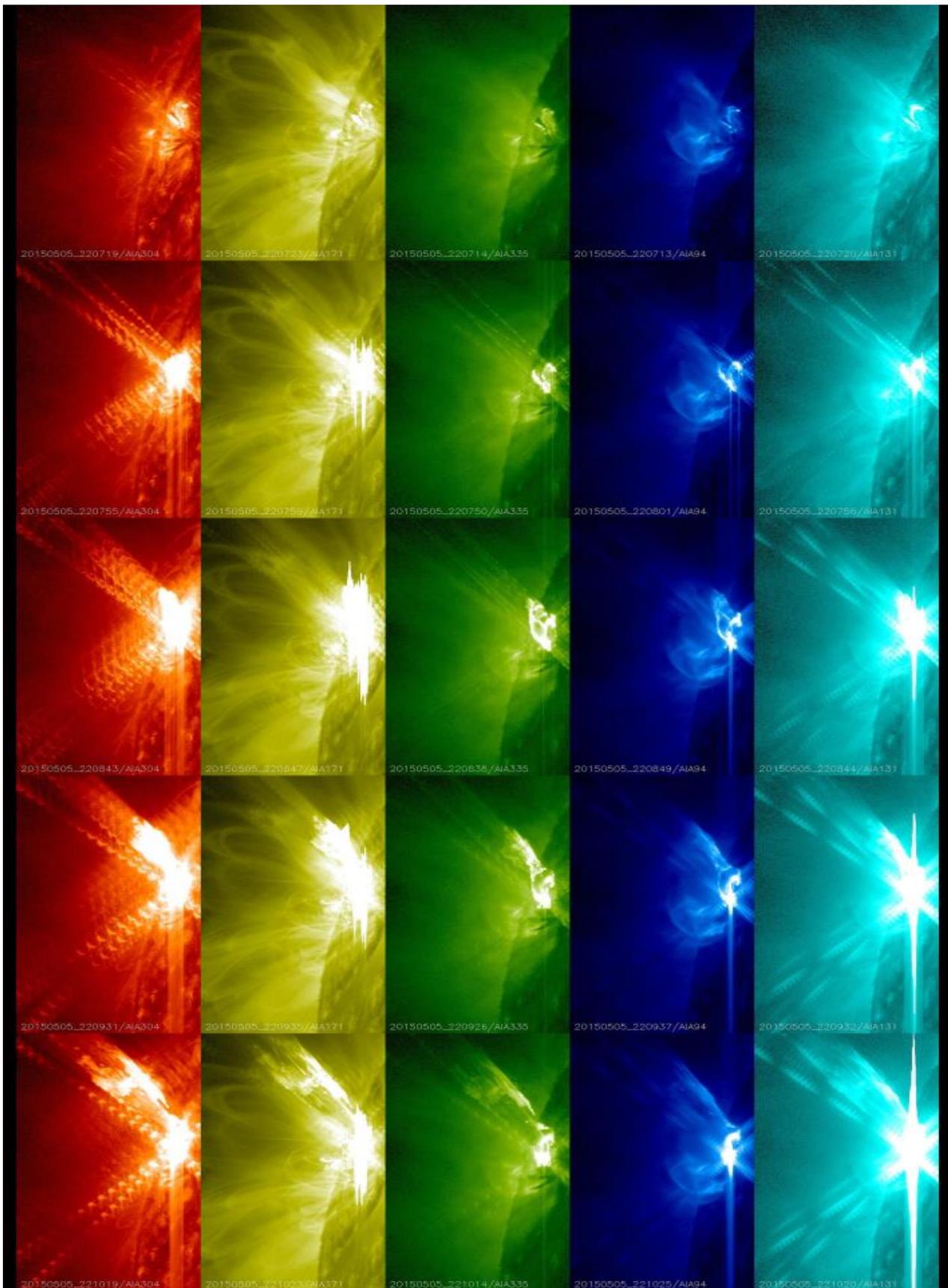


Chapitre 3 : l'activité solaire

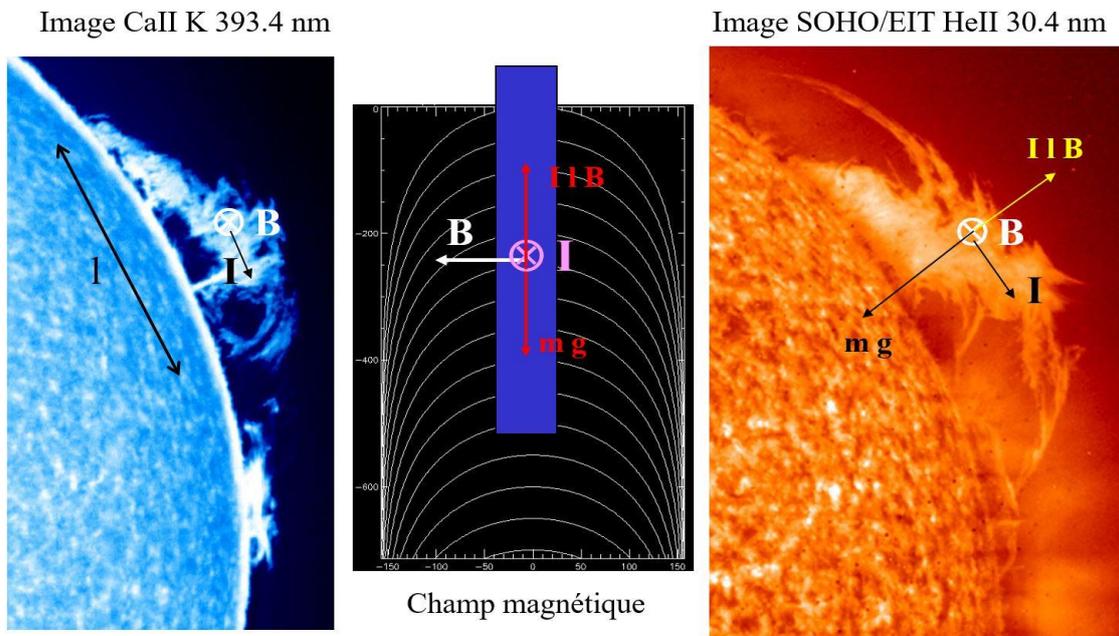


Eruption du 5 Mai 2015 vue en UV (températures de 0.1, 0.6, 1, 2.5 et 10 millions de degrés) par le satellite SDO/NASA au bord solaire. Ce phénomène rapide (3 minutes de haut en bas) et intense sature les détecteurs. La largeur du champ est de 145 000 km (11 fois la Terre).

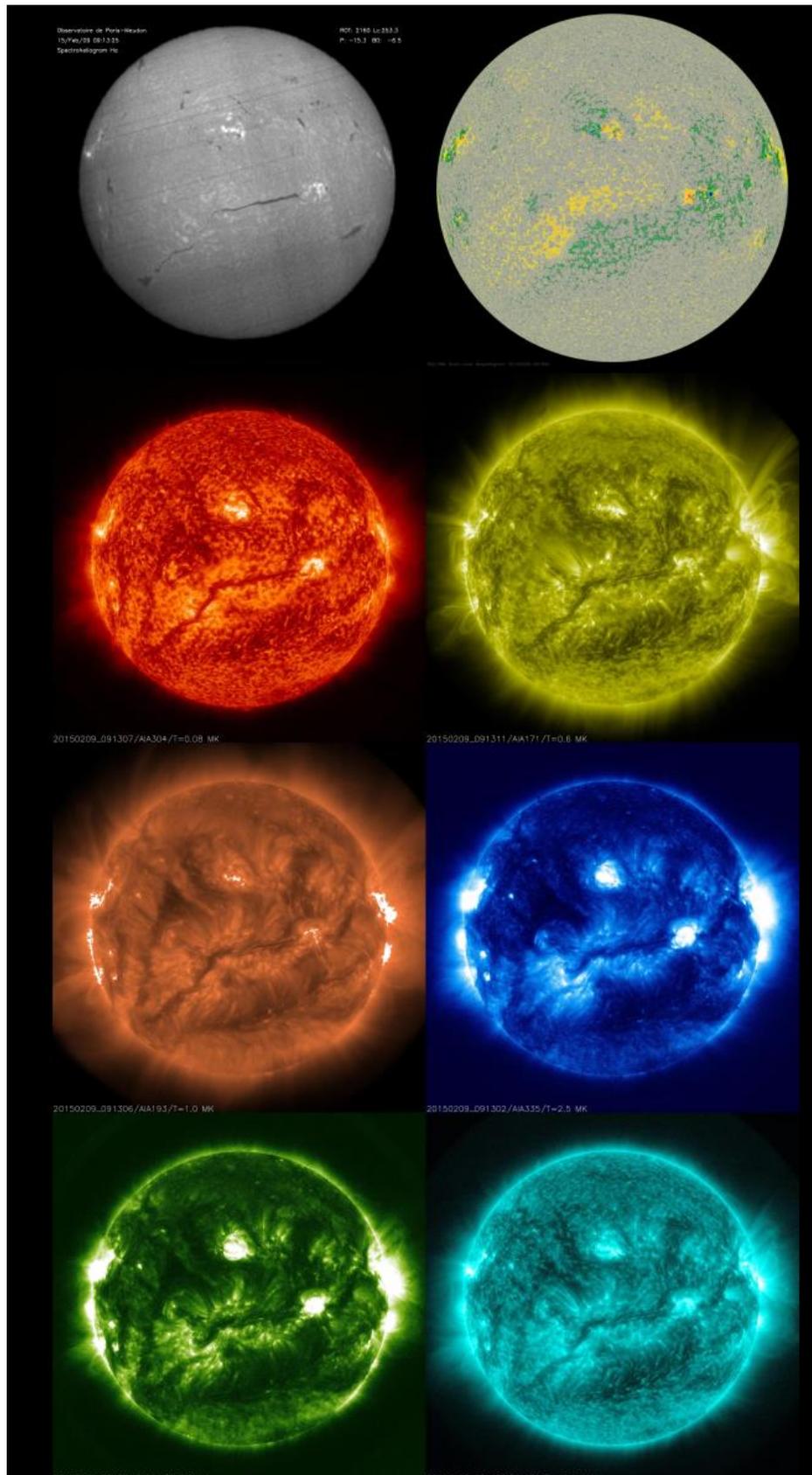
L'activité solaire, qui est la conséquence d'instabilités magnétiques, se manifeste par des phénomènes variés et rapides. Les éruptions sont des événements violents qui convertissent l'énergie magnétique. Des éjections de masse coronale leur sont souvent associées, impliquant parfois des filaments ou protubérances ; elles peuvent atteindre et perturber l'environnement terrestre, voire certaines activités humaines.

1 - Activité des filaments et protubérances

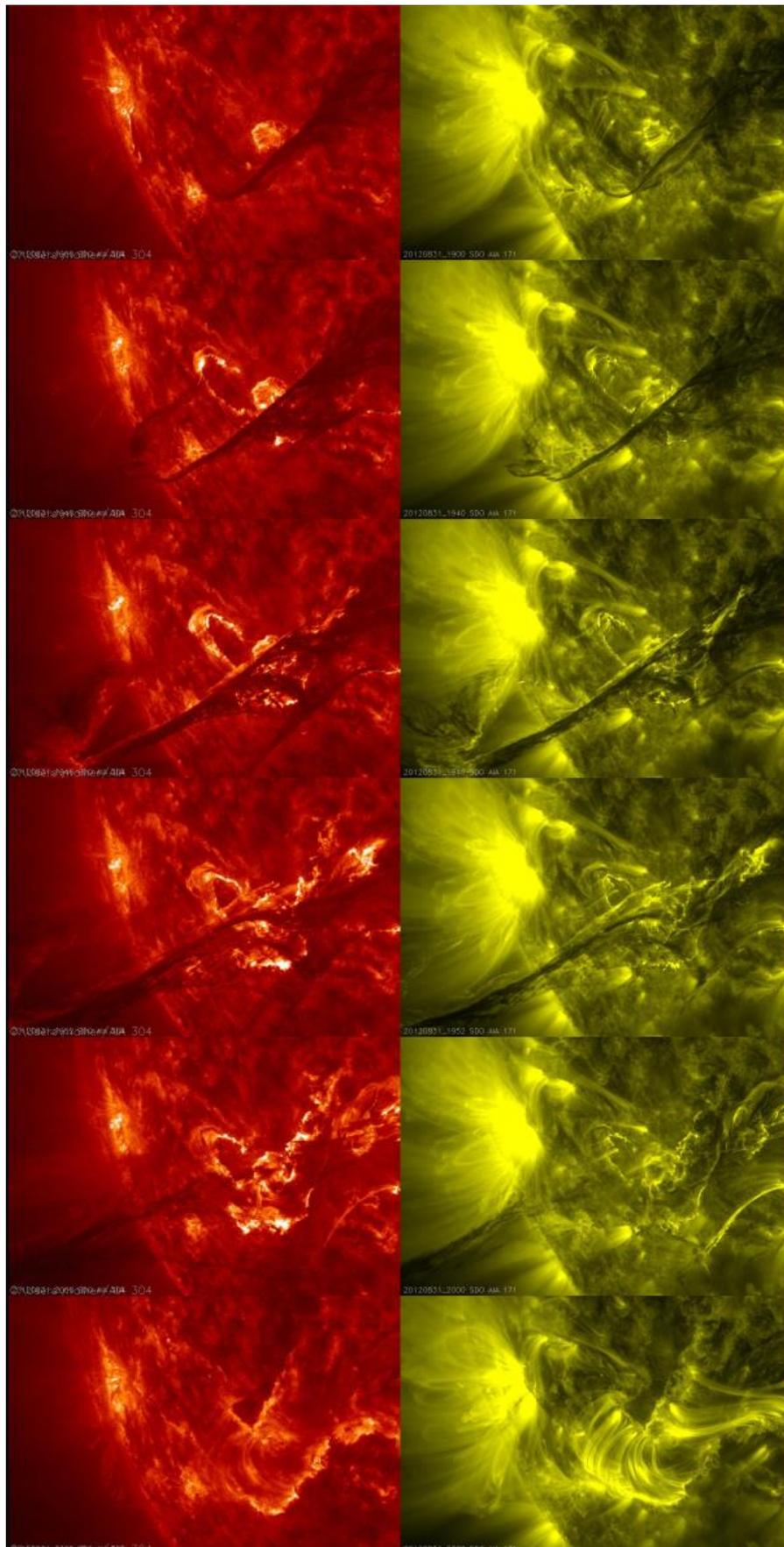
Les filaments sont des structures « froides » (10 000 degrés), denses, allongées, hautes (jusqu'à 100 000 km) en suspension dans la couronne, cent fois plus ténue et chaude. Leur poids est tel qu'ils devraient s'effondrer s'il n'y avait pas une force s'y opposant. Il s'agit de la **force de Laplace**, force magnétique agissant sur un **courant électrique**. Les filaments sont donc parcourus par des courants et soutenus par un berceau magnétique en forme d'arcade dont les pieds sont ancrés dans le Soleil. On le comprend en examinant les champs magnétiques de surface : les filaments se situent toujours à la frontière entre deux régions de polarités opposées. Ils sont sombres, car absorbent le rayonnement. Mais lorsqu'un filament passe au limbe solaire, il devient brillant, car la matière qui le compose (Hydrogène) émet sur un fond noir. On les appelle alors « protubérances ». Les filaments et les protubérances sont donc deux visions différentes d'un même phénomène. On a historiquement vu les protubérances en premier lors des éclipses totales ; ensuite, la spectroscopie a révélé les filaments sur le disque. Les longs filaments, qui peuvent atteindre plusieurs centaines de milliers de km (une fraction de rayon solaire) se forment souvent au début d'un nouveau cycle, à haute latitude, avant l'inversion du champ magnétique polaire. On les appelle alors filaments de « ceinture polaire ». Ils appartiennent à la catégorie des filaments « quiescents » loin des régions actives. Inversement, les zones comportant des taches présentent beaucoup de petits filaments, dits « de plage » car ils se situent entre deux « plages » brillantes de polarités magnétiques opposées. Pourquoi l'étude des filaments est-elle intéressante ? On a constaté que les éjections de masse coronale mettent en jeu dans 70% des cas un filament, qui devient instable lorsque son support magnétique est perturbé par les mouvements de ses points d'ancrage. La matière éjectée, qui se répand dans le milieu interplanétaire, peut voyager jusqu'à la Terre et impacter l'environnement spatial.



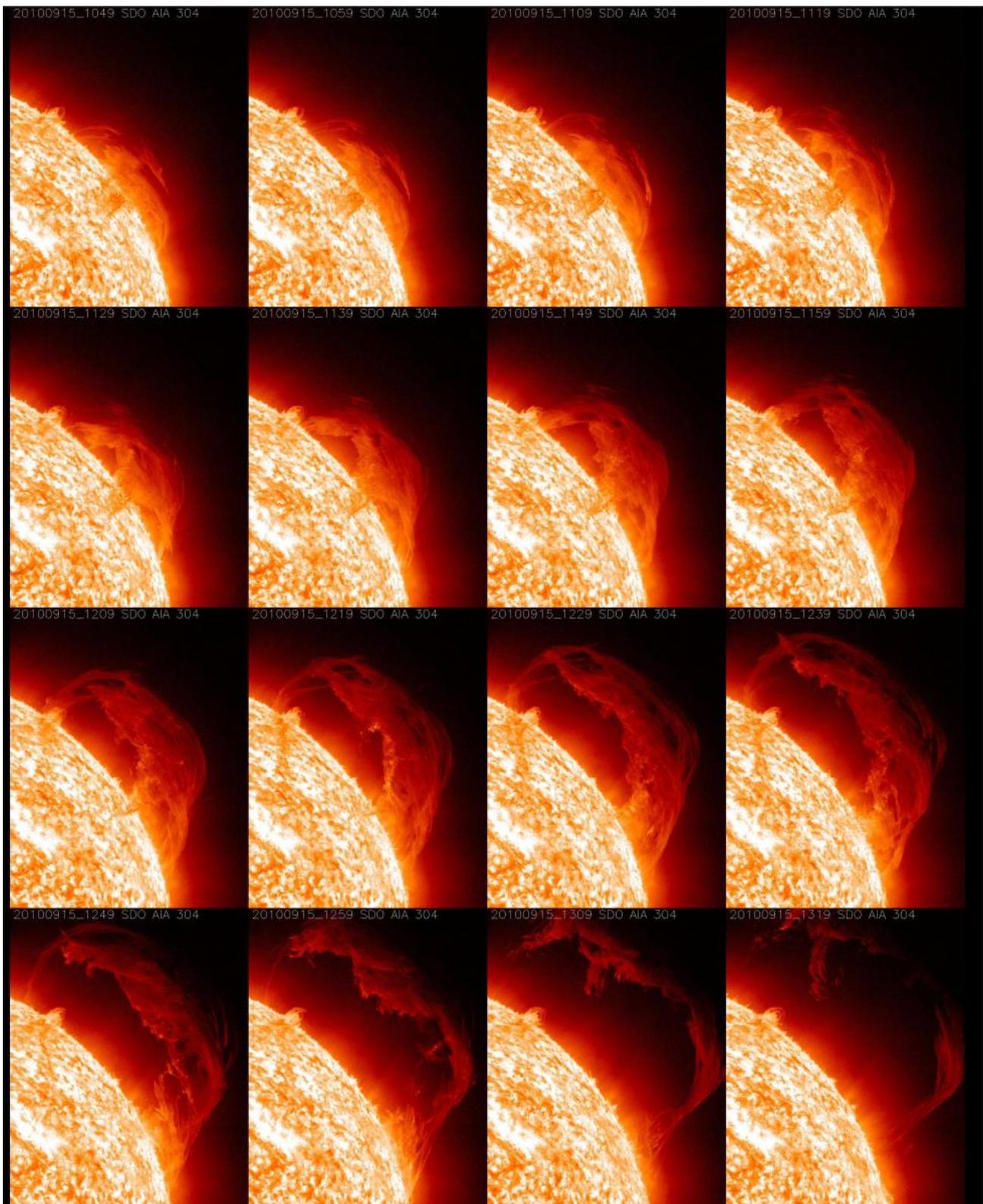
*Mécanisme de support des filaments ou protubérances par la **force de Laplace** créée par un **courant électrique** d'intensité I plongé dans un **champ magnétique** B ayant la forme d'une arcade. Si l est la longueur de l'objet, la force de Laplace s'écrit $F = I l B$ et s'oppose à son **poids** $P = m g$ (m étant sa masse et g l'accélération de la pesanteur). Le schéma est une vue par la tranche.*



Un filament quiescent de longueur exceptionnelle (plus d'un rayon solaire) observé dans l'hémisphère Sud. En haut à gauche, raie H α (Meudon). En haut à droite, le magnétogramme montre que le filament sépare deux grandes régions magnétiques de polarités opposées (jaune/vert). Aux températures plus élevées (dans l'ordre 0.1, 0.6, 1, 2.5, 6 et 10 millions de degrés), le rayonnement UV révèle le couloir magnétique occupé par le filament dans la basse couronne (9 Février 2015, HMI/AIA, SDO/NASA).



Instabilité d'un filament observé à 80 000 (gauche) et 600 000 degrés (droite) en UV. L'éjection du filament ne dure que quelques heures et est associée à une éruption en « double filet » (en bas : les deux rubans brillants parallèles, à gauche, sont surmontés par des boucles de champ magnétique chaudes, à droite). L'éjection se déclenche au début de l'éruption. AIA-SDO/NASA, 31 Août 2012.

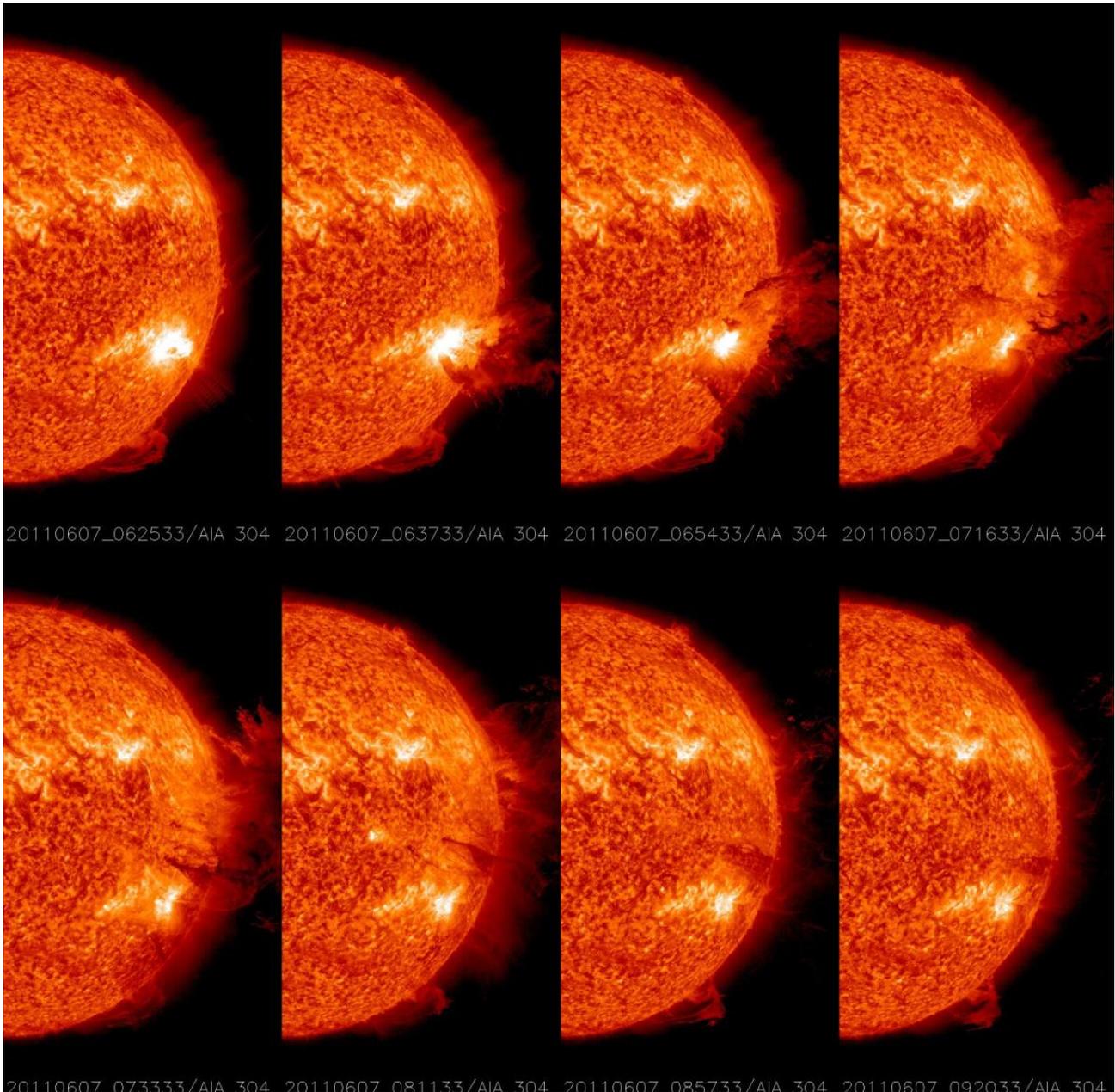


Ejection d'un filament au limbe solaire, appelée aussi protubérance éruptive, observée en UV à 80 000 degré le 15 Septembre 2010. Le phénomène dure 3 heures (AIA-SDO/NASA).

2 - Ejections de masse coronale (CME)

Les éjections de masse coronale impliquent en majorité des filaments ou protubérances déstabilisés par une perturbation de leur support magnétique. La masse éjectée est supérieure à un milliard de tonnes. Une partie retombe mais la plus grande est injectée dans le milieu interplanétaire dès lors que la vitesse acquise est proche de la vitesse de libération du Soleil (600 km/s), permettant

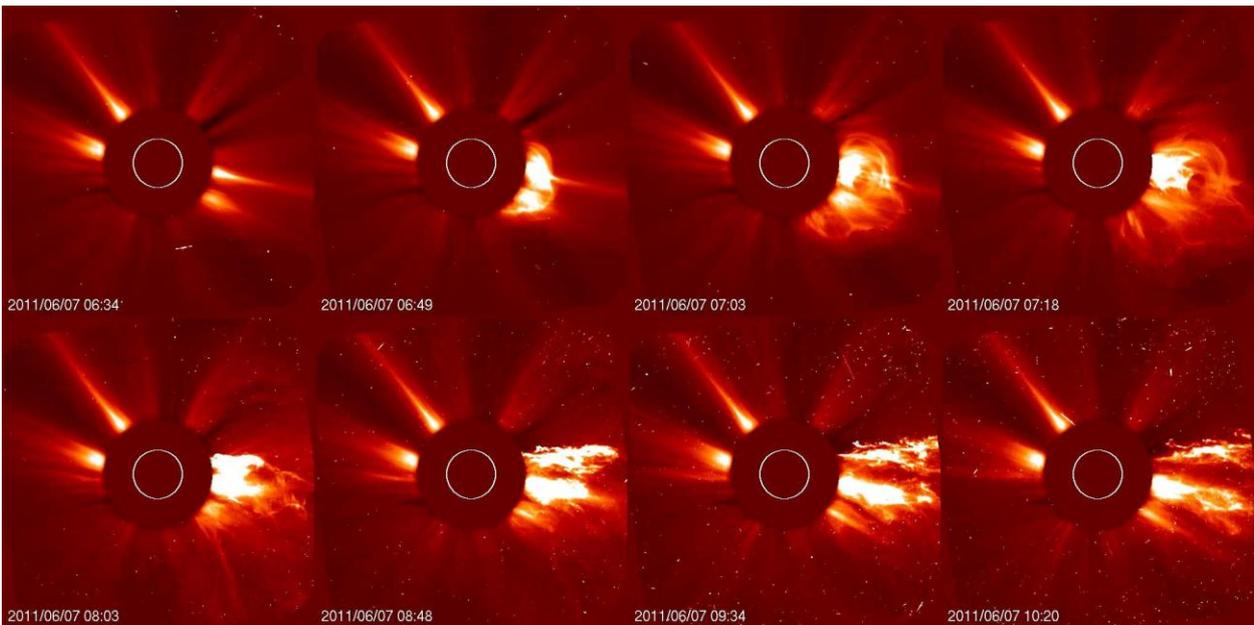
à la matière d'échapper à l'attraction gravitationnelle. En période de maximum solaire, plusieurs éjections de masse coronale peuvent se produire chaque jour. Le phénomène est rapide et dure quelques heures. L'énergie d'une CME (pour Coronal Mass Ejection) est de l'ordre de 20^{23} joules (J). Lorsqu'une éjection est dirigée vers la Terre, elle influence l'environnement spatial et porte le nom de « CME de halo ».



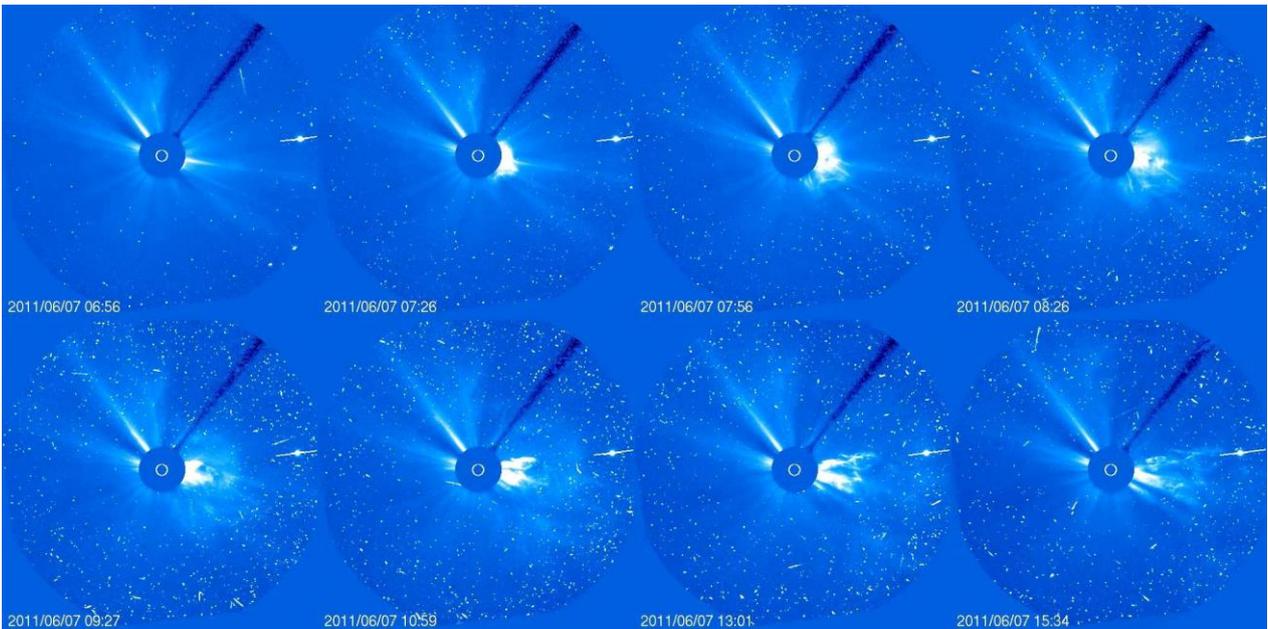
Gigantesque éjection de masse coronale en UV à 80 000 degrés le 7 Juin 2011 (raie de l'Hélium à 30.4 nm) ; le phénomène dure 3 heures. Une partie retombe sur le Soleil. AIA-SDO/NASA.

L'énergie d'une éjection de masse coronale

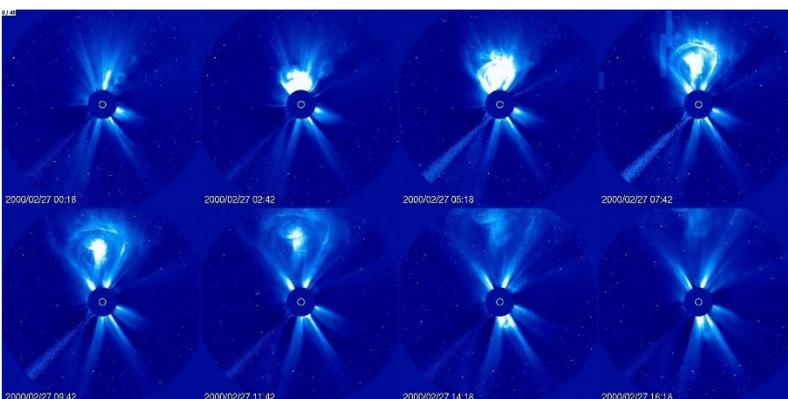
Une éjection de masse coronale possède une énergie comparable à celle consommée par l'humanité en une année toutes sources d'énergie confondues !



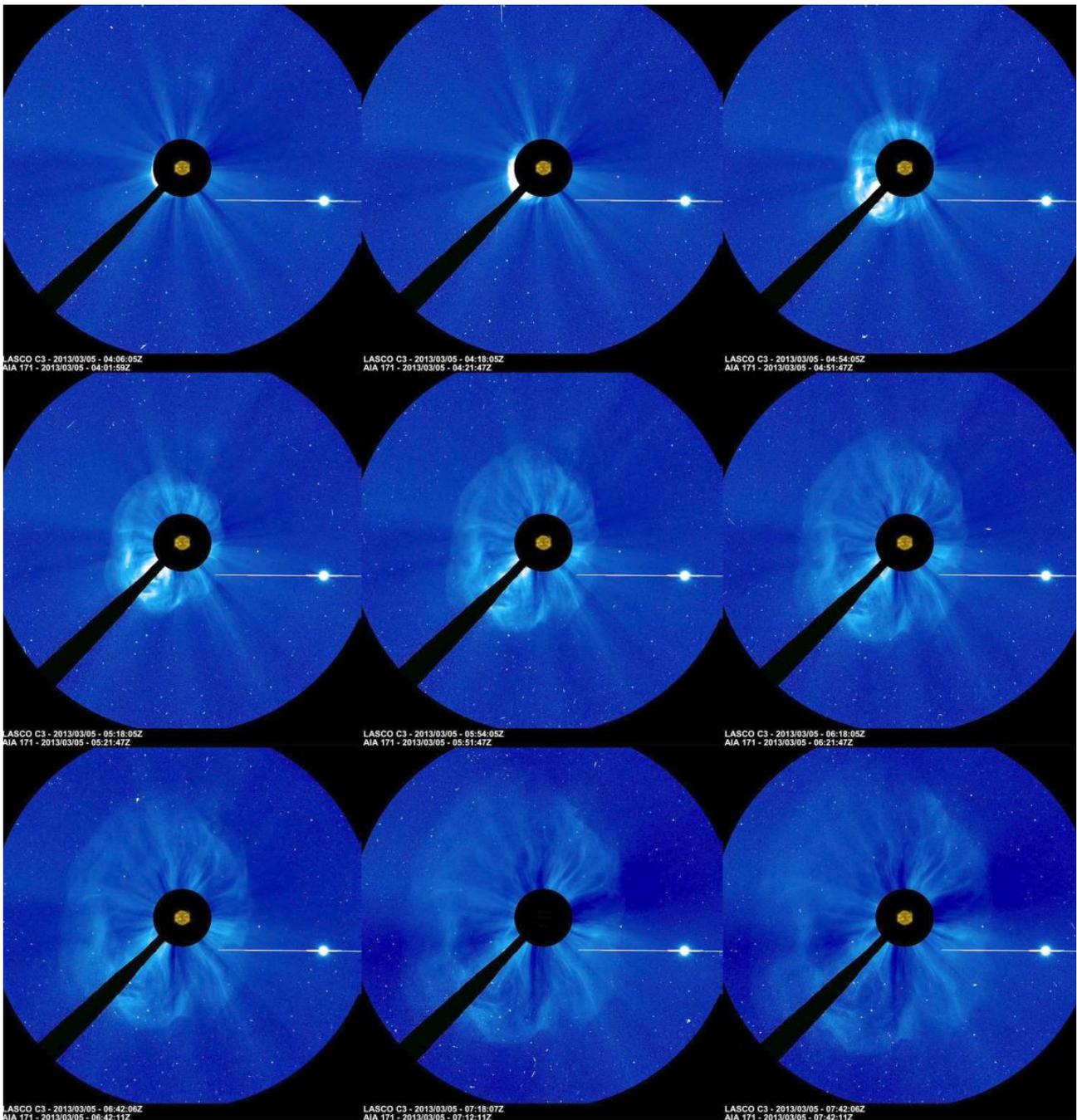
La même éjection de masse coronale du 7 Juin 2011 vue par le coronographe à moyen champ C2 de LASCO sur SOHO (ESA/NASA) ; le rond blanc représente le Soleil. Durée 4 heures.



L'éjection de masse coronale du 7 Juin 2011 vue par le coronographe à grand champ C3 de LASCO sur SOHO (ESA/NASA) ; le rond blanc représente le Soleil (remarquer la présence d'une planète derrière le Soleil à droite). Durée 9 heures.



Un autre exemple remarquable : éjection de masse coronale du 27 Février 2000 vue par le coronographe à grand champ de vue C3 de LASCO sur SOHO (ESA/NASA) ; le rond blanc représente le Soleil de diamètre 1 400 000 km. Durée 16 heures.

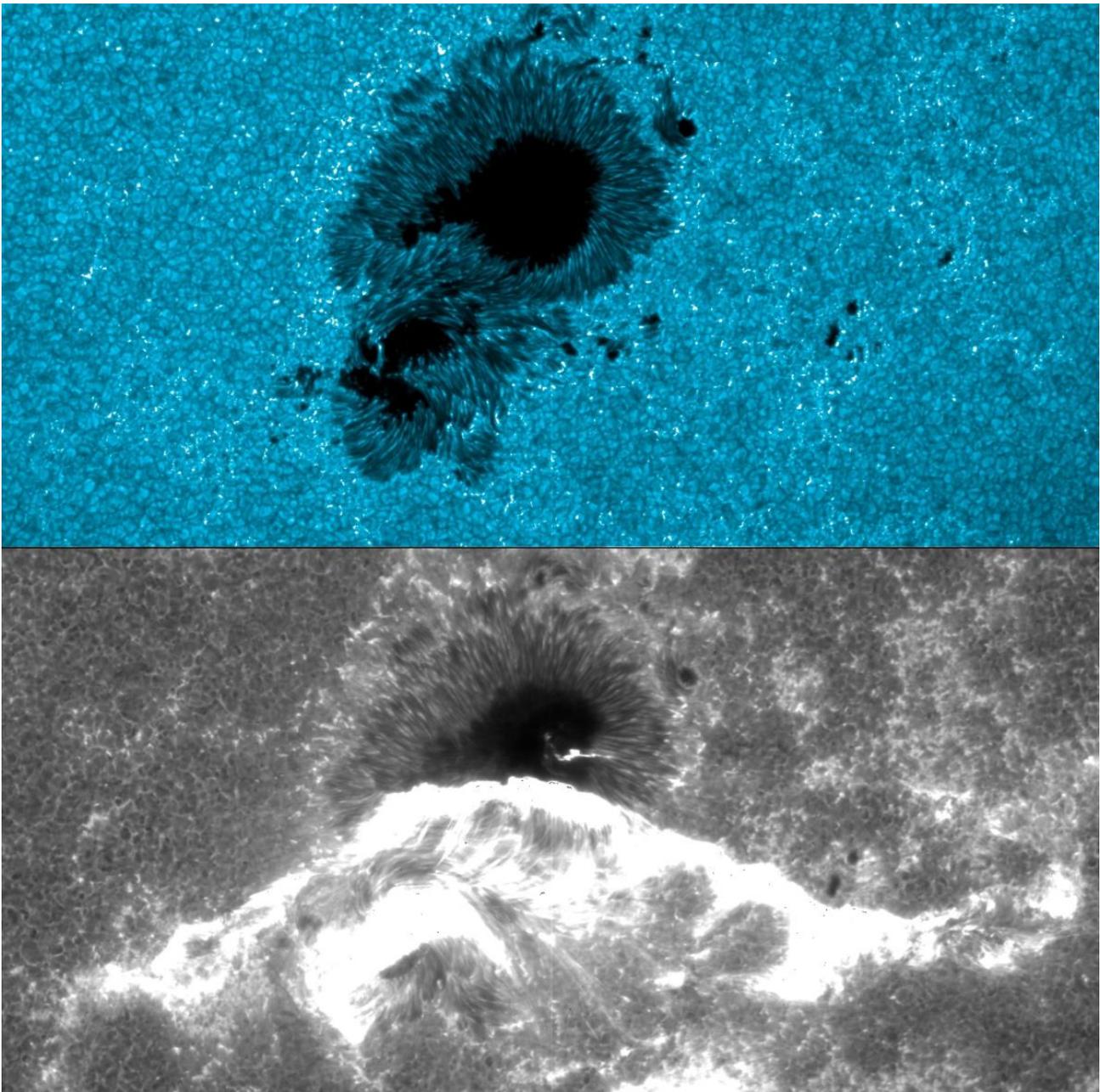


Une « CME de halo » se produit quand une éjection de masse coronale est dirigée vers la Terre. Elle est bien symétrique comme cet exemple du 5 Mars 2013 du coronographe C3 à grand champ de vue de SOHO (LASCO/SOHO - ESA/NASA). L'évènement dure 4 heures, et la matière éjectée se déplace à une vitesse de l'ordre de 600 km/s. Notez la présence d'une planète à droite.

3 – Eruptions

Les éruptions sont souvent associées aux éjections de masse coronale. Elles correspondent à une brusque libération d'énergie durant un bref instant, de l'ordre de la minute : c'est la « phase de flash ». La région devient soudainement très brillante au point de saturer parfois les détecteurs. La mesure de référence est celle des rayons X mous dans la gamme 0.1 à 0.8 nm de longueur d'onde, dont l'émission est surveillée en permanence par les satellites GOES de la NASA. La puissance des éruptions est classée en 3 classes importantes : C, M et X. Les éruptions de classe C sont modestes ; en classe M, elles sont 10 fois plus énergétiques, et en classe X, 100 fois plus. Les éruptions de classe C sont fréquentes, celles de classe M moins, et celles de classe X rares. On y ajoute un chiffre : une

éruption de classe X28 est plus énergétique qu'une autre de classe X17. La plus puissante éruption jamais observée par les instruments modernes (X28) remonte au 4 Novembre 2003. Cependant les éruptions qui ont eu lieu récemment, en Septembre 2017, s'en approchent.



Taches observées par le satellite Hinode (JAXA/NASA/ESA) le 13 Décembre 2006. En haut, image dans la bande CH à 430 nm. En bas, éruption dans la raie du Calcium à 397 nm. Le champ fait 165 000 km de large, approximativement 13 fois le diamètre terrestre.

L'énergie mise en jeu dans une éruption est d'origine magnétique. Elles prennent donc naissance dans les régions actives comportant des taches. L'énergie magnétique est partiellement convertie en énergie cinétique (mise en mouvement) et en chaleur (chauffage de la matière qui devient plus émissive). Des particules chargées sont accélérées puis guidées par les champs magnétiques ; certaines sont éjectées vers le milieu interplanétaire, et d'autres bombardent la surface solaire, sur laquelle apparaissent des rubans brillants, signature de ces impacts. Ces deux rubans parallèles sont les pieds de polarités opposées d'une arcade magnétique chaude et haute, qui les surmonte, d'où le nom « d'éruption en double filet ». La phase de « flash » est suivie d'une phase « graduelle » lente

qui dure plusieurs heures pendant laquelle la brillance décroît. Elle s'accompagne de la formation de boucles basses « post éruptives », résultant du refroidissement de l'arcade éruptive.

L'énergie mise en jeu dans une éruption est très variable, entre 10^{21} et 10^{25} J. Pour se faire une idée de l'ordre de grandeur, rappelons que le Soleil rayonne environ 10^{26} J en une seconde ou 10^{34} J par an. On estime que la consommation énergétique mondiale annuelle est comprise entre 10^{22} et 10^{23} J, toutes sources d'énergie confondues (nucléaire, pétrole, charbon, éolien, hydroélectrique, solaire, géothermique...). L'énergie solaire reçue par la Terre en un an est de 10^{24} J.

L'énergie d'une éruption

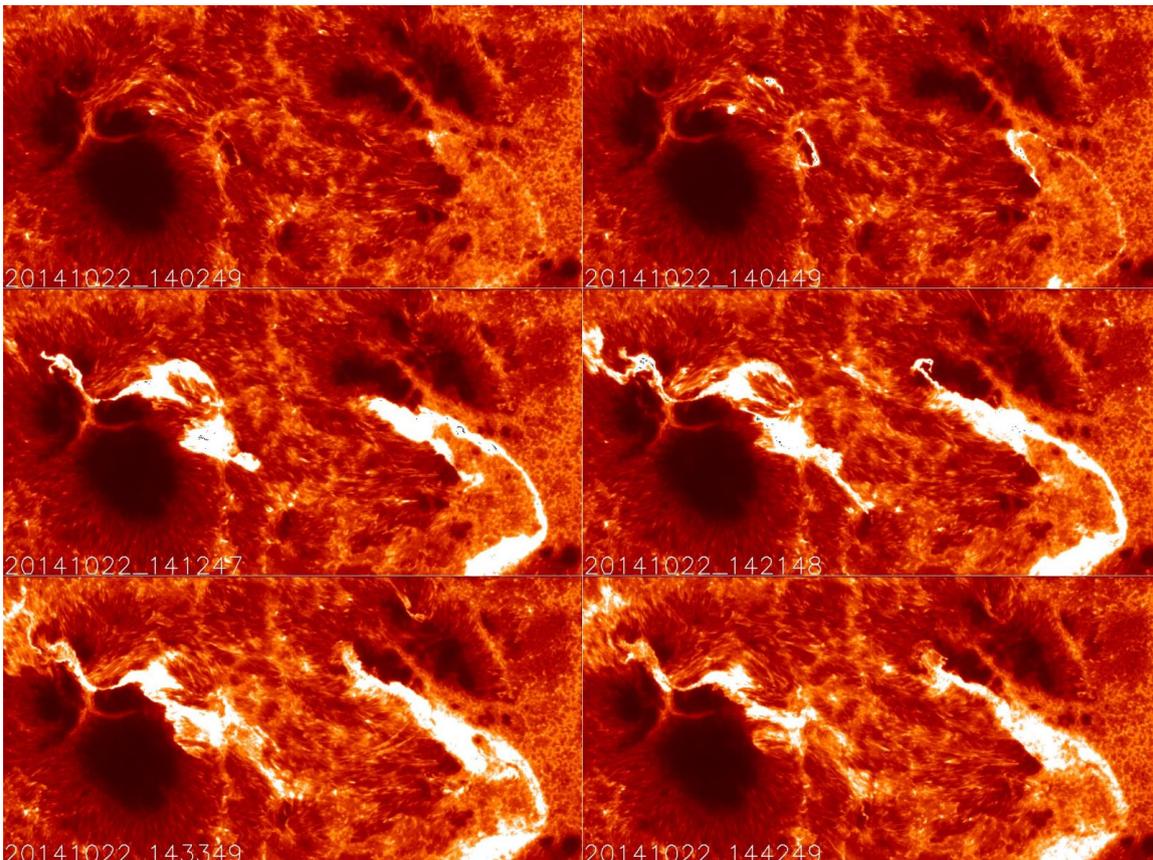
Une grosse éruption solaire dégage en quelques heures autant d'énergie que le rayonnement reçu par la Terre en un an, ou 10 fois plus que l'énergie annuelle consommée dans le monde.

Les différents types d'énergie en jeu dans une éruption

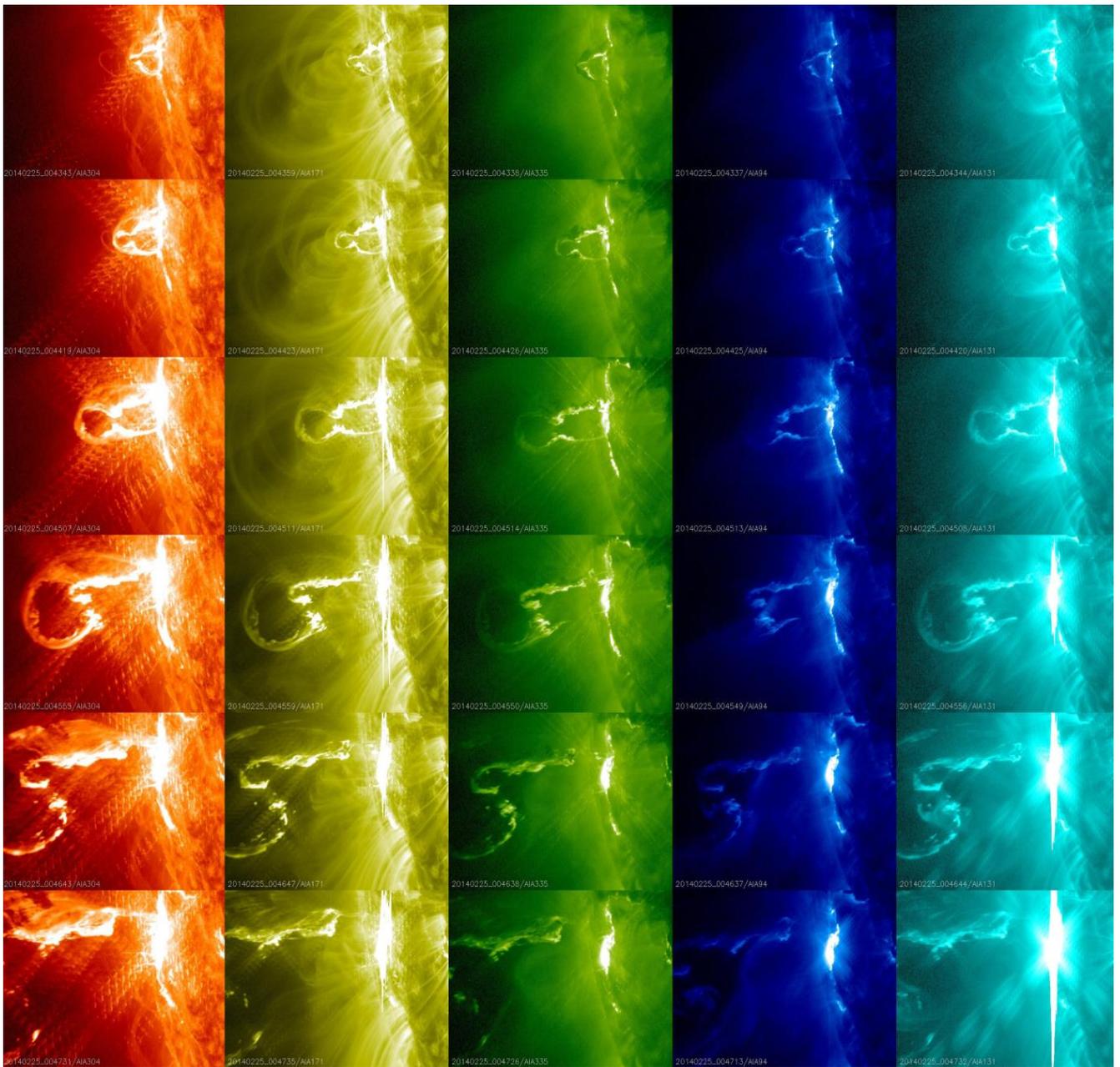
L'énergie magnétique : proportionnelle au carré de l'intensité du champ magnétique B et au volume V de l'espace magnétisé ($V B^2/2\mu_0$ où μ_0 est une constante, la perméabilité).

L'énergie cinétique : proportionnelle au carré de la vitesse v et à la masse m de la matière en mouvement ($\frac{1}{2} m v^2$).

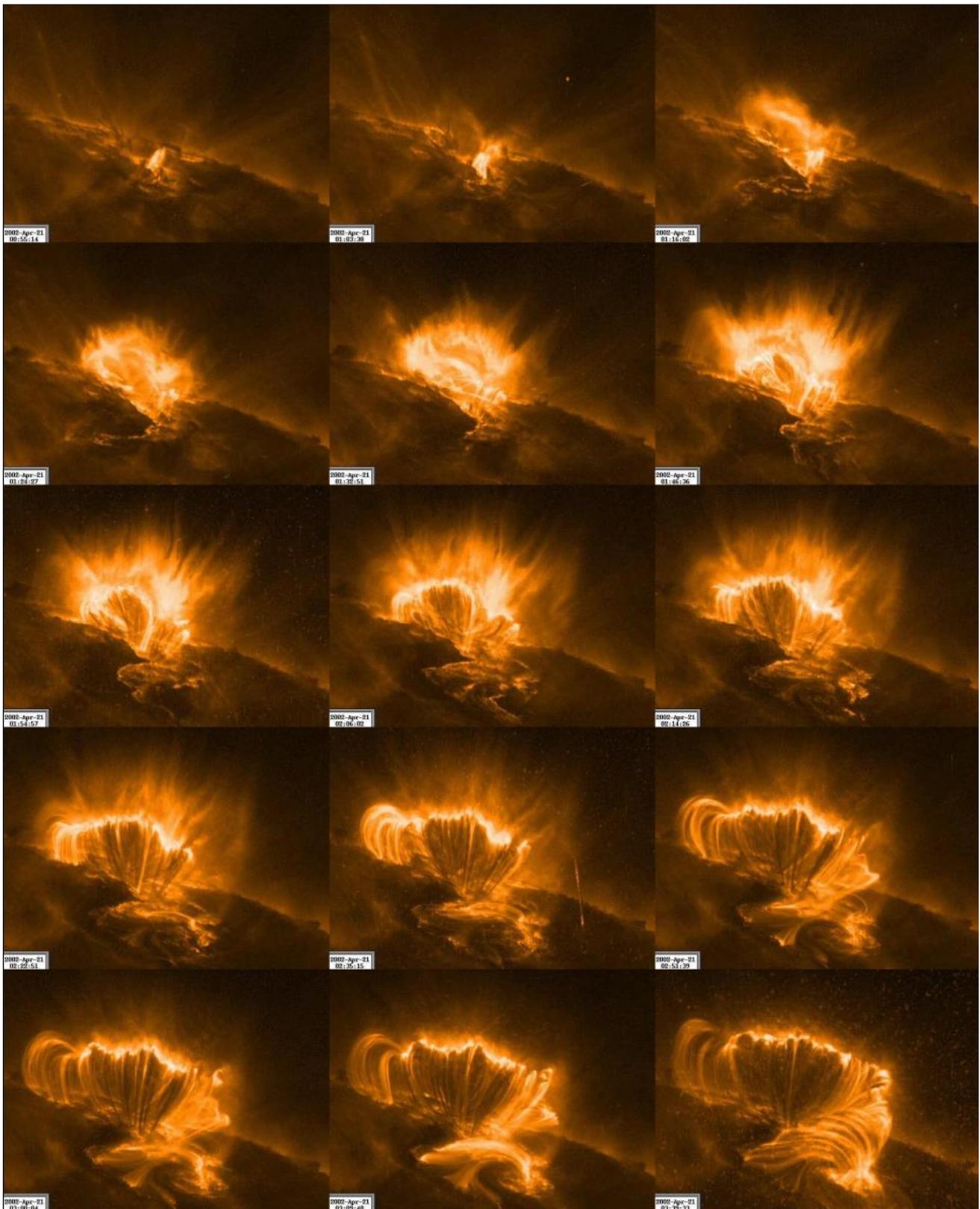
L'énergie thermique : proportionnelle à la quantité de matière, sa capacité calorifique massique et à la température absolue T . Sa variation peut résulter d'un chauffage par dissipation de courants électriques (effet Joule) ou d'ondes, ou d'un refroidissement par rayonnement ou conduction de chaleur.



Eruption en double filet du 22 Octobre 2014 observée par le satellite Hinode dans la raie du Calcium à 367 nm à 10 000 degrés (JAXA/ NASA/ESA). L'embrillancement apparaît en quelques minutes vers 14H05. La largeur du champ est d'environ 165 000 km. Une arcade magnétique (invisible ici) surmonte les rubans qui deviennent brillants en raison de l'impact de particules.



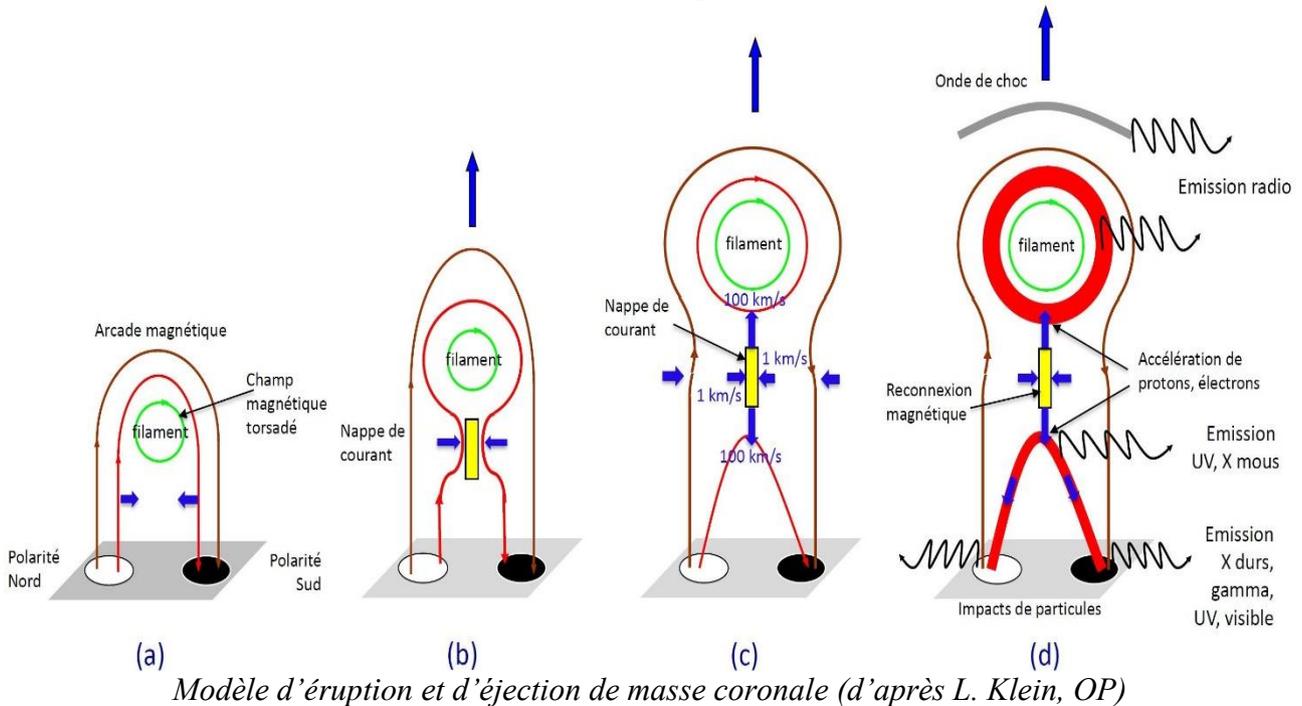
Eruption du 25 Février 2014 observée en UV par l'instrument AIA sur le satellite SDO/NASA au bord du Soleil. Elle provoque une saturation du détecteur. L'éruption s'accompagne d'une éjection de masse qui se produit en seulement 4 minutes de temps. Les températures sont de gauche à droite 0.1, 0.6, 2.5, 6 et 10 millions de degrés. Le champ fait 250 000 km de large soit 20 fois la Terre.



Eruption au bord solaire du 21 Avril 2002 observée en UV par le satellite TRACE de la NASA (aujourd'hui arrêté). Les images couvrent deux heures de temps, on assiste au développement d'un système de boucles chaudes (2 millions de degrés) formant une arcade magnétique qui évolue. Le champ de vue est d'environ 10 fois le diamètre terrestre.

4 - Qu'est ce que la reconnexion magnétique ?

Lors d'une éruption, c'est l'énergie magnétique qui est convertie sous d'autres formes, thermique (échauffement), cinétique (mise en mouvement de la matière), potentielle (projection en altitude), etc... Un mécanisme fondamental qui libère de l'énergie magnétique est la reconnexion : ce processus modifie la connectivité des lignes de champ, qui se réorganisent en passant d'une configuration d'énergie magnétique élevée, mais instable, à une autre d'énergie moindre, mais stable. Nous allons discuter cela de manière schématique.

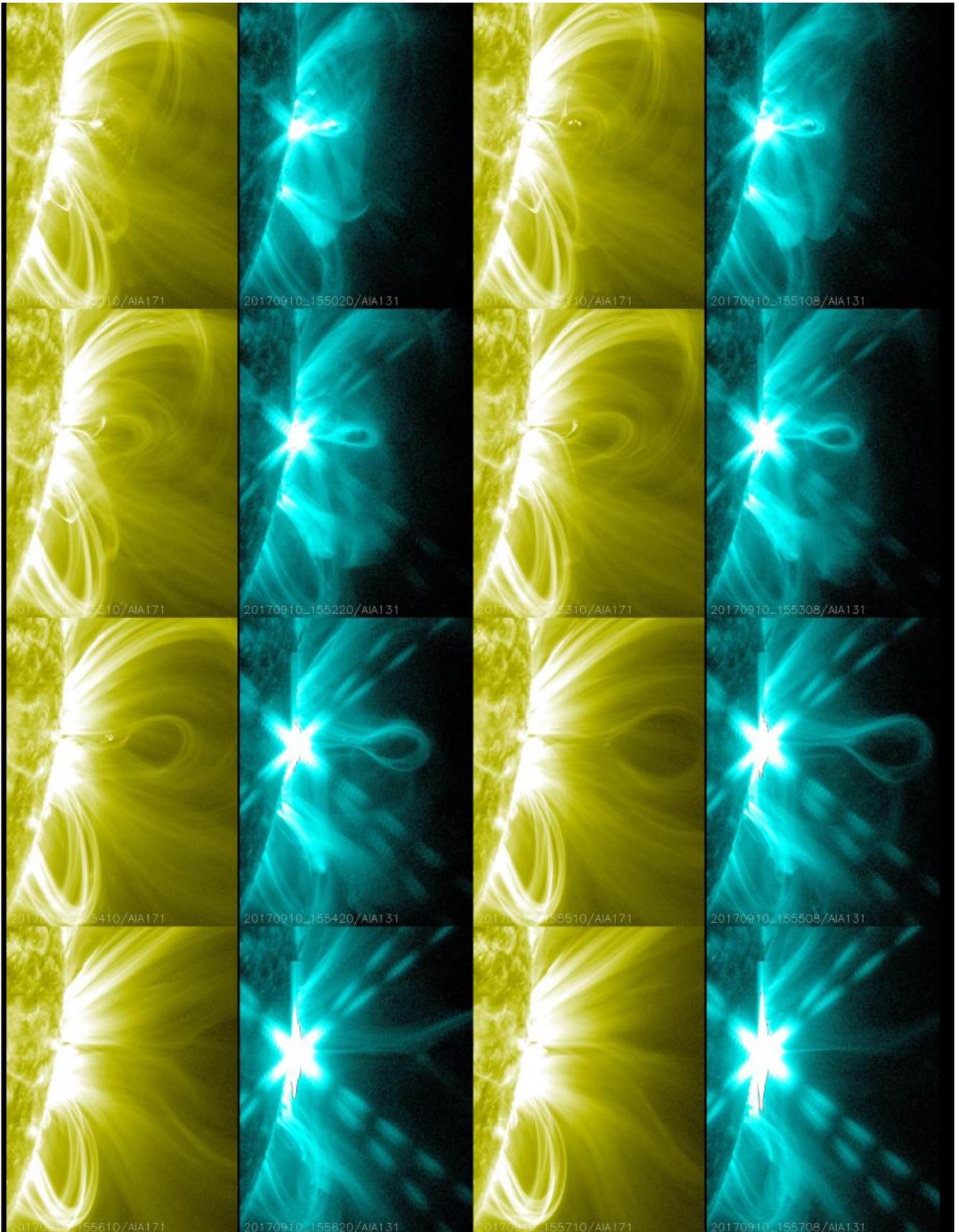


La configuration typique de départ **(a)** est composée d'une arcade magnétique et d'un filament dense et long (la figure le montre par la tranche) soutenu contre la gravité par un champ magnétique torsadé. Cet édifice devient progressivement instable sous l'influence de contraintes extérieures pouvant imposer une torsion ou un cisaillement par déplacement des points d'ancrages du champ magnétique dans la surface solaire. L'arcade va réagir en s'élevant et un mécanisme de reconfiguration du champ se met en place.

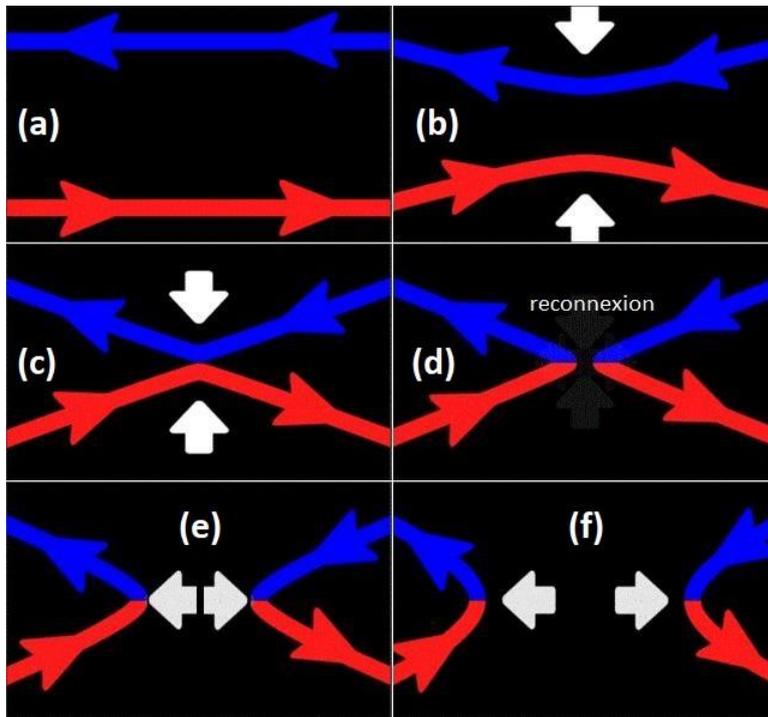
Les lignes **rouges** se rapprochent et forment une nappe de courant (rectangle **jaune** en **b**). Une nappe de courant est une zone plane et mince où les champs magnétiques sont anti-parallèles. Elle est le siège d'un courant électrique intense. Comme le plasma solaire possède une conductivité électrique finie, le champ magnétique se met à diffuser dans la nappe, ce qui permet aux lignes de champ de changer de connectivité (ligne **rouge**, **c**). Cette diffusion s'accompagne d'une dissipation d'énergie par effet Joule qui échauffe le plasma (principe de la résistance chauffante) et émet des rayons X.

Le processus de reconnexion, une fois établi dans la nappe **jaune** (**d**), aspire lentement la matière et le champ magnétique environnant à la vitesse d'un km/s ; le changement de connectivité éjecte cette matière vers le haut et le bas à plus de 100 km/s à une vitesse dite d'Alfvén (flèches **bleues**, **c** et **d**). La matière projetée vers le bas va impacter la surface solaire en format deux rubans brillants ; l'autre partie, expulsée vers le haut, forme une « bulle » ou un « cylindre » de plasma (vu par la tranche) qui constitue l'éjection de masse coronale que l'on a décrite précédemment.

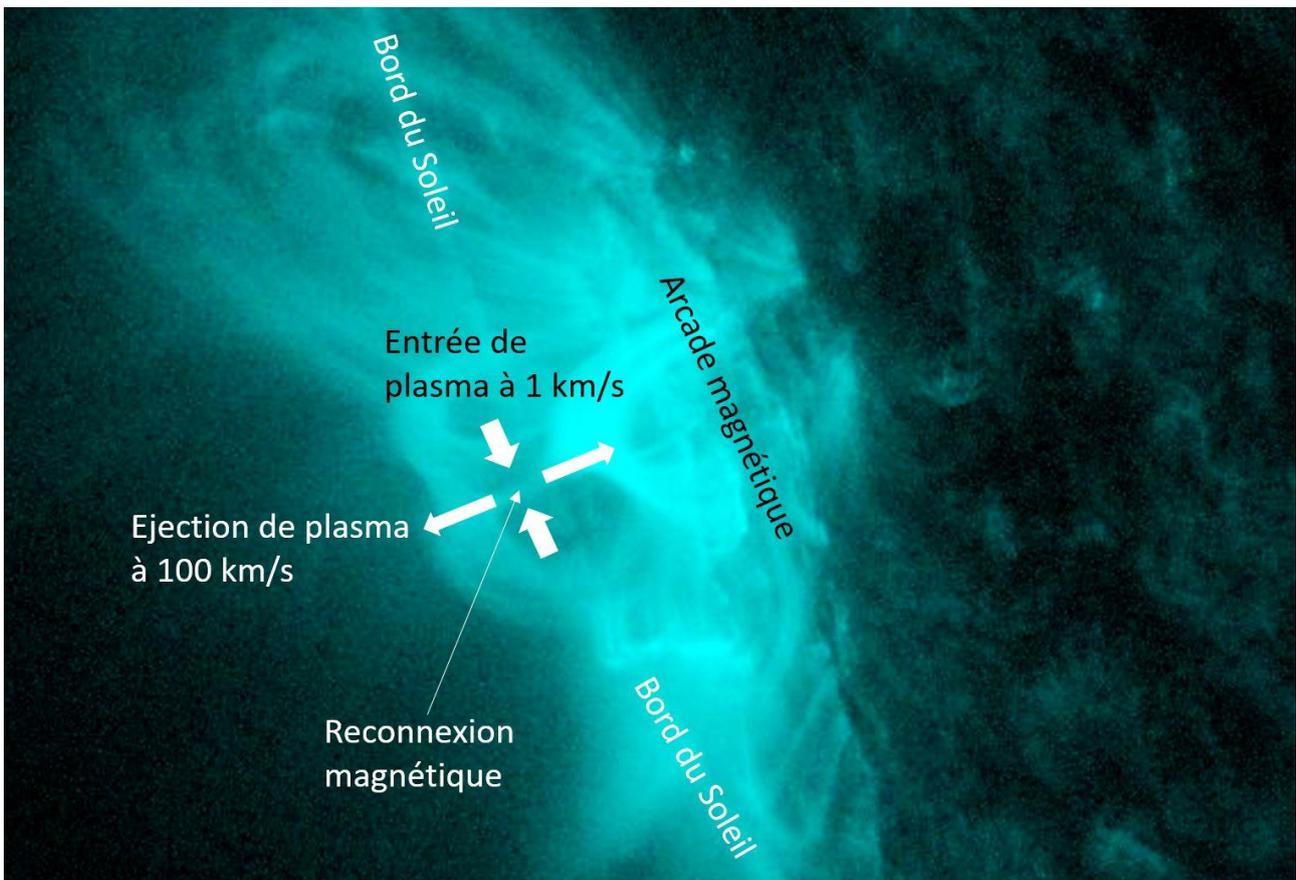
La reconnexion magnétique accélère les particules chargées (électrons, ions) qui rayonnent en ondes radio, comme le rayonnement cyclotron ou synchrotron en ce qui concerne les particules guidées par le champ magnétique, ou qui émettent des rayons X de freinage pour celles précipitées vers la surface solaire.



Eruption remarquable de classe X9 du 10 Septembre 2017 vue par AIA sur le satellite SDO/NASA en UV à deux températures de 1 (jaune) et 10 millions de degrés (bleu). Les images couvrent 7 minutes de temps et révèlent la « bulle » de plasma éjectée vers le milieu interplanétaire caractéristique de la reconnexion magnétique.



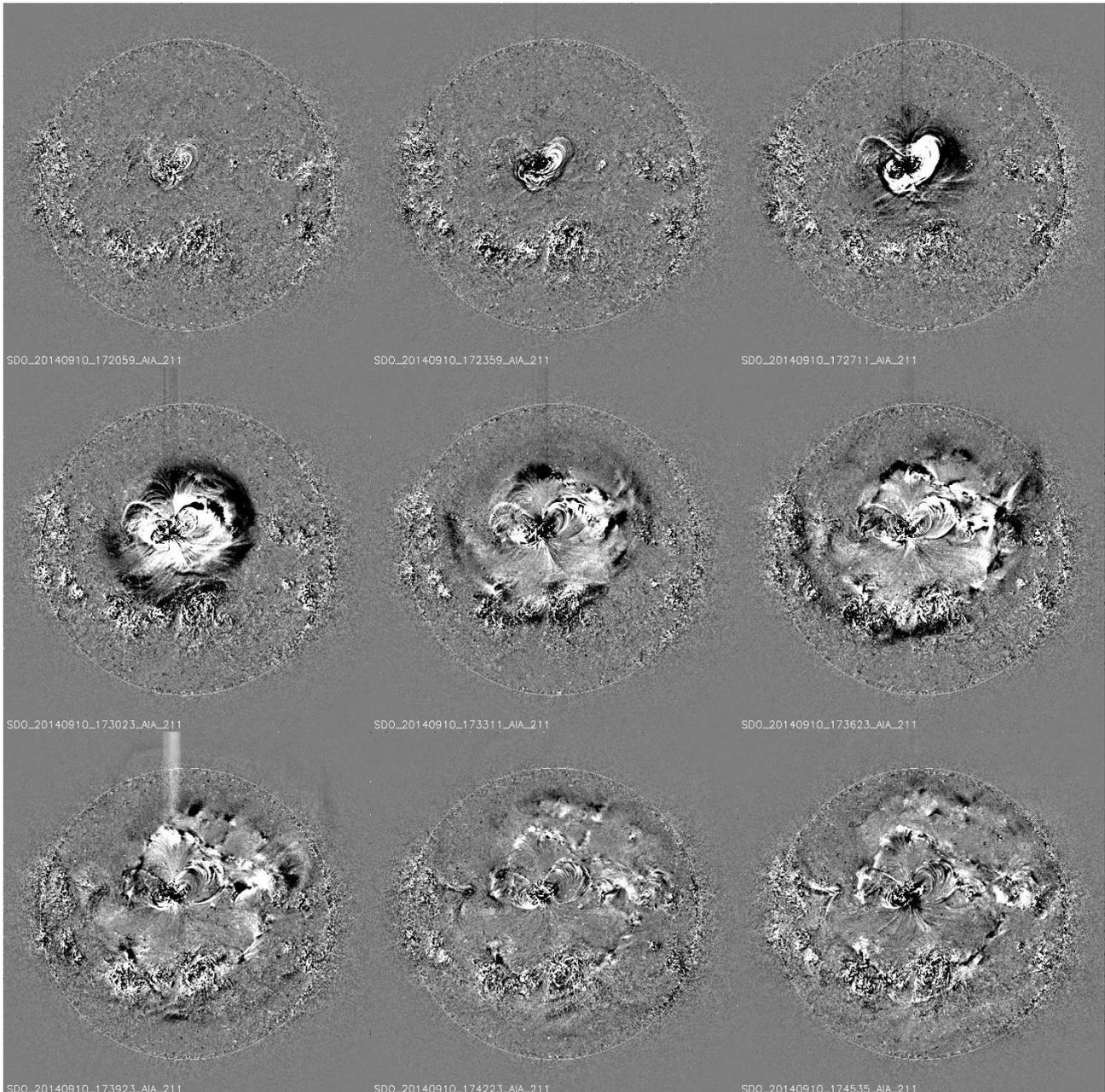
La reconnexion magnétique dans une nappe de courant se déroule entre deux lignes de champ antiparallèles (a) qui se rapprochent à une vitesse faible, de l'ordre du km/s (b et c). La diffusion (d) va modifier la connectivité des lignes de champ avec éjection de matière de la nappe par la tranche à plus de 100 km/s (e et f). Center for Visual computing, University of California.



Observation exceptionnelle (17 Août 2011) d'un site de reconnexion magnétique lors d'une éruption devant le bord solaire par AIA-SDO/NASA en UV à 10 millions de degrés.

5 - Ondes coronales

Les ondes coronales ont été découvertes par l'instrument EIT à bord de SOHO. SDO permet de les revisiter avec une bien meilleure résolution spatiale et temporelle. Lorsqu'une éruption se déclenche, l'énergie libérée peut être si rapide qu'elle engendre une sorte d'onde de choc (comme dans une explosion) qui balaie toute la surface du Soleil en se déplaçant à des vitesses supersoniques de l'ordre de 500 à 1000 km/s. Cette onde progresse en quelques minutes sur tout le Soleil et peut déstabiliser sur son passage des structures comme les filaments. Le phénomène est tellement fugitif qu'il est difficile à décrire convenablement, car la cadence des instruments est insuffisante ; on a donc peu d'exemples et les mécanismes physiques sont encore mal connus.



Onde coronale observée par AIA sur le satellite SDO/NASA en UV à 211 nm de longueur d'onde le 10 Septembre 2014. Ce sont des différences successives d'images qui sont présentées car la fluctuation d'intensité au passage de l'onde est très petite. Durée 20 minutes.

6 - Vent solaire

Le vent solaire est un flot de particules chargées (protons, électrons, ions) issu du Soleil, guidé par les champs magnétiques à grande distance et balayant le milieu interplanétaire. Le vent lent (400 km/s) est issu des régions équatoriales, comportant des boucles magnétiques fermées, alors que le vent rapide (800 km/s) est plutôt issu des régions polaires ou des « trous coronaux » qui sont des régions ouvertes sur le milieu interplanétaire. Le premier modèle du vent solaire a été proposé par Eugène Parker en 1958. Il s'agit d'un écoulement dit « transsonique » en ce sens que la vitesse des particules est inférieure à la vitesse du son (150 km/s) en dessous de 4 rayons solaires (écoulement « subsonique ») et supérieure au-delà (écoulement « supersonique »). Grosso modo, la vitesse des particules varie selon le logarithme de la distance au Soleil. Elle croît donc doucement au fur et à mesure qu'on s'en éloigne. Le vent solaire permanent peut être doublé d'une composante transitoire liée aux éruptions qui injectent des « nuages magnétisés » et des bouffées de particules énergétiques. Il met quelques jours pour parvenir à la Terre où la densité normale est de l'ordre de 10 particules par cm^3 .

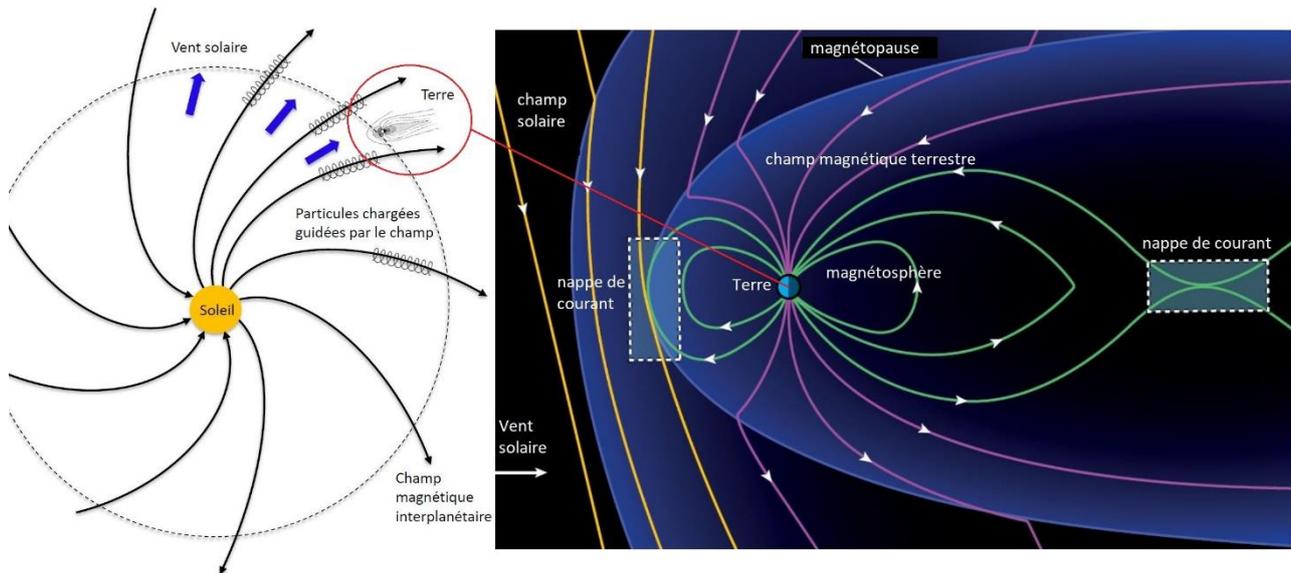
Le vent solaire inflige au Soleil une perte de masse qui est de l'ordre du million de tonnes par seconde ; cependant, au bout de 10 milliards d'années, c'est moins d'un millième de sa masse initiale !

Pourquoi les particules chargées, accélérées par les éruptions, s'échappent-elles du Soleil ? Dans la couronne à 1 ou 2 millions de degrés, la vitesse thermique des protons est de l'ordre de 150 km/s, alors que celle des électrons libres est beaucoup plus grande car ils sont plus légers (5000 km/s). Ces vitesses doivent être comparées à la vitesse de libération du Soleil qui vaut 600 km/s. Les électrons libres ont une agitation thermique supérieure à la vitesse de libération, il leur est aisé de quitter le Soleil. Ce n'est pas le cas des protons ; cependant, parmi eux, certains ont une vitesse supérieure à cette valeur critique, car la distribution de leur vitesse obéit à une loi statistique ayant pour moyenne la vitesse thermique. Il existe donc des protons capables d'échapper à l'attraction solaire. De plus, le champ électrique créé par les électrons libres est dirigé vers l'extérieur et vient les aider en les accélérant.

La vitesse thermique et la vitesse de libération

Dans un gaz homogène se produit un phénomène d'agitation thermique : les particules sont en mouvement aléatoire avec une énergie moyenne proportionnelle à la température. L'égalité avec l'énergie cinétique définit la vitesse thermique. Elle est d'autant plus grande que la température est élevée (la couronne solaire) et la particule légère (les électrons). Pour qu'une particule échappe à l'attraction du Soleil, il faut lui communiquer une énergie cinétique qui compense son énergie gravitationnelle. Ceci définit la vitesse de libération, 600 km/s pour le Soleil (11 km/s pour la Terre).

Le vent solaire est guidé par les champs magnétiques solaires dans le milieu interplanétaire. La Terre possède son propre champ magnétique et est entourée d'un bouclier appelé magnétosphère qui entre en contact avec le vent solaire. En période de recrudescence de l'activité solaire, cette interaction se caractérise par des aurores polaires et certains phénomènes indésirables pour les activités humaines. L'étude et la prédiction de ces phénomènes constitue la « météorologie de l'espace ».



Champ magnétique solaire à grande distance, guidant le vent solaire, et son interaction avec le champ magnétique terrestre (OP et NASA). Une nappe de courant se forme au contact entre le champ magnétique solaire (jaune) et terrestre (vert). Dans cette nappe, la reconnexion magnétique éjecte des particules précipitées vers les zones polaires de la Terre.

7- Relations entre le Soleil et la Terre : la météorologie de l'espace

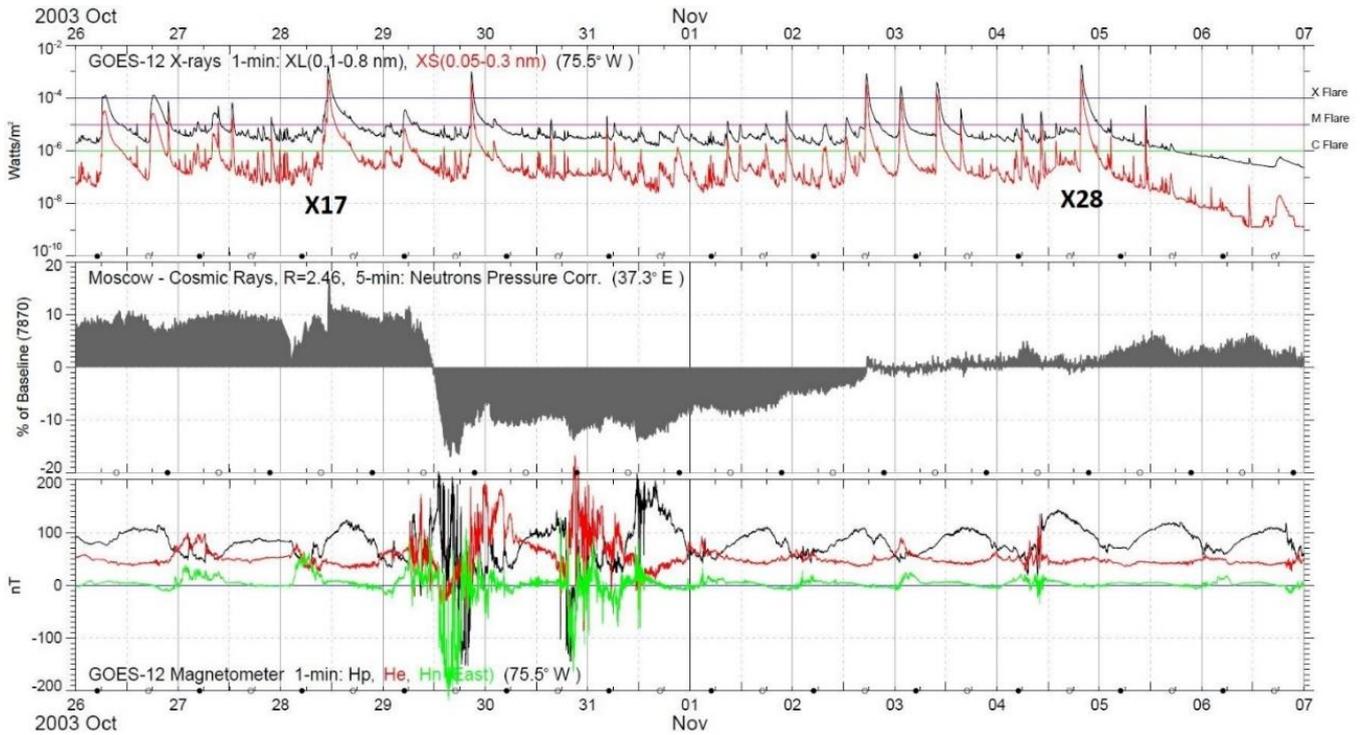
La météorologie de l'espace est une science qui vise à comprendre, puis à prévoir, les interactions entre le Soleil et la Terre. Lorsqu'une éjection de masse coronale est dirigée vers la Terre, elle bombarde l'atmosphère par des particules chargées véhiculées par le vent solaire. Le champ magnétique dans l'environnement terrestre est perturbé. De belles aurores polaires apparaissent. Mais des courants induits dans les lignes électriques de haute latitude peuvent survenir, endommager les transformateurs et générer des pannes (exemple du Québec en Mars 1989) ; l'électronique des satellites de télécommunications peut être détruite, etc... C'est la raison pour laquelle on essaie de prévoir à l'avance les phénomènes solaires pouvant impacter les activités humaines.

Prenons par exemple les éruptions extrêmes survenues en Octobre 2003. Le 28, une éruption intense de classe X17 se produit et est détectée par le satellite GOES. 24 heures après, le 29, les moniteurs au sol détectent une forte décroissance des rayons cosmiques galactiques, connue sous le nom d'effet « Forbush ». Cela signifie que l'éruption solaire était partiellement dirigée vers la Terre et que le nuage magnétique associé a mis 24 heures pour faire le trajet : sa présence a dévié les particules cosmiques (tout champ magnétique dévie et guide les charges électriques). Au même moment, les magnétomètres de GOES, situé à 36 000 km de la Terre, ont détecté une forte variation des 3 composantes du vecteur champ magnétique local.

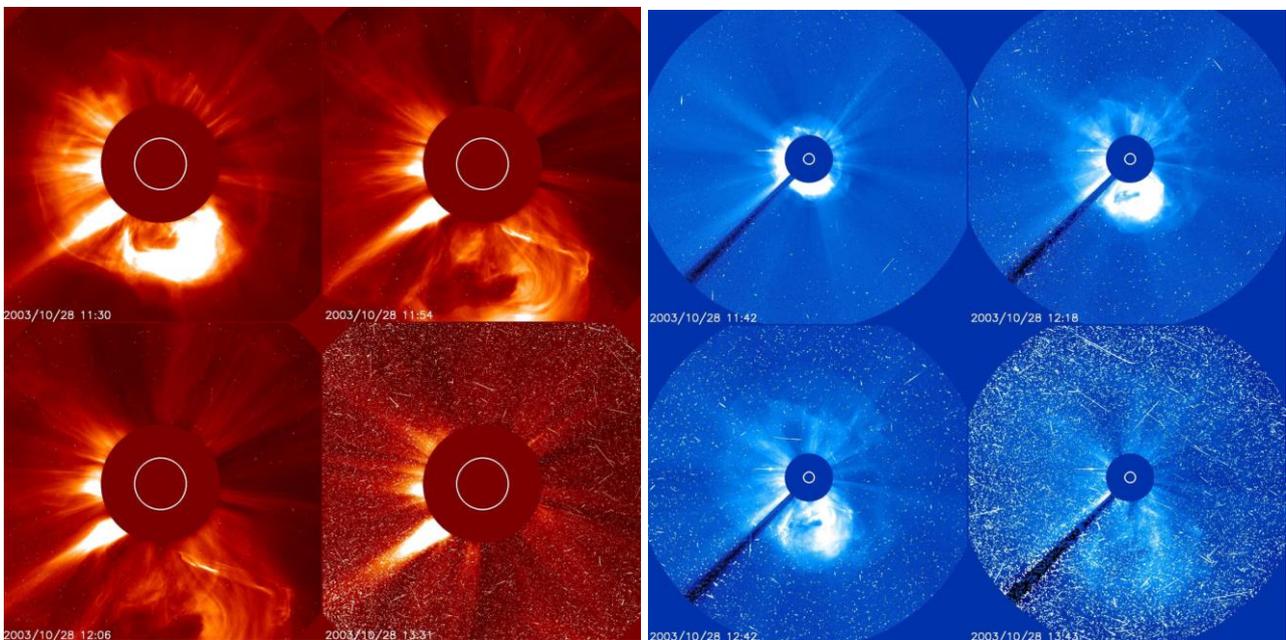
Le 4 Novembre 2003, quelques jours après, une éruption encore plus puissante, de classe X28, la plus énergétique jamais enregistrée dans l'histoire, se produit. Mais elle n'est pas dirigée vers la Terre, et ne provoque au sol aucune perturbation du flux de rayons cosmiques ni de champ magnétique à l'orbite géostationnaire du satellite.

Nous avons là deux exemples caractéristiques : l'éruption du 28 Octobre a perturbé l'environnement terrestre ; cependant, l'éruption du 4 Novembre, pourtant plus puissante, n'a eu aucun effet. Pour mieux maîtriser la variabilité de l'environnement spatial et ses conséquences néfastes sur les activités humaines, il faut donc :

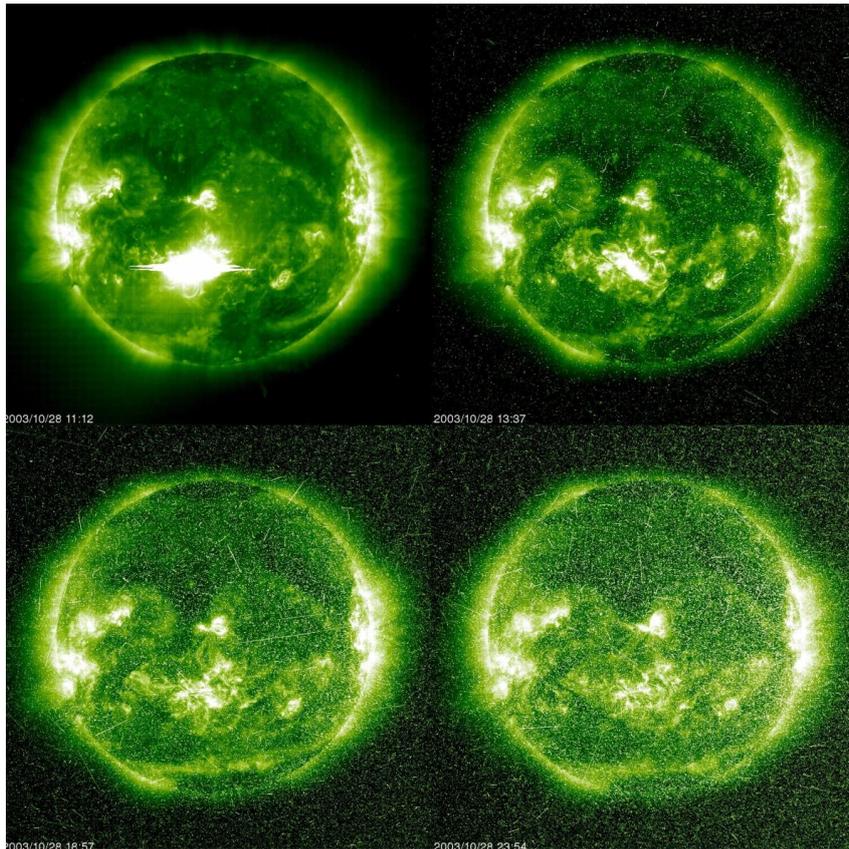
- connaître la directivité des éjections de masse coronale, d'où l'intérêt des observations stéréoscopiques
- savoir prédire les instabilités solaires pouvant mener à une éruption ou éjection, ce qui nécessite en amont une profonde compréhension des mécanismes physiques en jeu



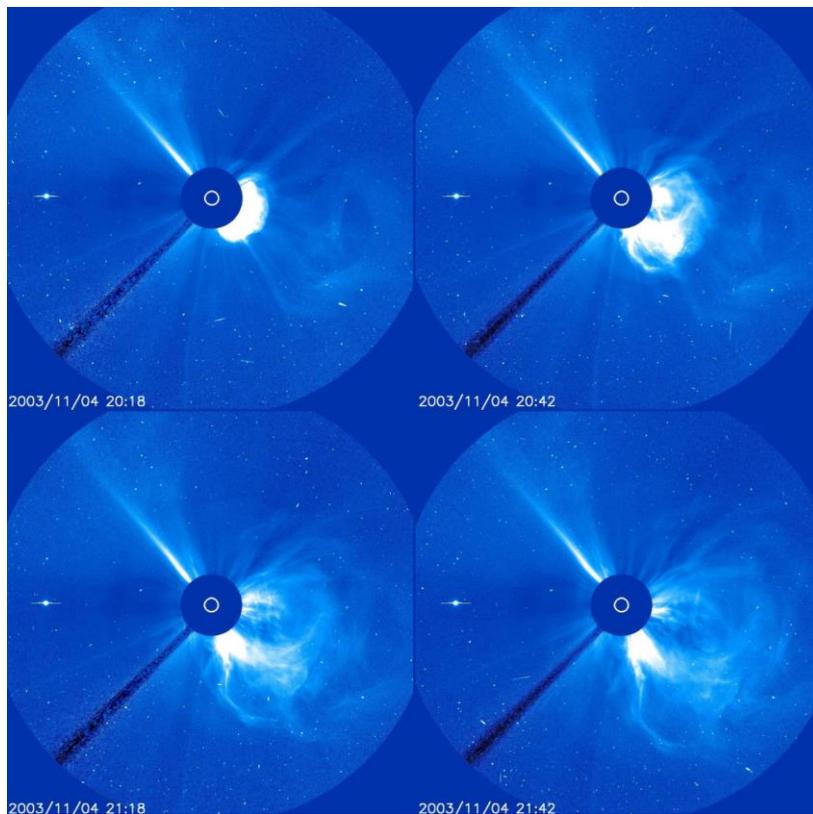
Rayons X mesurés par GOES (en haut, deux canaux à 0.1-0.8 nm et 0.05-0.4 nm de longueur d'onde), fluctuation du flux de particules cosmiques (au milieu, station au sol de Moscou) et variations des 3 composantes du vecteur champ magnétique mesurées par GOES (en bas), entre le 26 Octobre et 6 Novembre 2003. L'éruption X17 du 28 Octobre impacte la Terre le 29. Celle du 4 Novembre, encore plus puissante (X28), ne l'atteint pas. Document NOAA.



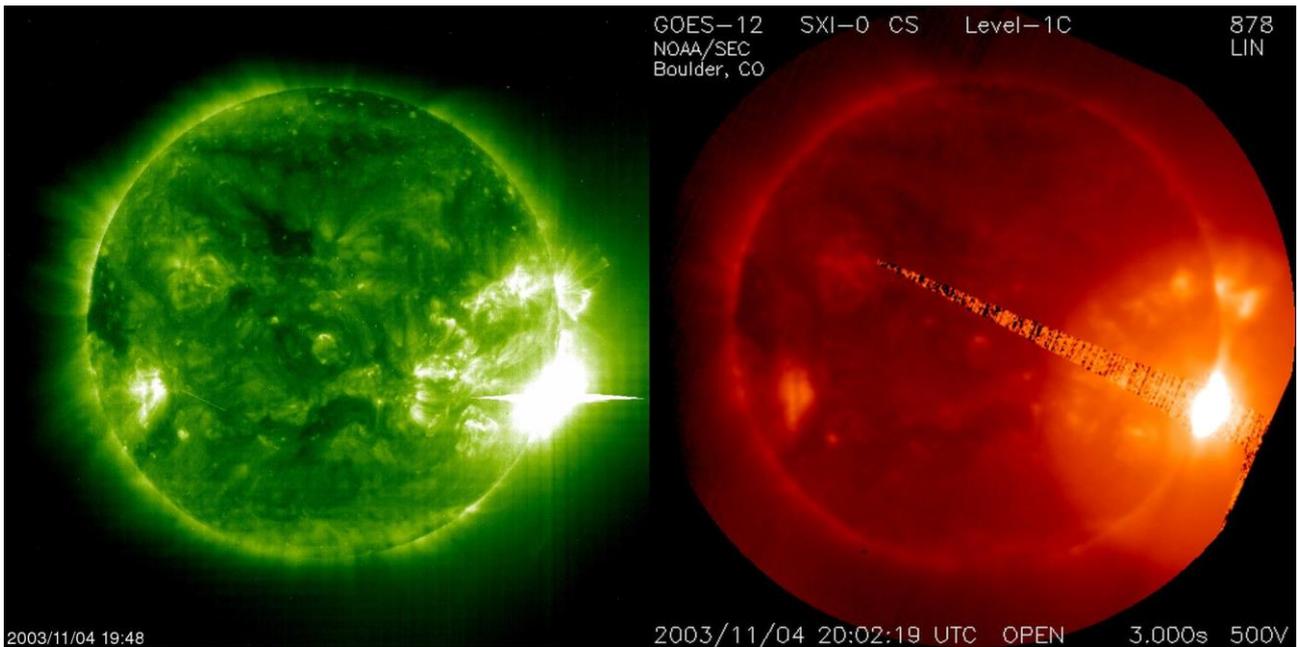
Observations du coronographe C2 à moyen champ (à gauche) et du coronographe C3 à grand champ (à droite) de SOHO le 28 Octobre 2003 lors de l'éruption exceptionnelle de classe X17 : remarquer les impacts des particules chargées sur les détecteurs quelques heures après. L'éjection est dirigée en partie vers la Terre. Le disque solaire est représenté par le rond blanc. SOHO/LASCO - ESA/NASA.



Observations en UV par l'instrument EIT à 19.5 nm de longueur d'onde sur SOHO-ESA/NASA le 28 Octobre 2003 : remarquer les impacts des particules chargées. L'éruption est proche du centre du disque (image en haut à gauche).



Observations du coronographe C3 à grand champ de SOHO/LASCO – ESA/NASA le 4 Novembre 2003 lors de l'éruption phénoménale de classe X28 : pas d'impact de particules sur le détecteur car elle n'est pas dirigée vers la Terre.



Observations en UV par l'instrument EIT à 19.5 nm de longueur d'onde sur SOHO-ESA/NASA le 4 Novembre 2003 lors de l'éruption de classe X28 (à gauche), et en rayons X par le télescope XRI de GOES/NASA (à droite) : l'éruption a lieu au bord solaire, contrairement au 28 Octobre. Les détecteurs sont saturés.

Glossaire

Champ électrique : champ créé par des charges électriques. L'action d'un champ électrique est d'accélérer ou de ralentir une particule chargée (unité : Volt/mètre)

Champ magnétique : champ créé par des courants électriques ou par un aimant permanent. L'action d'un champ magnétique est de dévier une particule chargée en mouvement (unité : Tesla)

Champ de pesanteur : champ créé par un astre à l'origine du poids d'un objet (unité : m/s^2 ; on dit aussi accélération de la pesanteur, ou gravité)

Charge électrique : toute charge, en valeur absolue, est un multiple de $1,6 \cdot 10^{-19}$ Coulomb. C'est la charge élémentaire du proton (positive) ou de l'électron (négative).

Chromosphère : couche à 8000 degrés épaisse de 2000 km entre la photosphère et la couronne

Courant électrique : circulation de particules chargées comme les électrons dans un milieu conducteur (unité : Ampère)

Couronne : enveloppe ionisée du Soleil le raccordant au milieu interplanétaire, donnant naissance au vent solaire, elle s'étend sur des millions de km

Effet Doppler : décalage de la fréquence d'une onde proportionnel à la vitesse de la source émettrice

Effet Zeeman : permet de mesurer un champ magnétique à distance sur un spectre atomique

Electron : particule élémentaire de charge négative (libre ou attachée à un atome ou un ion) de masse $9,1 \cdot 10^{-31}$ kg

Force de gravitation : force d'attraction entre deux astres distants

Force de Laplace : force subie par un courant électrique plongé dans un champ magnétique

Fréquence : nombre de vibrations par seconde d'une onde (unité : Hertz) ; l'énergie d'une onde est proportionnelle à la fréquence

Ion : atome ayant perdu ou gagné un ou plusieurs électrons, donc chargé

IR : rayonnement infra rouge, de 700 nm à 1 mm de longueur d'onde

Longueur d'onde : période spatiale d'une onde ; l'énergie d'une onde est inversement proportionnelle à la longueur d'onde. On la mesure en nanomètres (1 nm = 10^{-9} m) pour la lumière UV et visible, en microns pour l'IR, en mètres pour les ondes radio

Masse : quantité invariable caractérisant un objet (unité : kg) ; ne pas confondre avec le poids !

Neutrino : particule élémentaire neutre de masse très faible devant celle de l'électron, produite par les réactions de fusion au cœur du Soleil

Neutron : particule élémentaire non chargée du noyau atomique de même masse que le proton

Noyau : cœur de l'atome composé de protons et de neutrons

Onde électromagnétique : vibration périodique d'un champ électrique se propageant dans l'espace sans support matériel à la vitesse de la lumière

Photon : particule fictive de masse nulle se propageant à la vitesse de la lumière et transportant la même énergie que l'onde électromagnétique associée

Plasma : gaz ionisé composé de particules chargées (électrons, protons, ions) mais globalement neutre (autant de charges positives que négatives). C'est le 4^{ème} état de la matière dominant dans l'Univers !

Photosphère : surface du Soleil à 5750 degrés de 300 km d'épaisseur

Poids : force agissant sur un objet dans le champ de pesanteur d'un astre. C'est le produit de la masse (invariable) par l'accélération de la pesanteur (qui dépend de l'astre)

Proton : particule élémentaire de charge positive du noyau atomique de masse $1,67 \cdot 10^{-27}$ kg

Raie spectrale : dépression ou pic dans un spectre caractérisant la présence d'un élément chimique ; correspond à une transition entre deux niveaux d'énergie d'un atome en interaction avec un photon

Résolution spatiale : les plus petits détails discernables par un télescope (unité : seconde de degré)

Spectre : résultat de la décomposition de la lumière qui est constituée d'une infinité de radiations de fréquences différentes. Le spectre solaire se compose d'une composante continue (l'arc en ciel) et de raies spécifiques aux éléments chimiques de son atmosphère

Température absolue : toujours positive, c'est la température Celsius + 273,15 ; plus elle est élevée, et plus l'agitation des particules dans un gaz est rapide (unité : Kelvin)

UV : rayonnement ultra violet de 1 à 400 nm de longueur d'onde

Visible : rayonnement visible de 400 (bleu) à 700 nm (rouge) de longueur d'onde