

# Effet Carrington

---

Les grandes tempêtes solaires et leurs impacts  
sous-estimés

Erwann Rozier – Antoine Caillet

12/02/2010

# Plan

## Introduction

### I) Phénomène physique

- 1) Historique
- 2) Du Soleil...
- 3) ...à la Terre

### II) Dangers pour les infrastructures humaines

- 1) Effets sur la haute atmosphère
- 2) Effets sur la magnétosphère terrestre
- 3) Création d'un courant électrique

### III) Mesures possibles

- 1) Petites mesures
- 2) Météorologie de l'espace
- 3) Grandes mesures

## Conclusion

## Bibliographie

# Introduction

Les tempêtes solaires sont des événements assez peu prévisibles. Celle de 1859, qu'on a nommée d'après M. Carrington, fut dévastatrice dans un monde où la technologie était encore peu développée. Ses effets aujourd'hui seraient dramatiques, c'est pourquoi on va ici l'étudier, et essayer de prévoir le type de dangers et de destructions qu'elle causerait. On proposera ensuite des mesures, certaines conventionnelles et déjà en état de marche, et d'autres plus novatrices. Ce problème est réel, et l'argent que commence à dépenser les Etats-Unis et l'Europe le montre bien.

L'un des seuls chiffres fiables que l'on ait sur les tempêtes solaires est celui de la régularité de leur apparition en puissance. Tous les 11 ans environ, on a un pic d'éruptions solaires. Celles de 1859, particulièrement puissantes, arriva avec un peu de retard sur cette date, dans une période de faible activité solaire. Or la prochaine période d'éruptions est en 2011, et l'activité normale aurait dû se réchauffer depuis déjà un an. Les premiers mouvements viennent d'apparaître il y a un ou deux mois. Cela suffit aux alarmistes de tous bords pour crier à l'Apocalypse. D'après certaines interprétations du calendrier Maya, des changements radicaux, voire la fin du monde, est prévue pour le 21 décembre 2012. Une tempête solaire aussi puissante, voire plus puissante que celle de 1859 en sera-t-elle la cause ? Rien n'est moins sûr car on considère aujourd'hui qu'une tempête de cette amplitude ne se produit que deux fois par millénaire. Deux fois me direz-vous, cela signifie qu'une tempête est à venir...

## I) Phénomène physique

Les tempêtes solaires qui posent de nombreux problèmes sur notre planète doivent être comprises de manière physique, afin de pouvoir mieux appréhender les risques, et imaginer des solutions. On va donc ici s'efforcer de présenter les tempêtes connues et célèbres- en commençant bien sûr par celle qui fonde le sujet, celle de 1859 – en termes de physique.

### 1) Historique

Fin août 1859 démarre l'une des plus grandes tempêtes solaires jamais repérée par l'homme. C'est la référence en termes de puissance depuis que l'on comprend un peu ce phénomène. En fait, cette tempête a contribué à la compréhension des éruptions solaires. En effet, peu après une série importante d'aurores boréales (le 28 août), l'astronome britannique

Richard Carrington repère des tâches anormales sur la surface du soleil (voir Figure ci-dessous). Ces tâches vont provoquer l'éruption solaire, repérée par notre astronome sous la forme d'éclairs blancs qui durent moins de 10 minutes.

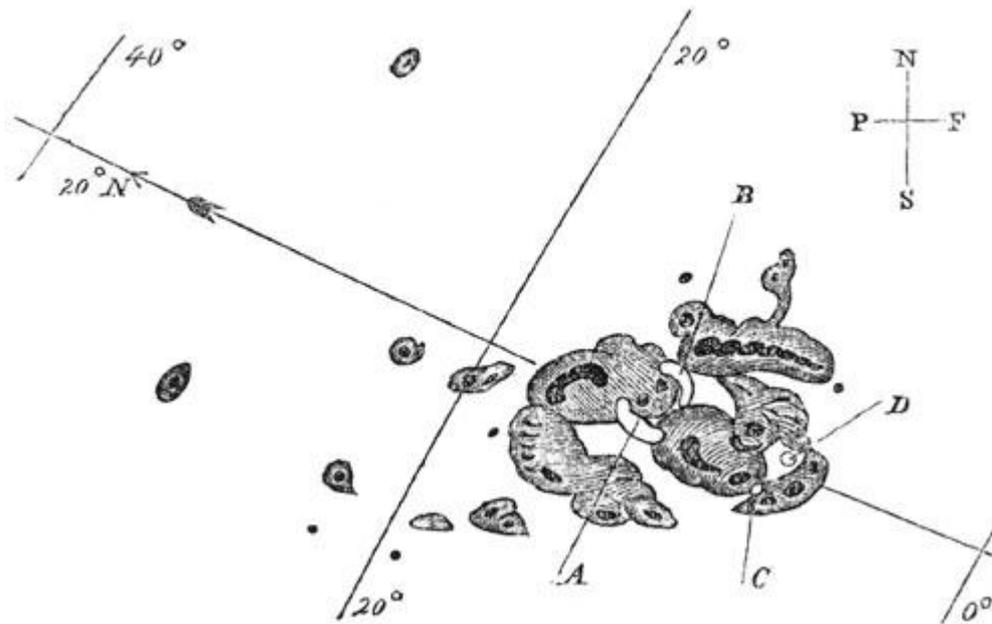


Figure 1 : Taches solaires dessinées par Carrington

Dix-sept heures plus tard, la tempête solaire atteint la terre, provoquant des aurores boréales d'une puissance jamais vue<sup>1</sup>. Le vent solaire, arrivé très rapidement sur Terre<sup>2</sup>, a des effets dévastateurs sur la magnétosphère, la comprimant environ soixante fois. L'ozone atmosphérique se détériore. Des courants électriques apparaissent dans le sol, endommageant le réseau de télégraphie (seul réseau électrique de l'époque), incendiant des stations et électrocutant des opérateurs ; et ceci sur toute l'Europe et les États-Unis. On voit donc qu'une simple éruption solaire a provoqué des dégâts considérables sur notre planète. Aujourd'hui que l'électricité s'est développée, que des satellites sont en orbite, et qu'on communique beaucoup à travers les ondes, une tempête comme celle là nous poserait de nombreux problèmes.

Mais d'autres tempêtes moins importantes sont aussi restées dans les annales par leur puissance. Celle de 1921 par exemple a été simulée<sup>3</sup>, et les conclusions de ces travaux montrent qu'une telle tempête mettrait à mal tout le système électrique de la moitié Nord des USA, provoquant un black-out en grillant les transformateurs des unités de production électriques. Cela est largement corroboré par l'éruption de 1989, qui a provoqué la chute du système de production puis l'effondrement d'une grande partie du réseau électrique d'Hydro-Québec. Plus de six millions d'habitants ont été ainsi plongés dans le noir pendant neuf heures,

<sup>1</sup> On rapporte que jusqu'au Panama on y voit très bien la nuit grâce à la lumière polaire. Toute l'Amérique du Nord a donc été sous l'influence directe de cette tempête.

<sup>2</sup> Il met habituellement environ 60 heures à venir. Mais la tempête précédente lui a créé un chemin dans l'espace.

<sup>3</sup> Par John G. Kappenman de Metatech Corporation

entraînant des millions d'euros de perte. En 2003, le WAAS<sup>4</sup>, un système qui corrige les erreurs GPS par des mesures de points au sol dont les coordonnées sont connues, a fait des erreurs de l'ordre de 50m, obligeant les avions à utiliser des systèmes de secours. En 1991, en 1997 et en 2000, des satellites ont été détruits par le passage du vent solaire suivant une éruption. D'autres exemples majeurs existent sûrement, mais on peut s'arrêter là.

La conclusion est simple. Des dégâts réguliers sont provoqués par les tempêtes solaires de faible magnitude. Des tempêtes un peu plus importantes posent déjà des problèmes sérieux. Alors une tempête de type Carrington pourrait être à l'origine d'une crise bien plus importante que celle de la finance. Etudions de plus près le phénomène physique responsable de tout ceci, afin de chercher des leviers et des défenses.

## 2) Du Soleil...

Comme annoncé précédemment, la météorologie solaire suit des cycles empiriques de 11 ans de moyenne. La façon courante de mesurer ces cycles est de repérer les apparitions de tâches solaires, qui sont des zones de champ magnétique intense, et dont le nombre varie durant sur cette durée. On observe donc un maximum d'activité, puis un demi-cycle plus tard, un minimum. Mesurés de cette façon depuis le milieu du 18ème siècle, on observe une période allant de 9.0 à 13,5 années.

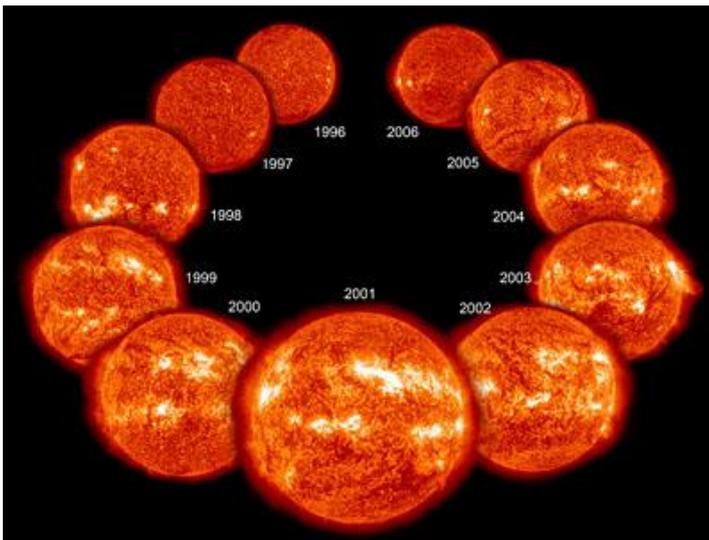


Figure 2 : cycle solaire

Il faut noter que cette mesure ne permet pas de savoir si l'on a atteint l'un des maximums du cycle solaire. Distribué de façon aléatoire, et d'intensités différentes, on ne peut pas savoir a priori si l'on se trouve au maximum de l'intensité des tâches solaires, ou si l'on est encore dans une phase croissant. Cette difficulté de placement en fait l'un des phénomènes astronomiques cycliques les moins prévisibles. On prévoit le prochain maximum d'activité pour 2012 ou 2013.<sup>5</sup>

La figure 2 est un composite de plusieurs images prises par le télescope d'imagerie ultraviolette extrême (EIT) à bord du satellite SoHO, à une longueur d'onde de 30.4 nanomètres. Ce qui est observé est un plasma à une température d'environ 60 000 à 80 000

<sup>4</sup> Wide Area Augmentation System

<sup>5</sup> D'après The Solar and Heliospheric Observatory (SoHO)

Kelvin. Les images ont été prises sur l'ensemble d'un cycle solaire et illustrent les différences d'activités à sa surface.<sup>6</sup>

Les tâches solaires sont l'observation de tempêtes solaires, qui, similairement à leur homologues de Terre, sont des fortes agitations de gaz à la surface du soleil dues à des variations magnétiques proches (quelques milliers de km). Cette appellation rassemble les

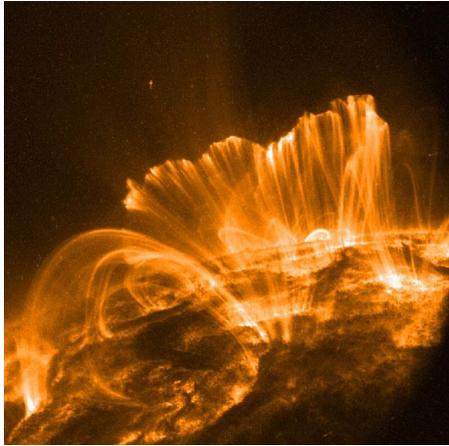


Figure 3 : tempête solaire et boucles coronales

éruptions et les éjection de masse coronale, qui sont des jaillissement de gaz ionisés, électriquement chargés, formés de particules énergétiques et de rayon X. Ces tempêtes provoquent donc un flux de particules chargés, s'ajoutant au vent solaire permanent.

Contrairement à la lumière, le temps de parcours jusqu'à l'arrivée aux environs de la terre est beaucoup plus long, estimé à une cinquantaine d'heure.<sup>7</sup> Leur trajectoire est le plus souvent la somme d'une trajectoire circulaire, et d'une vitesse constante de 450 000 m / s.

Pour la beauté de l'image, nous ne résistons pas à montrer sur la Figure 3 les observations satellites de ces éruptions solaires. Il s'agit d'une image en fausses couleurs de boucles coronal prise avec le NASA's Transition Region and Coronal Explorer satellite le 9 Novembre 2000.

### 3) ...à la Terre

L'énorme orage magnétique, arrivé depuis le soleil, arrive donc à proximité de la terre. Lorsque le vent solaire est calme, la magnétosphère terrestre est peu déformée comme montré sur la figure 4.

On voit la perturbation des lignes de champs de la Terre, comparable à celle d'un aimant, par le vent solaire à peu près constant. L'ensemble des particules énergétique est dévié par la magnétosphère vers la magnétopause (magnetosheath sur le schéma). Une faible partie arrive sur terre, soit en traversant malgré tout les ceintures de Van Allen, soit en arrivant par les "Polar Cusp", point de rebroussement des lignes magnétiques polaires, créant alors les fameuses aurores boréales.

---

<sup>6</sup> Les images de longueur d'onde différente montrent des images à peu près similaires. Elles sont disponibles dans le Solar Cycle 24 Prediction Panel, April 25, 2007

<sup>7</sup> D'après MSFC Space Plasma Physics, NASA

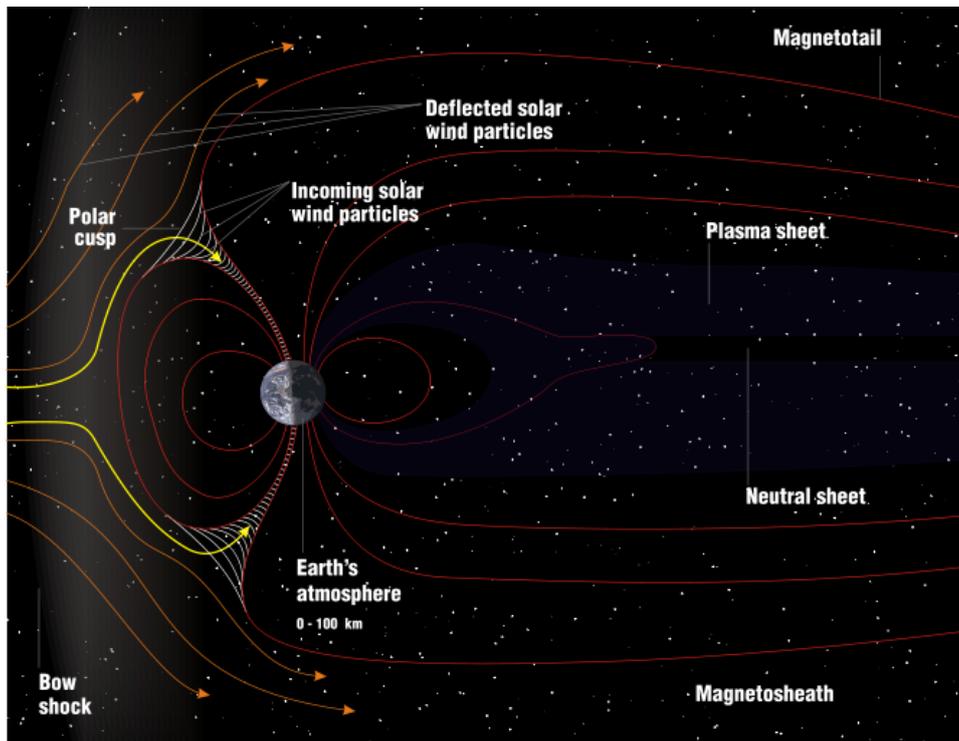


Figure 4 : Champ magnétique Terrestre

L'arrivée de la vague électro magnétique formée par le vent solaire va bouleverser l'ensemble des champs magnétique de la terre. Dans les cas qui nous intéressent, le champ formé par les gaz solaires expulsés a en effet des lignes extérieures allant du nord vers le sud, l'inverse de celui de la Terre. La masse étant trop importante pour être déviée, on va donc avoir le rapprochement de deux lignes de champs magnétique orientées en sens opposés, et il en résulte un phénomène de reconnexion magnétique.

D'un point de vue électromagnétique, ce recouvrement a un effet similaire à ce que serait une situation identique en mécanique des fluides : l'apparition de tourbillons et autres perturbations magnétiques dans la ionosphère, partie chargée de l'atmosphère. Ces perturbations créent des courants magnétiques qui vont, par induction, se transmettre dans le sol de la Terre, avec une intensité pouvant aller jusqu'à 20 V/km.

L'ionosphère, en temps normal, emmagasine les particules solaires et les évacue progressivement. L'excès apporté par la tempête solaire va empêcher l'évacuation normale et donc entrainer une projection des particules chargés, protons et électrons, dans la haute atmosphère<sup>8</sup>. C'est avec ce phénomène que la couche d'ozone se dégrade, et forme un excédant de nitrates, entraînant une pluie de neutrons.

Enfin, un phénomène notable est celui du réchauffement de l'atmosphère, du fait des rayons X et autres rayonnements énergétiques. La dilatation engendrée serait alors plus que conséquente, de l'ordre de plusieurs dizaine de pourcent, bien que ces estimations ne puissent pas être vérifiées.

<sup>8</sup> La libération des protons et électrons très excités sont la cause d'apparitions d'aurores polaires rouges, correspondant aux raies d'émissions de l'oxygène.

## II) Dangers pour les infrastructures humaines

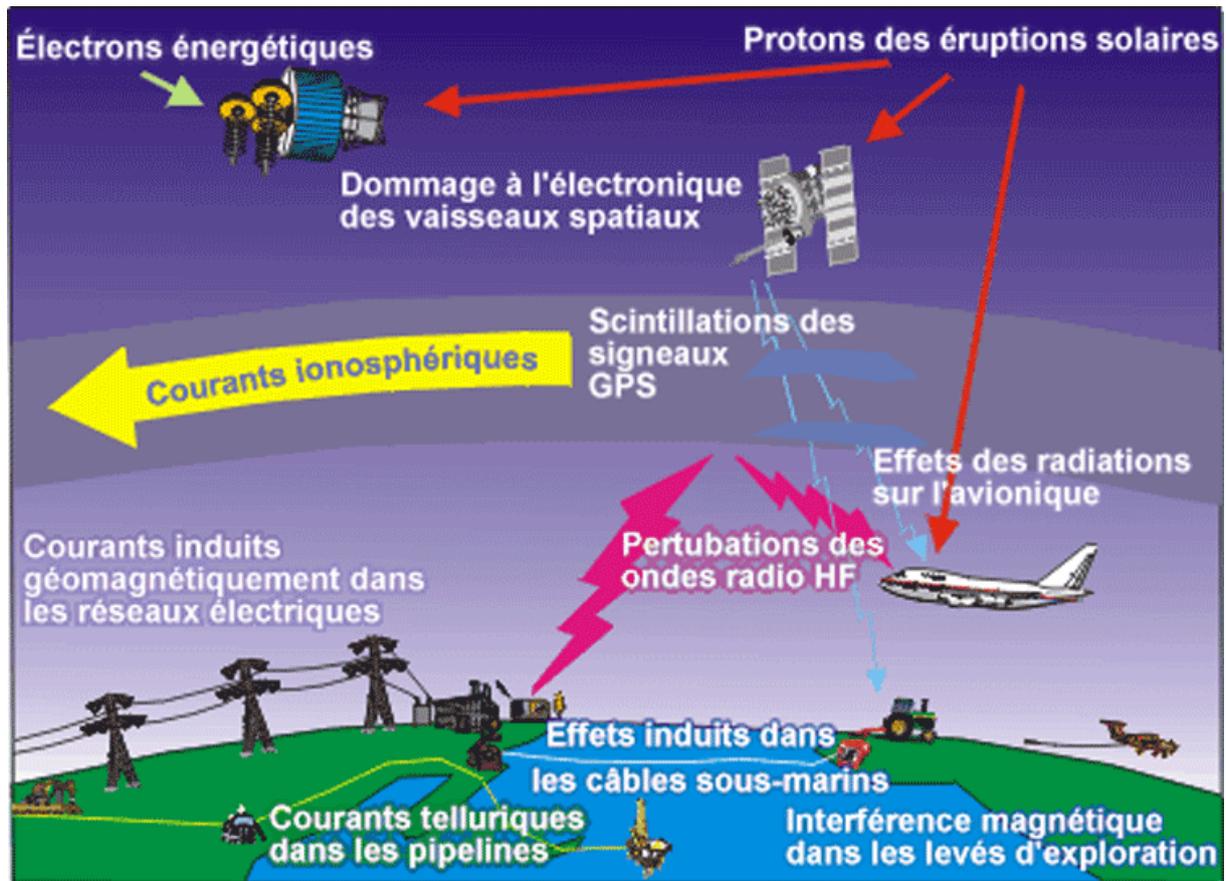


Figure 5 : Dangers pour les infrastructures

Tous les phénomènes physiques décrits ci-avant ont une influence sur la planète, mais aussi, et c'est au final ce qui nous intéresse, sur nous les hommes. Il est difficile de les quantifier, car peu de mesures sont aujourd'hui disponibles<sup>9</sup>, on va donc les décrire et essayer d'évaluer leur coût. Dans toutes cette description, il faut bien garder en tête que les effets connus et expliqués sont ceux induits par une tempête de taille moindre que celle de 1859. Il faudra donc extrapoler pour évaluer les dégâts, bien plus importants, de l'effet Carrington.

### 1) Effets sur la haute atmosphère

Les vents solaires qui traversent la haute atmosphère, avant de se rapprocher de la surface de la Terre, peuvent déjà provoquer des dégâts considérables. En effet, la présence de satellites sur la trajectoire des vents va poser problème.

<sup>9</sup> Principalement car en fait, on mesure difficilement la puissance des tempêtes solaires. Celle-ci, on l'a vu, dépend directement du vent solaire qui pénètre dans notre magnétosphère, mais on ne sait pas encore mesurer la densité de ce vent correctement

Première difficulté, le passage de nombreuses particules de hautes énergies. Les satellites y sont cependant habitués<sup>10</sup> et leur technologie a évolué pour prendre en compte ce danger. Les panneaux solaires, particulièrement sensibles à ce type de particule (perte de 2% de la production par an), sont maintenant recouvert d'arséniure de gallium et de germanium à la place de la silice, pour augmenter rendement et légèreté, et donc par là même la durée de vie du satellite. Mais ces particules ne s'attaquent pas uniquement aux panneaux solaires en cas de tempête. Elles peuvent au passage interférer avec les circuits électriques internes, et altérer les données internes traitées par les logiciels de contrôle. La trajectoire peut donc s'en retrouver modifiée, sans contrôle de la part du propriétaire. Enfin, les particules attaquent directement le satellite d'une dernière façon. Les électrons, s'ils sont en nombre, vont s'accumuler sur la paroi satellitaire, provoquant des décharges électriques qui endommagent les circuits électriques.

Mais ce n'est pas tout, car indirectement, l'influence de ces jets de particules à haute énergie va peser sur l'avenir des satellites. La dilatation de l'atmosphère, expliquée précédemment, va augmenter considérablement la force de traînée des satellites en basse altitude<sup>11</sup>, provoquant une perte de puissance, voire une perte de contrôle. Or il faut absolument éviter que ces satellites pénètrent dans l'atmosphère terrestre, car alors ils brûlent et se désagrègent. Une tempête de puissance Carrington pourrait engendrer la destruction de tous les satellites de basse altitude à moyen terme. On sait que 23 satellites commerciaux ont été déployés en 2008 à destination d'une orbite basse. Le coût d'un tel satellite s'échelonnant entre 10 et 100 millions d'euros, on peut parler d'un coût total de l'ordre d'un milliard d'euros juste par rapport aux satellites commerciaux neufs ! Sachant que la durée de vie des satellites approche aujourd'hui une moyenne de 17 ans, on peut voir à quel point le paysage satellitaire détruit par une telle éruption solaire nous coûterait.

Au niveau du coût total, des études diverses ont été menées pour évaluer le prix d'une tempête solaire. L'ordre de grandeur évoqué est toujours du niveau de la dizaine de milliards d'euros. Une étude détaillée<sup>12</sup>, qui a développé 1000 simulations sur diverses tempêtes nous propose une fourchette entre 15 et 50 milliards d'euros, selon que les propriétaires des satellites peuvent encore communiquer avec les satellites et les diriger, ou que toutes les communications sont troublées par les vents solaires. Mais ce chiffre, déjà impressionnant, ne prend absolument pas en compte les pertes, difficilement estimable mais énorme, collatérales des clients des satellites. On voit donc que ces tempêtes, déjà sur ce domaine des satellites, peuvent avoir une influence considérable, en termes de coûts en tout cas. Les prochains lieux d'étude montreront des effets plus proches de l'homme. Pour le vent solaire classique, le coût

---

<sup>10</sup> Les vents solaires ne s'arrêtent jamais complètement.

<sup>11</sup> On considère que tout satellite plus bas que 600km sera de basse altitude. Les satellites d'observation terrestre, militaire ou non, ceux de la météorologie et ceux de communication de secours composent le spectre des satellites de basse orbite.

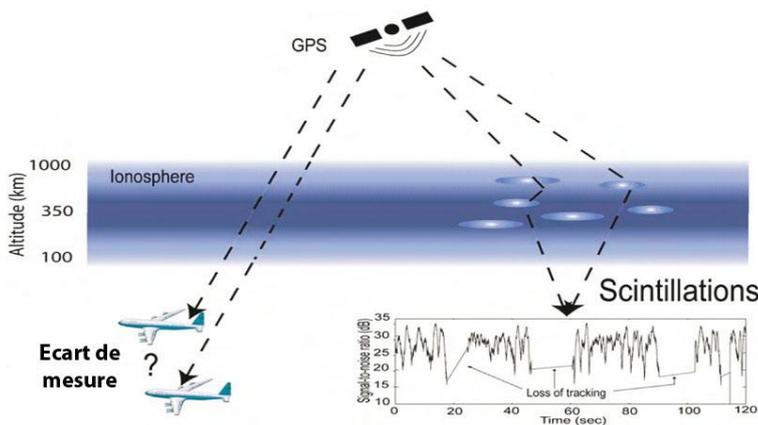
<sup>12</sup> Odenwald, S. F., and J. L. Green (2007), Forecasting the impact of an 1859-caliber superstorm on geosynchronous Earth-orbiting satellites: Transponder resources, *Space Weather*, 5, S06002, doi: 10.1029/2006SW000262.

sur les satellites public américains est évalué à 75 millions d'euros par an<sup>13</sup>, et les assureurs auraient déboursé en 10 ans plus de 1,5 milliards d'euros.

En parlant d'homme, on peut signaler une influence, plus particulière, des vents solaires en haute atmosphère. Je veux parler ici des astronautes, qui n'apprécieront certainement pas de prendre une douche de particules très chargées lors d'une tempête solaire. Des radiations importantes les atteindraient, et atteindraient même les passagers d'un avion (détails dans la partie suivante). Lawrence Townsend de l'Université du Tennessee estime la dose apportée par une tempête géante en basse altitude à 20 rads. Cela correspond en ordre de grandeur à la limite fixée par la NASA pour une durée de 30 jours en exposition cumulée. Mais cela reste une dose supérieure à la dose reçue durant une vie sur terre ! Un astronaute ne serait donc que partiellement protégé durant une tempête de l'ordre de celle de 1859.

## 2) Effets sur la magnétosphère terrestre

Comme on a vu précédemment, les conséquences des puissants vents solaires perturbent fortement toute l'atmosphère et la magnétosphère. Une des conséquences directes concerne la propagation des ondes électromagnétiques, sur un spectre de fréquence assez large pour que l'on puisse considérer que toutes les communications utilisant la propagation dans l'atmosphère ou à travers l'atmosphère, sur une longue distance, seront soit difficilement exploitables du fait d'apparitions importantes d'erreurs de signal, soit complètement inutilisables, pour les hautes fréquences.



Le risque physique est le plus fort pour les activités utilisant ces ondes comme élément crucial de sécurité matérielle, à commencer par l'aéronautique. L'apparition d'un nombre significatif d'erreurs dans le système de guidage par GPS, ainsi que l'impossibilité de communiquer pour l'appareil, mettent les conditions de sécurité à rude épreuve. Ces risques sont d'autant

plus élevé que le trafic aérien est connu pour sa gestion délicate et sa saturation quasi-permanente, des faits de la pression économique du secteur. Les lignes aériennes sont assignées, au mieux, 2 à 3 jours avant le départ, et au pire, 1 jour à l'avance<sup>14</sup>. Une tempête de plusieurs jours, comme ce fut le cas en 1859, peut donc paralyser l'ensemble du trafic aérien mondial pour presque une semaine. Du fait des lignes de fuites magnétiques, ce risque est accru pour les lignes aériennes passant à proximité du pôle nord, par exemple Chicago - Hong-Kong ; le pôle Sud n'est pas concerné. Dans ces régions, il n'y a pas de couverture satellite

<sup>13</sup> Par le ministère de la Défense des Etats-Unis

<sup>14</sup> D'après Michael Stills, International Operations Flight Dispatch, United Airlines

classique, assuré habituellement par les satellites géostationnaires, et la communication passe alors par des ondes hautes fréquence, qui serait en blackout total.

Plus largement, un grand nombre d'activités nécessitent une géo localisation satellite précise, qui ne peut plus être assuré en cas de tempête. On recense ainsi<sup>15</sup> les compagnies de pétrole et de gaz pour l'activité et la construction offshore, les différentes activités de surveillance des phénomènes géophysiques et des câbles sous-marins par exemples, l'altimétrie...

Le fait de ne pas pouvoir utiliser les transmissions par onde magnétique a une conséquence beaucoup plus large d'un point de vue industriel et économique. L'inaccessibilité aux GPS et autres satellites, suivit d'une possible dégradation et d'une attente de remplacement, entrainerait nécessairement une mise à mal l'ensemble du secteur des activités de télécommunications et de météorologie. Ce secteur, dont la recette mondiale annuelle est estimée à 400 milliard d'euros, verrait l'ensemble de ses produits hors d'usage et ses services indisponibles pour une durée de plusieurs jours. On peut également prévoir la possibilité d'un effet cascade pour ce qui est de l'ensemble des équipements de télécommunication.

Ce coup porté au secteur des télécommunications est d'autant plus dur qu'il s'agit d'un secteur pour lequel l'investissement et l'équipement est primordial. Pour un réseau de télécommunication français classique, les marges effectuées sont utilisées à près de 70% dans l'entretien et l'expansion du réseau. La vulnérabilité de ces entreprises laisse à penser qu'une crise de cette envergure entrainerait pour elles l'équivalent de la crise financière pour les banques.

En dehors des perturbations magnétiques et des considérations des ondes, il faut également considérer l'effet des particules énergétiques projetées dans l'atmosphère. Les principaux concernés sont, bien entendus, les voyageurs de hautes altitude, passager et personnel. Sur une tempête solaire d'intensité habituelle, la dose de radiation reçue par les passagers d'un appareil aérien serait l'équivalent de celle reçue lors d'un scanner, ce qui reste à peu près acceptable. Le problème est plus délicat pour ce qui est de l'exposition des pilotes et du personnel de bords, dont l'exposition prolongée peut être néfaste. Cette argument est à nuancer si l'on considère un arrêt du trafic aérien en cas de tempête, d'autant plus que les compagnies aériennes prennent déjà, en temps normal en considération l'exposition des pilotes.

### **3) Création d'un courant électrique**

Comme on l'a déjà expliqué, lorsque le vent solaire traverse en partie la magnétosphère, les particules sont séparées à cause de leur charge et une différence de potentiel apparait donc. Ce courant va se propager de deux façons. Dans le sol d'abord – et la mise à la terre, supposée neutre, va changer du tout au tout – et dans les conducteurs, tels les

---

<sup>15</sup> Lee Ott, OmniSTAR, Inc., "Meeting the Challenges of Nature: The Impact of Space Weather on Positioning Services".

voies ferrées, les lignes électriques, les lignes télégraphiques et les pipelines. Ce courant va être dévastateur pour les installations humaines, et on va maintenant détailler les différents dangers impliqués par ce surplus de tension.

Le courant électrique qui passe dans le sol peut avoir des conséquences surprenantes. La corrosion des pipelines en est une. Pour leur protection, on recouvre les pipelines d'acier d'un revêtement isolant, avec un redresseur anticorrosion, qui fait passer un courant de protection dans le métal. Or la tension supplémentaire générée par la tempête fait sortir le régime protecteur de la gamme anticorrosion. Or sur une tempête intense, comme celle de 1859 par exemple, la corrosion va être extrêmement forte pendant quelques jours, endommageant durablement les pipelines par de la rouille. De plus, cet effet se cumule sur plusieurs tempêtes. Comme les pics d'activités du soleil sont durables. Plusieurs tempêtes arrivent avant et après les pics d'éruption responsables de celle de Carrington par exemple. Par conséquent, le pipeline peut en un mois se trouver extrêmement fragilisé. La durée de vie des pipelines s'en trouve donc grandement réduite.

Mais ce qui est encore plus grave et plus dangereux pour l'homme, ce sont les conséquences de ce courant dans le réseau électrique. On l'a vu en 1859, le réseau télégraphique a souffert, les stations s'enflammant par endroit. Aujourd'hui que le monde entier est relié en réseau, par un système totalement interdépendant, le danger est grand. En effet, les transformateurs, et toutes les grandes installations électriques, sont par nature reliés à la terre, de courant neutre. Or cette tempête amène un courant induit important, qui peut saturer les transformateurs, amenant leur destruction ou leur séparation du réseau. A court terme, l'effet est le même : l'effondrement du réseau. A long terme, la destruction des transformateurs rendra la remise en marche du système extrêmement lente. Pour donner quelques chiffres, le courant naturel dans le sol (résultant de légers déséquilibres de potentiel) est de 20 mV/km. Une modélisation très sérieuse<sup>16</sup> de la tempête solaire de 1921 explique que des courants jusqu'à 20 V/km apparaîtront dans le sol. Une différence de potentiel 1000 fois plus importante ! Une telle tempête toucherait tous les pays industrialisés, avec une préférence pour l'Europe et l'Amérique du Nord, mettant hors service tout le réseau électrique, et touchant 130 millions de personnes. Le schéma suivant montre le pourcentage de transformateurs qui seraient détruits par une tempête de ce type aux USA par région, rendant donc les unités de production inutilisables même à la fin de la tempête. Sans protections supplémentaires, on mettrait aujourd'hui des semaines à relancer le réseau électrique après une tempête type 1921. Celle de Carrington serait donc dévastatrice...

---

<sup>16</sup> John Kapperman, Matech Corporation

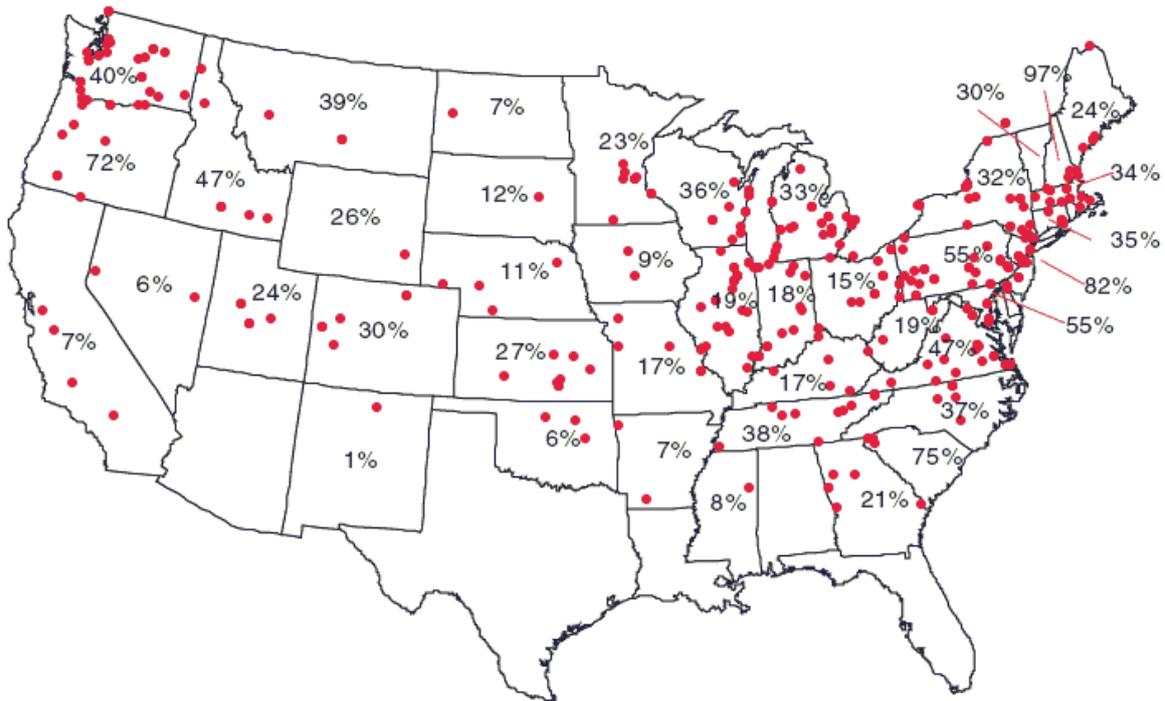


Figure 6 : Pourcentage de transformateurs détruit par une tempête de type 1921

Le seul exemple concret est celui de la tempête solaire du 13 mars 1989, qu'on va détailler un peu. La situation de Léonard Bolduc<sup>17</sup>, chercheur dans le bâtiment d'Hydro-Québec, représentant 60% du bilan énergétique du Canada<sup>18</sup>, est révélatrice. En voici un extrait :

« En moins d'une minute, sept compensateurs conçus pour protéger l'équipement de transport d'électricité ont lâché entre Chibougamau et LaVérendrye [...] une magnifique aurore boréale cramoisie qui se déployait en vastes entonnoirs »

La tempête désactive ce site de production, plongeant dans le noir plus de six millions d'utilisateurs pendant plus de neuf heures. Malgré les nombreuses méthodes de compensation des variations de tension, une augmentation brusque ne peut être gérée par le système. Elle affecte le Québec bien sûr, mais a des conséquences plus lointaines sur l'ensemble du réseau Nord-Américain, comme le montre la Figure 7 :

<sup>17</sup> Racontée par Vincent Sicotte dans « Tempêtes solaires, ça va chauffer ! »

<sup>18</sup> C'est aussi le plus grand producteur d'hydro-électricité du monde.

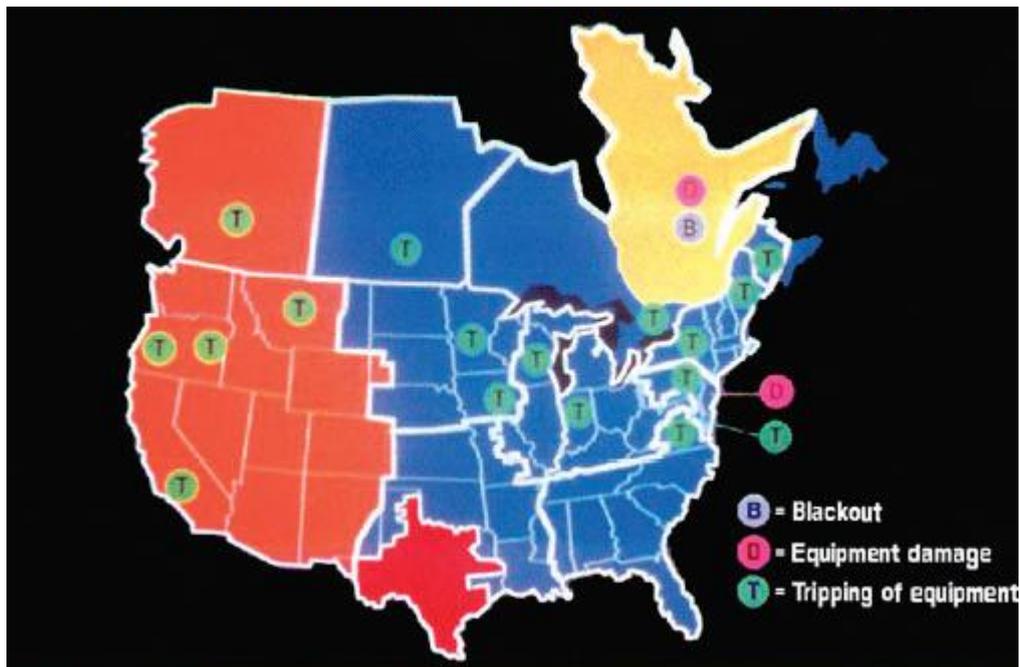


Figure 7 : Evénements du réseau électrique après la tempête de 1989

Ce site d'Hydro-Québec est aujourd'hui bien protégé contre les attaques du soleil, car il s'y habitue peu à peu. Situé sur de la pierre, le courant au Québec se jette sur les câbles électriques avec une grande intensité. Mais une tempête d'une puissance considérable comme celle de 1859 provoquerait certainement des dégâts, car ce site de production gère les problèmes en compensant un saut de tension maximal. Jusqu'à la prochaine tempête où le saut de tension sera plus important...

On l'a vu, la tempête de 1859 causerait aujourd'hui des dégâts immenses, qu'on ne peut pas vraiment chiffrer. On va cependant essayer de s'en donner une idée, en évaluant déjà les dégâts causés par les petites tempêtes, voire même par le seul vent solaire. Le cas Hydro-Québec est aujourd'hui évalué à plusieurs centaines de millions d'euros de coût. Une étude menée aux USA sur 18 mois de juin 2000 à décembre 2001 affirme que le coût global de l'électricité consommée a augmenté de 380 millions d'euros. Cela fait plus de 20 millions par mois ! Enfin, le scénario catastrophe de la tempête « sévère »<sup>19</sup> prévoit un coût – attention les yeux – de 1 à 2 billions de dollars, simplement pour la première année après la tempête. Avec une supposition de 4 à 10 ans pour retrouver le même niveau de couverture électrique !

Pour conclure, on voit bien que l'interdépendance de notre société nous rend très vulnérables à une tempête solaire à la Carrington. Du point de vue financier et matériel, les dégâts seraient énormes. Mais le pire est à venir, car on n'a ici pas pu évaluer les dégâts collatéraux de tous ces problèmes. Par exemple, les effets d'un black-out de long terme, comme le prévoit les scénarios les plus réalistes, provoqueraient la désintégration des transports, des communications, du système bancaire et financier et des services gouvernementaux. Apparaîtrait aussi un effondrement du système d'eau courante, à cause des pompes électriques, et une perte forte de nourriture et médicament périssables, due à l'arrêt

<sup>19</sup> Sévère correspond en fait à la tempête de 1921. On est encore loin de celle de Carrington...

des systèmes réfrigérants. De telles conséquences d'une durée significative affectant une région se propageraient sur le pays entier, et auraient certainement des conséquences au niveau mondial...

### **III) Mesures possibles**

Tous ces dangers pour les infrastructures humaines peuvent, et doivent, être contenus. On va maintenant présenter l'ensemble des mesures existantes, et que l'on préconise pour se protéger des méfaits des tempêtes solaires. Qu'il s'agisse de protection, de prévision, ou d'actions à mettre en place lors de la tempête, être préparé est le minimum pour survivre à une tempête de type Carrington

#### **1) Mesures de protections**

On a donc vu que les probabilités d'apparition des tempêtes sont partiellement prévisibles en tenant compte des cycles solaires. Le danger qu'elles représentent ne semble pas empêcher les technologies de la surface de la Terre de se développer en ne tenant compte que d'une moindre partie de ces risques.

Il y a plusieurs raisons pour penser que les satellites sont mieux préparés aux risques des tempêtes solaires. Tout d'abord, leur milieu reste aléatoire et peu connu, et leur construction se fait donc en fonction de ces incertitudes. Leur haut niveau technologique et les budgets en conséquence permettent de faire appel à des prévisions spécifiques et des experts qualifiés. Enfin, en comparaison avec les outils de télécommunication terrestre, on cherche pendant leur construction à maximiser leur durée de vie, leur robustesse, indépendamment des critères économiques.

On peut penser que les constructeurs de satellites sont conscients des risques encourus, et nous ne citerons que les idées de technologies sur lesquels ils renforcent encore la sécurité. En ce qui concerne la dégradation due aux particules, on peut remarquer l'évolution des panneaux solaires dont le revêtement en arséniure de gallium ou de germanium remplace la silice, moins protectrice. Les ingénieurs cherchent également à en renforcer le bouclier, à abaisser la tension de fonctionnement pour éviter les dégâts des décharges électrostatiques. D'un point de vue logiciel embarqué, des systèmes de navigation de secours sont prévus.

En ce qui concerne les équipements terrestres, la robustesse est largement moins bonne. On peut voir, par exemple, que le blackout de 2003 aux États-Unis témoigne d'une vulnérabilité du réseau électrique en temps normal. Une liste de mesures de protections intéressante est fournie par Hydro-Québec, qui avait subi une panne d'électricité générale

répercutée sur le tiers nord-est de l'Amérique du nord pour neuf heures. Leur système de protection s'était déclenché en moins d'une minute, paralysant le site. A la suite de cet événement, voici les actions mises en œuvre par le site<sup>20</sup>:

- Recalibrage des équipements de protection et augmentation du seuil de déclenchement. Cette tactique a été efficace puisque des orages magnétiques très intenses qui se sont produits après ceux de 1989 n'ont causé aucun problème.
- Mise en place d'un système d'alerte en temps réel qui mesure les perturbations sur le réseau électrique pendant l'orage magnétique.
- Modification des procédures d'exploitation du réseau. En cas de perturbations, Hydro-Québec réduit le transit sur les lignes de transport et les interconnexions à courant continu, et arrête toutes les manœuvres importantes.
- Installation de la compensation série sur les lignes de transport d'électricité pour accroître la stabilité du réseau. Cette mesure s'est avérée fort utile pour atténuer l'impact des orages magnétiques.

Le Québec est d'autant plus concerné par ces protection qu'il est l'une des zones de production les plus proche du pôle magnétique, et que le sol très rocheux dissipe mal l'électricité. Les autres sites de production, moins concernés, sont très probablement aussi mal préparés que l'a pu l'être Hydro-Québec.

On peut aussi parler de l'intérêt des sources d'énergie renouvelable, exploitant souvent les ressources locales, qui constituent autant de site de production potentiellement dégroupés. La multiplication de ce type d'unité productive permettrait de rendre moins interdépendant notre réseau. Cependant, on voit bien que le centre d'Hydro-Québec, produisant de l'énergie propre, n'a pas mieux résisté que le ferait une centrale nucléaire...

En ce qui concerne les activités autres que la production d'énergie mais vulnérables aux effets des tempêtes solaires, elles sont trop vastes pour être étudiée précisément. Il est permis de penser que l'explosion des nouvelles technologies de l'information n'a pas permis un développement des marges de sécurité en dehors des considérations pratiques. La pression économique sur leur rentabilité, les concurrences féroces et la fréquente saturation laissent présager le pire en cas de tempête solaire.

## 2) Météorologie de l'espace

Tous les moyens de lutte qu'on a pu voir pour le moment sont des réactions « end of pipe ». Des méthodes de défense contre le phénomène quand il arrive sur nous pour le

---

<sup>20</sup> Cité depuis le site d'Hydro-Québec : <http://www.hydroquebec.com>

minimiser. Pour cela, il nous faut comprendre et prévoir le phénomène. Une évacuation avant un ouragan suit la même logique. Et cet exemple n'est pas pris au hasard, car en fait, si on utilise la météorologie pour prévoir les ouragans, on va aussi l'utiliser pour prévoir les tempêtes solaires. La seule différence est le champ d'application de cette technique, qui passe de la terre à l'espace.

Commençons donc cette étude de la météorologie de l'espace, science neuve qui s'intéresse tout particulièrement au soleil<sup>21</sup>, par une petite définition :

«La météorologie de l'espace est la discipline qui traite de l'état physique et phénoménologique des environnements spatiaux naturels. Au moyen de l'observation, la surveillance, l'analyse et la modélisation, elle vise plusieurs objectifs : d'une part, comprendre et prévoir l'état du Soleil et des environnements interplanétaire ou planétaire, ainsi que les perturbations qui les affectent, qu'elles soient d'origine solaire ou non; d'autre part, analyser en temps réel ou prévoir d'éventuels effets sur les systèmes biologiques et technologiques»<sup>22</sup>

Le problème de cette discipline, c'est sa jeunesse, qui fait que très peu de moyens sont actuellement investis, et que les infrastructures disponibles sont peu nombreuses. Certes la NASA et le National Science Foundation tentent de développer depuis 20 ans des capacités de prévisions. La NOAA<sup>23</sup> fournit des bulletins quotidiens à plus de 1000 entreprises et agences gouvernementales. Mais son budget annuel (4,5 millions d'euros) est trop faible<sup>24</sup>. En Europe, le retard est immense, et seul des projets pilotes émergent un peu. La coordination pour ce type de projet est décisive. On considère aujourd'hui que nos compétences en météorologie de l'espace sont comparables à celles en météorologie terrestre des années 50 ou 60...

En effet, au niveau technique, un satellite (SoHO) effectue seul des mesures proches du soleil. Il s'intéresse en fait aux éjections de masses coronales au départ, et prend des images des éruptions solaires. Voici par exemple une image toute récente, où l'on voit tout de même une activité importante :

---

<sup>21</sup> On le voit bien par le fait qu'on considère Carrington comme le précurseur de la météorologie solaire !

<sup>22</sup> Définition du portail européen de la météorologie de l'espace.

<sup>23</sup> Centre de prévision de la météo spatiale

<sup>24</sup> On peut par exemple le comparer aux recettes annuelles de télécommunication qui reposent sur ces alertes : 400 milliards d'euros.

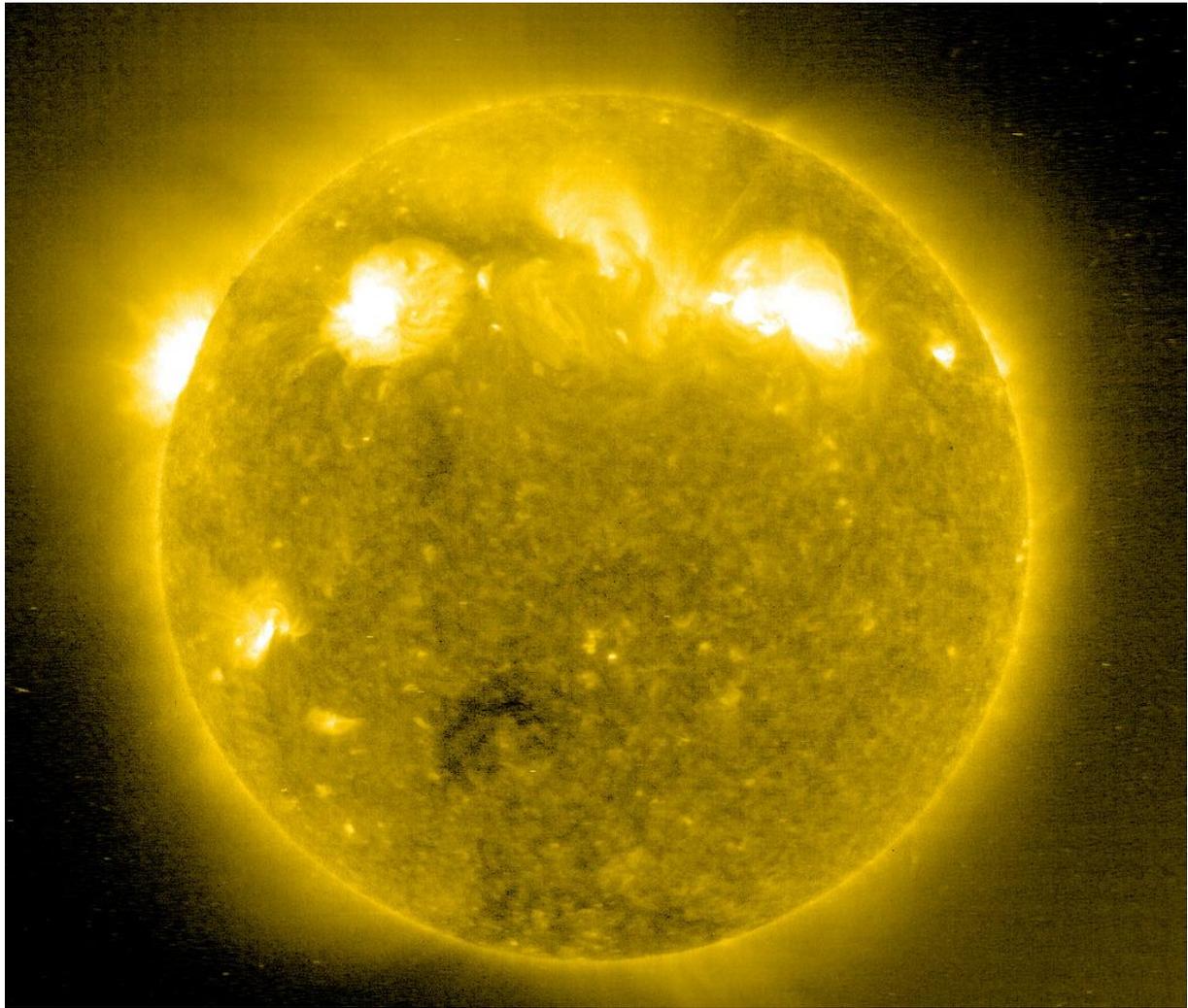


Figure 8 : Image du Soleil où l'on peut voir des éruptions correctes. 10/02/2010 13:06

Le problème, c'est qu'entre ces mesures et l'arrivée sur Terre (3 ou 4 jours habituellement, moins de 18h pour la tempête de 1859), il n'y a plus rien. Les météorologues de l'espace sont aveugles. La mesure suivante se fait une heure avant impact, et c'est seulement là qu'on s'intéresse aux facteurs suivants :

- Densité
- Vitesse
- Champ magnétique
- Température

Le but aujourd'hui, c'est de pouvoir émettre des alertes en cas de tempêtes pas seulement une heure avant, mais bien dès le départ. Donc environ 3 jours avant, pour pouvoir réagir correctement. Pour cela, il nous faudrait travailler simplement avec les informations disponibles par SoHO. Pour cela, de nombreuses techniques ont vu le jour, mais sont encore mal maîtrisées. On peut citer la coronographie<sup>25</sup> ou la magnétohydrodynamique<sup>26</sup>. Ces

---

<sup>25</sup> Qui consiste à simuler une éclipse solaire pour mieux voir certains détails.

techniques nécessitent des superordinateurs, et donc un budget conséquent. On peut cependant espérer bientôt de meilleurs résultats, avec la mise en place d'intelligence artificielle et de modélisation numérique, couplées avec de la reconnaissance de forme permettant d'extrapoler à partir de la taille et de la forme d'une tache solaire, afin d'obtenir la puissance finale du vent solaire. L'exploitation des signes précurseurs semble être l'avenir de la discipline.

En conclusion, on voit que la météorologie de l'espace, même si elle coûte très cher, est indispensable pour résister un peu aux tempêtes solaires un peu puissantes. Savoir une heure avant qu'une éruption de type Carrington va nous arriver dessus ne serait pas très utile... Pour assener le coup final de la défense de la primordialité de cette météo, voici un tableau de quelques clients américains regroupés par secteur qui sont directement concernés par la météorologie spatiale. On notera les propositions d'actions de défense, et les coûts engendrés, considérables. Cela vaut peut être le coup de mettre un peu plus d'argent dans notre discipline non ?

Impact Area	Customer (examples)	Action (examples)	Cost (examples)
<b>Spacecraft</b> (Individual systems to complete spacecraft failure; communications and radiation effects)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lockheed Martin</li> <li>• Orbital</li> <li>• Boeing</li> <li>• Space Systems Loral</li> <li>• NASA, DoD</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Postpone launch</li> <li>• In orbit - Reboot systems</li> <li>• Turn off/safe instruments and/or spacecraft</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Loss of spacecraft ~\$500M</li> <li>• Commercial loss exceeds \$1B</li> <li>• Worst case storm - \$100B</li> </ul>
<b>Electric Power</b> (Equipment damage to electrical grid failure and blackout conditions)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• U.S. Nuclear Regulatory Commission</li> <li>• N. America Electric Reliability Corp.</li> <li>• Allegheny Power</li> <li>• New York Power Authority</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Adjust/reduce system load</li> <li>• Disconnect components</li> <li>• Postpone maintenance</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estimated loss ~\$400M from unexpected geomagnetic storms</li> <li>• \$3-6B loss in GDP (blackout)</li> </ul>
<b>Airlines (Communications)</b> (Loss of flight HF radio communications) (Radiation dose to crew and passengers)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• United Airlines</li> <li>• Lufthansa</li> <li>• Continental Airlines</li> <li>• Korean Airlines</li> <li>• NavCanada (Air Traffic Control)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Divert polar flights</li> <li>• Change flight plans</li> <li>• Change altitude</li> <li>• Select alternate communications</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cost ~ \$100k per diverted flight</li> <li>• \$10-50k for re-routes</li> <li>• Health risks</li> </ul>
<b>Surveying and Navigation</b> (Use of magnetic field or GPS could be impacted)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• FAA-WAAS</li> <li>• Dept. of Transportation</li> <li>• BP Alaska and Schlumberger</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Postpone activities</li> <li>• Redo survey</li> <li>• Use backup systems</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• From \$50k to \$1M daily for single company</li> </ul>

Figure 9 : La météo spatiale et ce qu'elle peut faire

### 3) Scénario et plan d'action

Si l'on considère les effets d'une tempête similaire à celle de Carrington, prédits par l'étude qui vient d'être réalisée, les conséquences sont grandes sur les comportements à adopter, aussi bien par les astronautes, les quelques personnes responsables de l'activité énergétique, que par la population touchée.

Pour ce qui est de l'activité spatiale, le retour à une navigation manuelle ainsi que l'arrêt des sorties des astronautes est nécessaire. Le pilotage des satellites devrait également passer par le manuel ou la navigation de secours, en tenant compte de la possible

<sup>26</sup> décrit le comportement d'un fluide conducteur du courant électrique (liquide ou gaz ionisé appelé plasma) en présence de champs électromagnétiques

augmentation de la force de trainée. Bien entendu, ces mesures sont plus faciles à mettre en œuvre étant donné l'habitude des événements aléatoires et le peu de personnes concernées.

Le trafic aérien devrait également prendre des mesures d'urgence, en commençant, encore une fois, par le passage à une navigation de secours. La majeure partie de la flotte aérienne devrait rester au sol, ce qui est d'une part nécessaire pour les raisons de sécurité, mais également forcé par l'indisponibilité des services de navigation. Le détournement des vols passant par la zone polaire a déjà été mis en place lors de précédentes tempêtes.

Le domaine de l'énergie devrait pouvoir comparer la situation à celle d'un effet cascade "habituel". Dans l'objectif de conserver les transformateurs opérationnels, il serait nécessaire de réduire voire d'interrompre la distribution (et donc la production) d'énergie en avance, afin de conserver des marges de tensions suffisantes. Mieux, si la gestion globale peut être efficace et rapide, une production différenciée de la décharge produite par la tempête pourrait amortir les effets. Cette idée reste tout de même hasardeuse, étant donnée la complexité des réseaux électriques et la diversité des acteurs, publics ou privés. On voit alors l'intérêt des sources d'énergie renouvelables locales, pouvant palier ces différences de tension avec une action plus précise, et même en cas de chute de réseau, pouvant être rétablies plus rapidement.

Enfin, du point de vue humain, les gouvernements doivent préparer des plans d'action concrets, comme existent des plans d'action en cas d'attaques nucléaires. Le site du Ministère des ressources naturelles du Canada propose un lien vers un site d'information et de prévention<sup>27</sup> à destination des particuliers pour permettre une réaction efficace et coordonnée en cas de tempêtes. Car ce qu'on peut dire en conclusion, c'est que si les conséquences matérielles d'une tempête sont envisagées, et qu'on a aujourd'hui des mesures de protection, on ne réfléchit pas du tout aux conséquences humaines d'un black-out généralisé sur un pays pendant deux jours, avec impossibilité de communication radio ou télévisuelle... Alors au-delà de ces mesures présentées ici, une véritable réflexion au niveau international doit être menée.

## Conclusion

Si une tempête comme celle de 1859 survenait, elle engendrerait une catastrophe naturelle sans précédent. Lutter et essayer de minimiser les dégâts est possible, des solutions existent comme on l'a montré, mais il faut y engager beaucoup d'argent et de coopération. Le risque d'un tel cataclysme se modélise par le produit de la menace par la probabilité d'une telle menace. Or l'homme a tendance à oublier les risques générés par quelque chose de très

---

<sup>27</sup> Votre famille est-elle prête ?

peu probable, mais de très dangereux ; une tempête de Carrington entrant clairement dans cette catégorie.

Cette tempête est la plus puissante depuis au moins 500 ans<sup>28</sup>, et elle fut deux fois plus importante que sa dauphine. On estime la probabilité de ce genre de tempête à deux fois par millénaire. Mais cette mesure est peu fiable. Un expert résume le problème de la limite de nos connaissances :

« La question qui m'est souvent posée est de savoir si une pareille tempête magnétique est susceptible de se reproduire un jour, et quand. Je réponds alors que c'est fort possible, et qu'elle pourrait même être encore plus violente que celle de 1859. Mais pour ce qui est de la date à laquelle elle se produira, nous n'en savons tout simplement rien ! »

Alors aujourd'hui, nous ne sommes pas prêts pour le retour d'une telle tempête. Et même si l'interprétation du calendrier maya est ridicule pour un scientifique, une tempête de type Carrington en 2012 aurait des conséquences dramatiques, au-delà de ce qu'on ose imaginer. Il ne reste plus qu'à espérer que cette tempête attendra que nos systèmes de mesure et de défense soient un peu plus performants...

---

<sup>28</sup> On peut le savoir grâce au nitrate produit lors d'une tempête, en quantité proportionnelle à sa puissance, et qui vient se figer dans les glaces près du pôle Nord. Des carottages permettent donc une telle affirmation.

# Bibliographie

## **Severe Space Weather Events--Understanding Societal and Economic Impacts**

*Workshop Report*, May 2008

<http://www.nap.edu/catalog/12507.html>

## **En attendant la tempête solaire du millénaire** – Sten Odenwald et James Green

*Pour la Science* n°374, Décembre 2008

<http://fr.wikipedia.org>

Informations sur l'éruption solaire de 1859 et la météorologie de l'espace

## **Les aurores boréales**, Pierre Lacombe

*Centre de développement pédagogique du planétarium de Montréal*, 2005

[http://www2.cslaval.qc.ca/cdp/UserFiles/File/telechargement/aurores\\_boreales.pdf](http://www2.cslaval.qc.ca/cdp/UserFiles/File/telechargement/aurores_boreales.pdf)

## **Météo spatiale: risque naturel de l'ère technologique**

*Ministère des ressources naturelles du Canada*, Février 2009

[http://atlas.nrcan.gc.ca/site/francais/maps/environment/naturalhazards/space\\_weather/1/#tphp](http://atlas.nrcan.gc.ca/site/francais/maps/environment/naturalhazards/space_weather/1/#tphp)

## **Le Québec a subi en mars 1989 une panne générale d'électricité causée par une tempête solaire**

*Site d'Hydro-Québec*

<http://www.hydroquebec.com/comprendre/notions-de-base/tempete-mars-1989.html>

## **Space Plasma Physics Group**

*Détachement de la NASA à l'étude des plasmas*

<http://xd12srv1.nsstc.nasa.gov/ssl/PAD/sppb/default.htm>

## **Carrington Flare**

*Article de la NASA sur la tempête solaire de Carrington*, Juin 2008

[http://science.nasa.gov/headlines/y2008/06may\\_carringtonflare.htm?list65200](http://science.nasa.gov/headlines/y2008/06may_carringtonflare.htm?list65200)