité connue pour une telle période. Elle a perturbé les communications de façon importante, d'énormes pics dans la tension des lignes téléphoniques ont été enregistrés à Chicago, et les systèmes télégraphiques ont été touchés à Londres. Cela démontre que les tempêtes solaires constituent une menace même lorsque l'activité solaire est faible.

² Les astronomes classent les éruptions solaires en fonction de leur intensité en watts par mètre carré dans le domaine des rayons X compris entre 0,1 et 0,8 nanomètre. Il existe cinq catégories, repérées par les lettres A, B, C, M et X. Chaque catégorie correspond à une éruption d'une intensité 10 fois plus forte que la précédente. Chaque catégorie est subdivisée en neuf degrés. La catégorie X est ouverte. Ainsi, même s'il n'existe pas de lettres pour caractériser des éruptions 10, 100 ou 1 000 fois plus puissantes, on trouve alors des numéros pouvant aller bien au-delà de X9. La plus puissante éruption enregistrée à ce jour a saturé les capteurs au-delà de X28 (en octobre 2003).

³ <http://www.solarstorms.org/SRefStorms.html>



Éruption solaire capturée par le satellite SDO / NASA en 2014 (crédits : NASA / SDO).

Mai 1921

Une étude reproduisant la chronologie des événements explique que la période de perturbation géomagnétique de mai 1921 peut être décrite comme une séquence de tempêtes, et non un événement solitaire. Selon certains experts, son ampleur était comparable à celle de l'événement de Carrington.

4 août 1972

Cette tempête se produisit entre les missions Apollo 16 et Apollo 17. Classée X20, elle a fortement perturbé les réseaux électriques et de communication en Amérique du Nord. Elle a de plus surpris le commandement américain en provoquant l'explosion accidentelle de mines marines américaines au large du Nord-Vietnam⁴. Le nuage

⁴ D'après un document déclassifié de l'US Navy :

https://vva.vietnam.ttu.edu/repositories/2/digital_objects/83295

Newspaper Headlines

May 15, 1921

SUNSPOT CREDITED WITH RAIL TIE-UP
New York Central Signal System Put Out of Service by Play of Northern Lights.

The sunspot which caused the brilliant aurora borealis on Saturday night and the worst electrical disturbance in memory on the telegraph systems was credited with an unprecedented tie-up at 125th Street early Sunday morning, when the entire signal and switching system of the New York Central Railroad below 125th Street was put out of service, followed by a fire in the control tower at 125th Street. This is the first time that a sunspot has been blamed for such a piece of mischief. From other accounts it appeared



WIRES HIT BY THE AURORA BOREALIS

Telegraph Service Throughout United States Badly Crippled by Northern Lights—West and South Feel Effects Most—Reported as Brilliantly Visible Between Scranton and Pittsburgh, Buffalo Center

4 août 1972 : archives de journaux d'époque.

coronal a atteint la Terre en tout juste 14,6 heures (contre 2 à 3 jours en temps normal), c'est le temps de déplacement le plus rapide jamais enregistré (près de 2 900 km/s soit plus de 10 000 000 km/h) à cette date. Si un astronaute des missions Apollo avait réalisé une sortie extravéhiculaire sur la Lune à ce moment-là, il aurait été exposé à une dose de rayonnement sûrement mortelle.

Mars 1989

Le 9 mars 1989, une forte éruption solaire se produisit et projeta dans l'espace un nuage de plasma. Cette CME se dirigea vers la Terre à une vitesse de 500 km/s. Trois jours et demi plus tard, des variations anormales de tension furent observées sur le réseau électrique au Québec.

Le 13 mars 1989, le champ magnétique terrestre varia brusquement. À 2 h 44, les systèmes de protection du réseau électrique québécois se déclenchèrent et six millions de personnes furent privées d'électricité pendant 9 heures. La tempête géomagnétique provoquant une panne de courant majeure au Québec fera la une des journaux du monde entier. Le grand public découvrit le phénomène.

Au même moment, des aurores boréales furent visibles depuis le Texas ! Les ondes radio entre les USA et la Russie furent également brouillées.

Halloween 2003

Les 22, 23 et 28 octobre 2003, de puissantes éruptions se produisirent à la surface du Soleil, estimées à X28. La vitesse des électrons et des protons émis par l'éruption dépassa les deux mille kilomètres par seconde ! Très rapidement, plusieurs vols transpolaires perdirent le contact radio pendant plus d'une heure. Près de 60 % des satellites, dont les sondes SoHO⁵ (panne temporaire) et ACE⁶, rencontrèrent des dysfonctionnements (problème d'orbite, panneaux solaires dégradés...). Certains furent mis en mode sans échec pour les préserver. Les astronautes à bord de l'ISS durent se réfugier dans les parties les plus protégées du module russe, pour se prémunir contre l'augmentation des niveaux de rayonnement.

Sur Terre, douze transformateurs furent endommagés en Afrique du Sud, et en Suède la ville de Malmö fut plongée dans le noir pendant près d'une heure.

En avril 2004, Voyager 2 a également pu détecter les effets de cette tempête lorsque les particules chargées l'atteignirent.

Juillet 2012 : l'événement qui a raté la Terre !

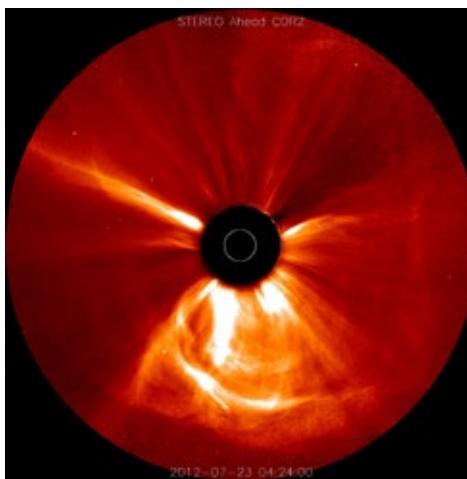
Le 23 juillet 2012, la CME la plus rapide de l'histoire, a été observée par la sonde STEREO-A. Cette tempête solaire extrême a traversé l'orbite de la Terre... mais nous a manqué d'une semaine (elle a frappé de plein fouet la sonde).

Une nouvelle analyse des données de STEREO par des experts chinois et américains a révélé un scénario

⁵ SoHO (Solar and Heliospheric Observatory) satellite NASA/ESA, observe le Soleil au point de Lagrange L1 depuis 1995.

⁶ Ace (Advanced Composition Explorer) satellite de la NASA étudie in situ les particules d'origine solaire, interplanétaire, interstellaire et galactique. Lancé en 1997, sa mission doit durer jusqu'en 2024.

catastrophique. Si cette CME s'était produite une dizaine de jours plus tôt, cette tempête, aussi puissante que l'événement de Carrington, et deux fois plus intense que l'événement de 1989 ayant causé la panne au Québec, aurait pu causer une perturbation à grande échelle des systèmes de communication et de localisation par satellite ainsi que des pannes électriques généralisées. On estime que, si elle avait frappé la Terre, le montant des dégâts aurait pu atteindre 2 milliards de dollars US et qu'il nous aurait fallu des années pour nous en remettre.



Les sondes STEREO ont noté ce 23 juillet 2012, l'émission d'une CME géante s'éloignant du Soleil à la vitesse vertigineuse de 3 000 km/s.

4 février 2022

Le 3 février 2022 la société SpaceX lança 49 satellites de la constellation Starlinks depuis Cap Canaveral. Le 4 février une CME de faible intensité (classe G2)⁷ frappa le champ magnétique terrestre. On constata alors un début de « désorbitation » des satellites. L'apport d'énergie dû à cette CME a chauffé la haute atmosphère de la Terre et a fortement augmenté la traînée aérodynamique des satellites. Ceux-ci orbitant à 210 km de la surface de la Terre (zone où il est facile de désorbiter un satellite) ont vu leur trajectoire modifiée et une quarantaine d'entre eux sont retombés dans l'atmosphère.

⁷ D'après le « Space weather prediction center de la NASA ».

Des traces de tempêtes solaires plus anciennes

Ces événements sont-ils particuliers, ou des événements semblables se sont-ils déjà produits avant la première observation de Carrington ? Les protons énergétiques venant frapper l'ionosphère produisent des réactions nucléaires donnant naissance à des isotopes radioactifs : le carbone 14, le beryllium 10, le chlore 36. Des physiciens et des géologues ont cherché des traces d'éruptions solaires ayant touché la Terre dans les archives naturelles du passé de celle-ci que sont les cernes des arbres multi-centenaires ou les carottes de glace prélevées dans les couches de glace des glaciers du Groenland et de l'Antarctique qui renferment toute l'histoire de l'atmosphère terrestre.

Les événements Miyake

Année 775

En 2012, une équipe dirigée par la physicienne Fusa Miyake de l'université de Nagoya (Japon) découvrit dans les anneaux de croissance de deux cèdres du Japon une forte et rapide hausse de la concentration en carbone 14, correspondant à l'année 775 de notre ère. Elle attribua ce phénomène à un sursaut de rayons gamma sans doute dû à l'explosion d'une supernova non identifiée. D'autres relevés réalisés sur des arbres d'Amérique du Nord et d'Europe montrèrent un pic similaire, indiquant que le phénomène avait touché une bonne partie de l'hémisphère Nord.

En 2013, l'équipe d'Ilya Usoskin⁸ (physicien) de l'université d'Oula en Finlande, après avoir mesuré la concentration en beryllium 10 pour l'an 775 dans des carottes de glace prélevées en Antarctique conclut qu'il s'agissait d'une tempête solaire qui pourrait correspondre à la plus forte éruption solaire connue à ce jour.

⁸ Publié dans Astronomie et Astrophysique en 2013.

En 2015, l'équipe du professeur Raimund Muscheler (géologue)⁹ de l'université de Lund en Suède, après avoir mesuré simultanément les concentrations des trois isotopes carbone 14, beryllium 10 et chlore 36 dans des carottes de glace prélevées au Groenland et avoir comparé ces taux à ceux observés lors d'éruptions solaires récentes, confirma que le phénomène repéré en 775 était bien une tempête solaire plus puissante que celle observée par Carrington. D'autres pics de carbone 14 ont été repérés dans les cernes des arbres en 993 de notre ère et en -663, -5263, -5410, -7176. Ces événements ont été appelés événements Miyake.

Année 993

En 2017, l'équipe de Hisashi Hayakawa¹⁰, de l'Université de Nagoya confirma l'hypothèse d'une forte tempête solaire pour l'année 993 de notre ère. D'anciens manuscrits indiquent aussi huit observations d'aurores en Saxe, dans le nord de l'Irlande et dans la péninsule coréenne à cette période

La super-éruption de -660

L'analyse de carottes de glace du Groenland faite par l'équipe internationale de Pascal O'Hare (géologue) de l'université de Lund en 2019¹¹ a montré une très forte augmentation des taux de carbone 14, beryllium 10 et chlore 36 en -660. Il s'agirait d'un événement aussi important que celui de 775.

Il y a 9200 ans, en -7176

Après avoir prélevé et analysé des carottes de glace au Groenland et en Antarctique l'équipe du professeur R. Muscheler cité plus haut a repéré des pics importants de beryllium 10 et de chlore 36. Ces pics ont été datés en -7176. Cela correspondrait à une tempête solaire de classe X qui

⁹ Publié dans Nature en 2015 : Multiradio-nuclide evidence for the solar origin of the cosmic-ray events of AD 774/5 and 993/4

¹⁰ Étude publiée dans la revue «Solar Physics» en 2017.

¹¹ Proceedings of the National Academy of Science (March 11, 2019).



Fusa Miyake près d'un morceau de bois de cèdre dont elle étudie les anneaux
(source : Université de Nagoya).

selon les chercheurs serait dévastatrice si elle se produisait de nos jours. Les résultats ont été publiés le 11 janvier 2022 dans la revue «*Nature Communications*». Il semblerait que cette éruption solaire ait eu lieu pendant un minimum solaire mais cela est encore un sujet de débat.

Et dans le futur ?

Il semble donc évident que des « super-tempêtes » solaires sont appelées à se reproduire dans un futur proche ou lointain. Pour une société comme la nôtre, multi-connectée et dépendant des communications internet, le danger des colères solaires est entier. Bien sûr nous avons appris des événements récents. Ainsi il est possible d'isoler électriquement certaines zones des circuits électriques et donc d'éviter la propagation d'une surcharge locale et la panne générale. De même il est possible de mettre les satellites en mode de protection leur permettant de ne pas subir directement les effets du plasma solaire.

Mais pour que ces précautions puissent être prises, il est nécessaire que l'alerte soit donnée suffisamment tôt. Les techniciens sur Terre n'ont que quelques heures pour mettre nos moyens de communication et de transport d'énergie électrique en

sécurité à partir du moment où le phénomène est détecté à la surface du Soleil. Une surveillance permanente et active du Soleil est donc mise en place via les satellites SoHO, STEREO B, SDO etc. Mais il est nécessaire de continuer les recherches pour mieux comprendre l'origine de ces phénomènes et développer une véritable « météo solaire » ce que s'emploient à mettre en œuvre les instituts internationaux tels Space Weather Prediction Center (SWPC) réunissant des collaborations internationales. Enfin les satellites « Parker Solar Probe », lancé le 12 août 2018 qui orbite autour du Soleil très près de la couronne solaire et « Solar Orbiter » lancé le 10 février 2020, devraient nous apporter leur moisson d'observations qu'il restera bien sûr à comprendre pour mieux prévoir l'activité solaire.

■
Pour plus de détails voir :

- Hors-série n° 14 du CLEA *Le Soleil*.
- Complément au HS14 sur le site du CLEA annexe 10 « des vidéos solaires » en particulier.
- *NASA A First for IRIS Observing a Gigantic Solar Eruption*.
- *NASA Highlights from SOHO's 20 Years in Space*.
- *Hinode 10th Anniversary of Its Launch*.
- *Météorologie de l'espace* de J. Liliensten, F. Pitout, M. Gruet et J.P. Marques édition de Boeck (2021).