



HAL
open science

Quelques phénomènes de l'activité solaire

Jean-Marie Malherbe

► **To cite this version:**

Jean-Marie Malherbe. Quelques phénomènes de l'activité solaire. Observatoire de Paris - PSL. 2024.
hal-04521601

HAL Id: hal-04521601

<https://cnrs.hal.science/hal-04521601>

Submitted on 26 Mar 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Quelques phénomènes de l'activité solaire

Par Jean-Marie Malherbe

Astronome émérite, Observatoire de Paris - Université PSL, France, 25 Mars 2024

Résumé

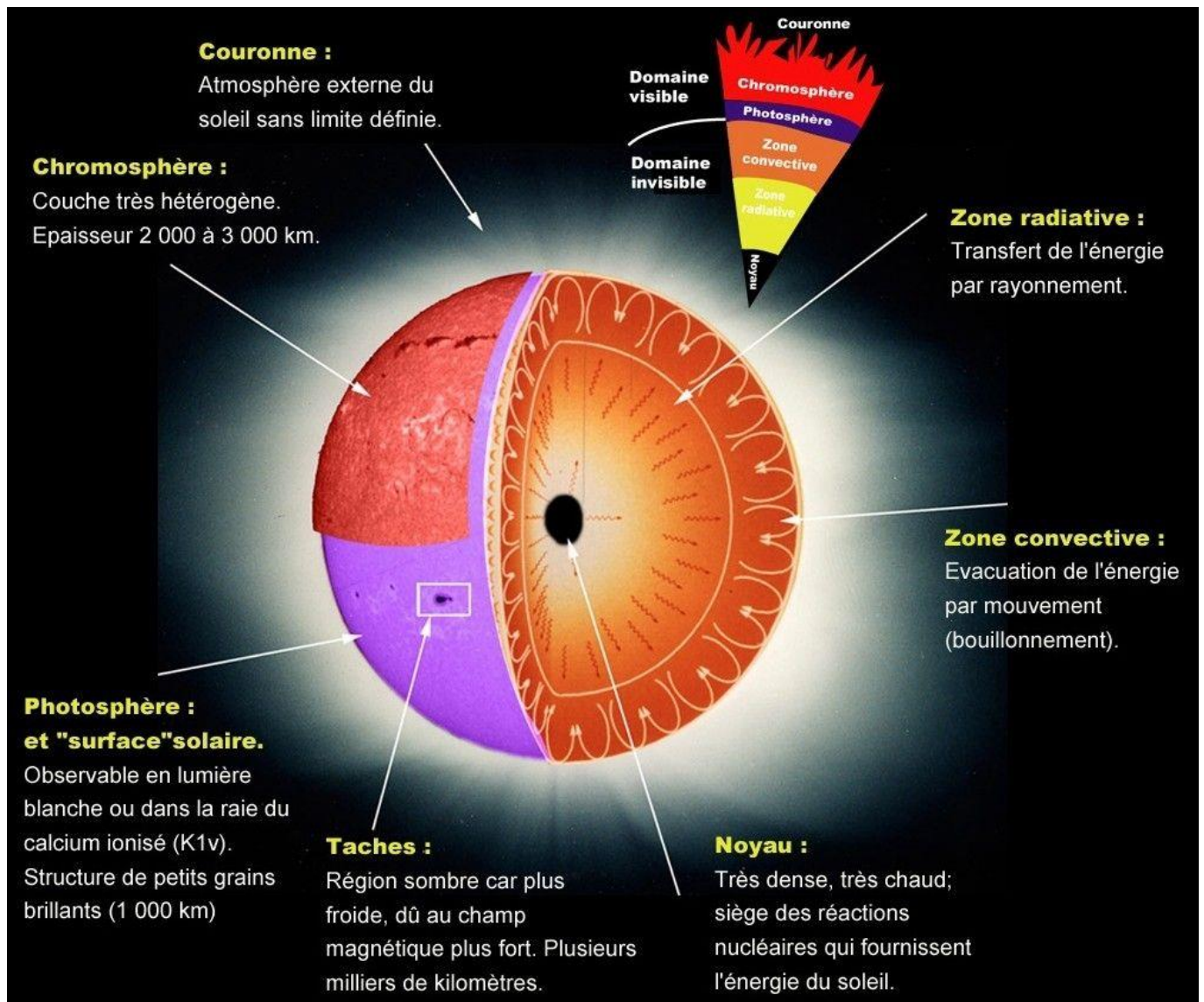
Ce document présente les principaux phénomènes liés à l'activité solaire et leur évolution, comme les taches, les filaments, les éruptions et éjections de masse coronale, en se basant sur des observations multi-longueur d'onde (visible, Ultra Violet) menées récemment par les instruments spatiaux SOHO (ESA/NASA), STEREO (NASA), HINODE (JAXA/NASA) et SDO (NASA).

Mots clef

Soleil, activité solaire, photosphère, chromosphère, couronne, taches, filaments, éruptions

1 - Introduction : qu'est-ce que le Soleil ?

Le Soleil ([figure 1](#)) est une étoile ordinaire parmi les 200 milliards que compte notre Galaxie, la Voie Lactée. Proche de nous, il présente un diamètre apparent sur le ciel d'un demi-degré (comme la Lune) : c'est la seule étoile qui révèle au télescope les détails de sa surface. C'est une sphère de gaz chauds qui produit en son cœur de l'énergie et rayonne dans l'espace la puissance de $3.86 \cdot 10^{26}$ W. La Terre reçoit ainsi 1365 W/m^2 soit au total $1.7 \cdot 10^{17}$ W, ou encore par an $5.5 \cdot 10^{24}$ J en énergie, soit 10000 fois l'énergie annuelle consommée par l'humanité. Il est composé de 90% d'Hydrogène et de 9% d'Hélium ; il existe beaucoup d'autres éléments plus lourds en trace, comme les métaux que l'on trouve sur Terre, mais à l'état gazeux. Une étoile particulière, qui a permis l'apparition de la vie sur Terre, ni trop proche, ni trop loin pour disposer de l'eau sous toutes ses phases. Au centre du Soleil, des réactions thermonucléaires de fusion transmutent l'Hydrogène en Hélium. La perte de masse correspondante $\Delta m = 4 \cdot 10^9 \text{ kg/s}$ produit l'énergie de l'étoile (relation d'Einstein $E = \Delta m C^2$), mais en fin de vie, le Soleil aura perdu moins de 1/1000 de sa masse. L'énergie traverse lentement l'étoile pour atteindre les couches superficielles où elle émerge sous forme d'ondes électromagnétiques. Le Soleil rayonne surtout en Ultra Violet (UV), lumière visible (VIS) et Infra Rouge (IR) ; cependant ses émissions couvrent tout le spectre électromagnétique, des rayons γ et X aux ondes radioélectriques. L'atmosphère de la Terre joue le rôle d'un filtre en nous protégeant des rayons dangereux (X, UV). L'observation du Soleil a commencé en 1610 avec la lunette de Galilée. L'intérieur est opaque. En lumière blanche, on découvre la photosphère, surface visible parsemée de taches sombres dont la nature magnétique fut identifiée en 1908. Le spectre continu du Soleil est proche de celui d'un corps noir à 5750 K, mais il est parsemé de milliers de raies d'absorption, signature des éléments chimiques. L'observation intrigante des taches occupa beaucoup les astronomes aux XVII^{ème} et XVIII^{ème} siècles. Au dessus de la photosphère se trouve la chromosphère (8000 K); plus ténue, elle n'apparaît qu'avec une technique spécialisée, la spectroscopie. C'est la raison pour laquelle elle ne devint accessible qu'au XIX^{ème} siècle. Au delà de la chromosphère, une atmosphère très diluée et chaude, la couronne ($2 \cdot 10^6$ K), diffuse très loin la lumière du disque (diffusion Thomson) et la basse couronne émet en UV au travers de raies d'atomes hautement ionisés comme le Fer (effet de température). Elle raccorde le Soleil au milieu interplanétaire dans lequel baignent les planètes et génère le vent solaire, flux rapide (500 km/s) de particules chargées (protons, électrons) qui échappent à son attraction (perte de masse de 10^9 kg/s). Il a fallu attendre les instruments du XX^{ème} siècle pour l'étudier en dehors des éclipses totales, notamment avec l'avènement des télescopes UV en orbite. Il y a donc une remontée de température dans la couronne, à cause de la dissipation d'ondes acoustiques émanant de la surface ; mais ce n'est le cas ni de la densité, ni de la pression (au centre du Soleil, c'est le confinement gravitationnel à 10^{16} Pa qui permet la fusion de 4 atomes d'Hydrogène en Hélium, mais la pression n'est plus que de 1000 Pa dans la photosphère, 1 Pa dans la chromosphère, et une petite fraction de Pa dans la couronne ; la densité suit une courbe similaire).



Masse : $2 \cdot 10^{30}$ kg \approx 333 000 fois la Terre
 Diamètre : 1 392 000 km \approx 109 fois la Terre
 Diamètre angulaire sur le ciel : 0.53°
 Distance moyenne : 149,6 millions de km = 1 Unité Astronomique
 Densité moyenne : 1,4 (Terre = 5.52, eau = 1)
 Accélération de la pesanteur : 275 ms^{-2} (Terre 9.81 ms^{-2})
 Température au centre : 15 millions de degrés
 Température de surface (photosphère) : 5 750 degrés
 Température de la couronne (atmosphère externe) : 2 millions de degrés
 Vent solaire : 400 km/s à la Terre
 Perte de masse : 1 million de tonnes par seconde
 Luminosité (puissance rayonnée dans l'espace) : $3,86 \times 10^{26}$ W
 Puissance reçue par la Terre : $1\,362 \text{ W/m}^2$
 Composition chimique (nombre d'atomes) : hydrogène 94 %, hélium 6 %, traces d'autres éléments
 Composition chimique (en masse) : hydrogène 73 %, hélium 25 %, autres éléments 2 %
 Combustible : hydrogène (fusion en hélium dans le cœur)
 Rotation différentielle : 26 jours à l'équateur, 32 jours aux pôles
 Cycle d'activité : 11 ans
 Cycle magnétique : 22 ans
 Champ magnétique des taches : 0.2 Tesla
 Age : 5 milliards d'années
 Durée de vie : 10 milliards d'années

Figure 1 : la structure du Soleil et ses principales caractéristiques (crédit OP)

Le Soleil rayonne dans toutes les longueurs d'onde du spectre électromagnétique. La [figure 2](#) le montre pour le 28 Octobre 2003, où l'une des plus puissantes éruptions de l'histoire moderne se produisit.

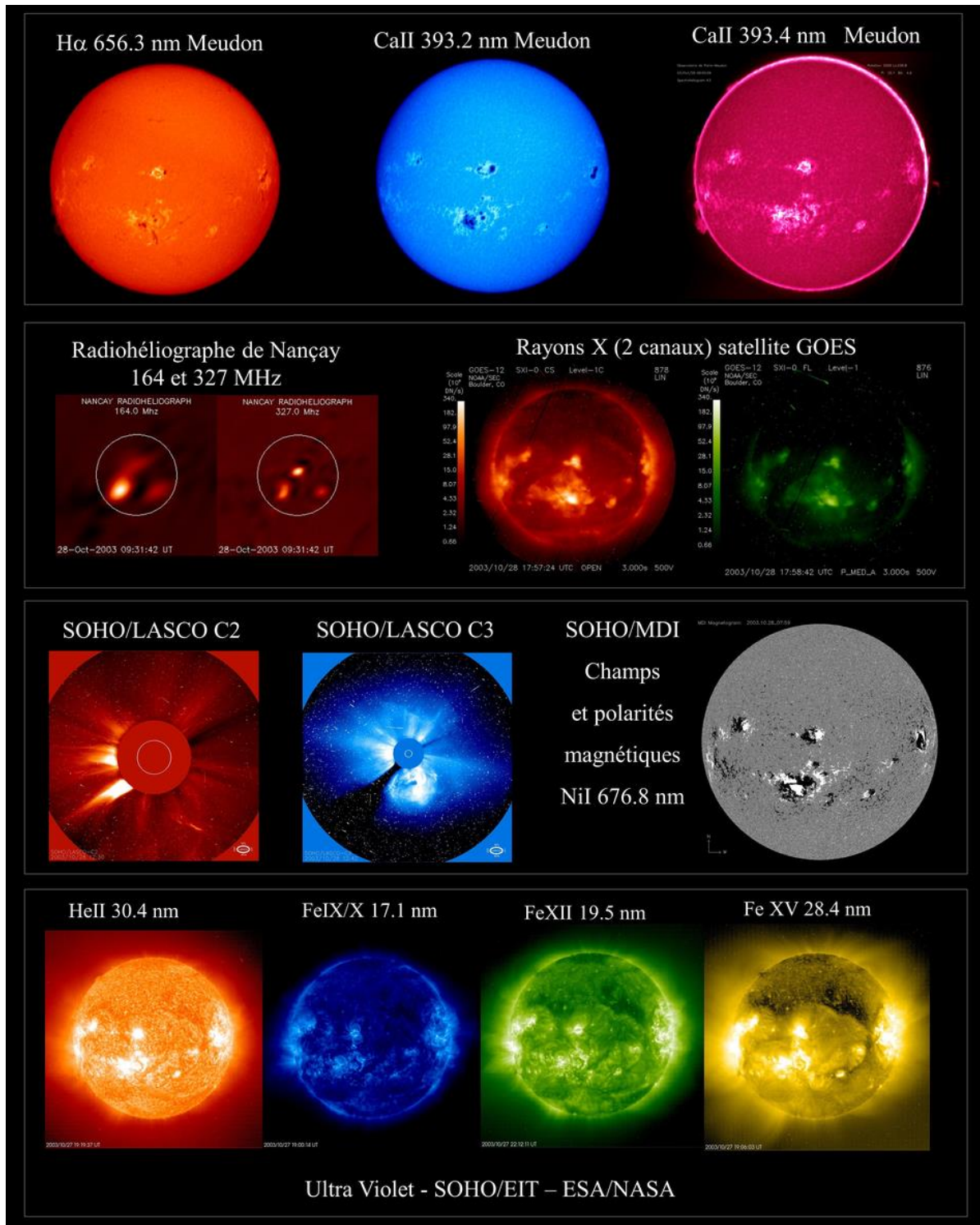


Figure 1 : 1^{ère} rangée : au sol à Meudon, on observe la photosphère et la chromosphère dans la fourchette 5000 – 8000 K. 2^{ème} rangée : les rayonnements radio des particules en mouvement (Nançay) ; et dans l'espace, les rayons X des zones éruptives les plus chaudes (10^7 K, satellite GOES/NASA). 3^{ème} rangée : les coronographes spatiaux en lumière blanche montrent les éjections de matière loin du Soleil lors des éruptions (SOHO/LASCO-ESA/NASA) ; les champs magnétiques de surface (blanc/noir selon la polarité entrante ou sortante) sont observés par des instrument appelés « magnétographes » (SOHO/MDI-ESA/NASA). 4^{ème} rangée : la basse couronne de 80000 K à $2 \cdot 10^6$ K se dévoile en UV selon les raies ou le degré d'ionisation d'un même élément comme le Fer (SOHO/EIT-ESA/NASA). Le Fer noté XV veut dire qu'il a perdu 14 électrons. De même, HeII désigne l'Hélium ayant perdu un électron. Nota : il s'agit de fausses couleurs dont l'intérêt est juste mnémorique pour un type d'observation.

Le Soleil n'est pas immuable : il est soumis à un cycle d'activité de 11 ans. Le champ magnétique est lui aussi variable avec une période de 22 ans. La [figure 3](#) montre quelques cycles de 11 ans. Les maxima solaires sont marqués par la présence de taches et de vastes zones brillantes autour (facules photosphériques, plages chromosphériques), structures baignées de champs magnétiques (intense dans les taches avec 0.2 T, modéré dans les plages). L'irradiance totale varie peu au cours du cycle (1 W/m², soit moins de 1/1000). Par contre l'irradiance spectrale (en UV et X) présente de fortes variations comme le montre la [figure 4](#).

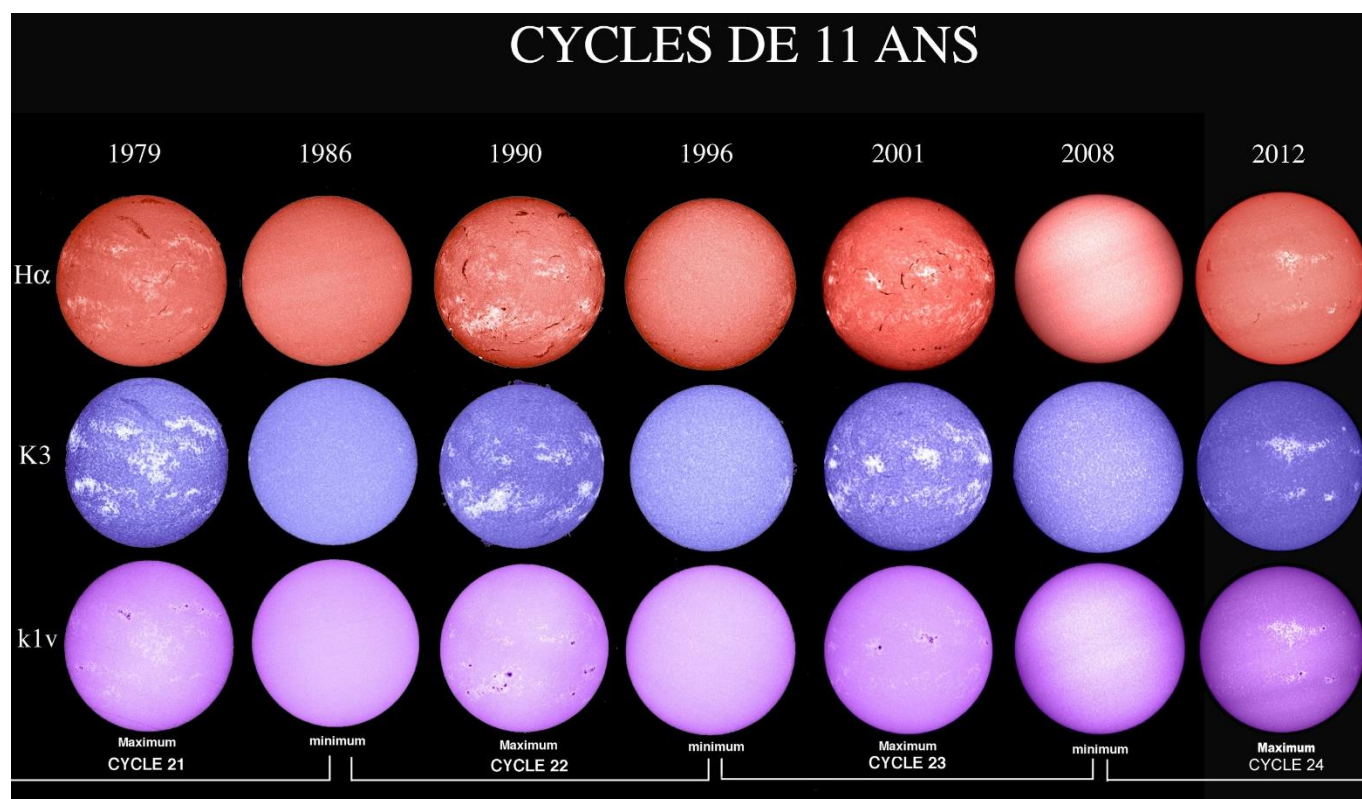


Figure 3 : cycles d'activité solaire (succession de minima et de maxima) observés à Meudon dans trois longueurs d'onde différentes. La montée du cycle dure 4 ans, la descente 7 ans. Crédit OP.

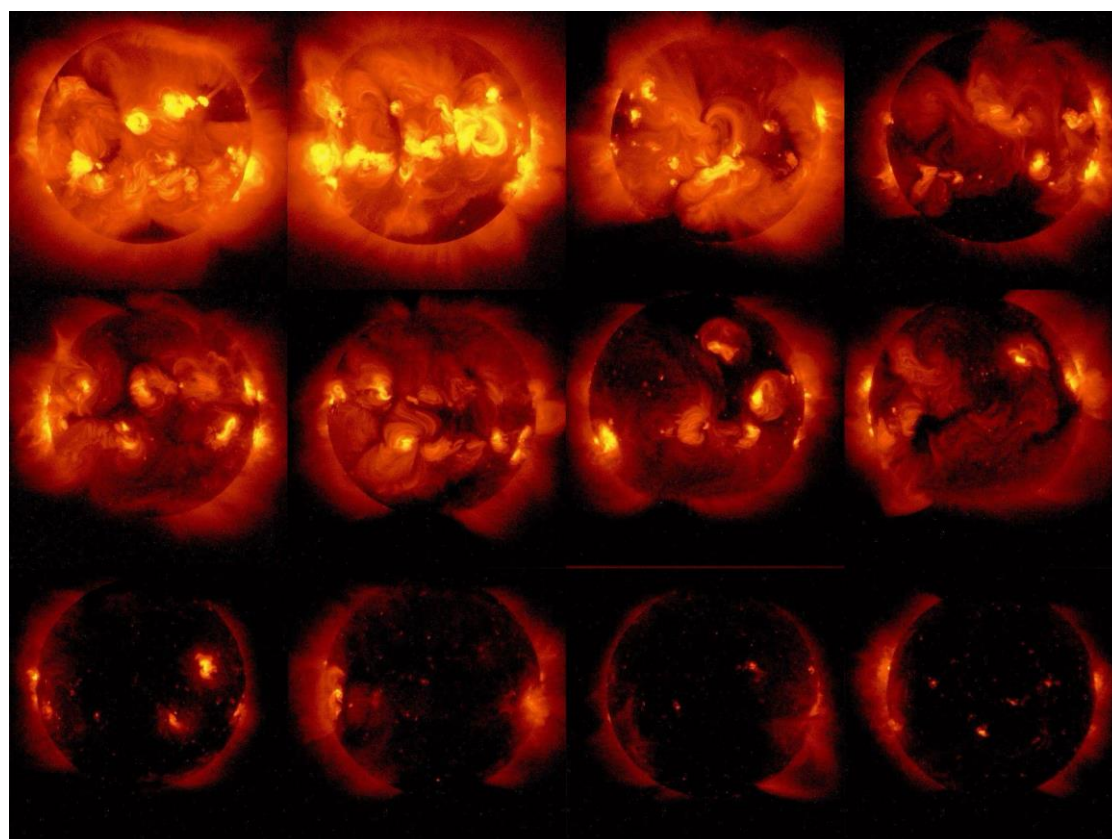


Figure 4 : cycle d'activité solaire en rayons X du maximum (en haut) au minimum (en bas). La variation d'irradiance X est beaucoup plus forte que dans le domaine visible, où se concentre 50% du flux lumineux solaire. Crédit YOHKOH, JAXA/NASA.

Les champs magnétiques solaires sont mesurés à distance sur des raies atomiques sensibles à l'effet Zeeman, comme les nombreuses raies du Fer neutre. Il se manifeste sous la forme d'un dédoublement des raies en deux composantes, l'écart entre les deux étant proportionnel au champ magnétique. Ce phénomène de mécanique quantique (modélisable partiellement en mécanique classique) a été découvert par le physicien hollandais Zeeman à la fin du XIX^{ème} siècle, puis aperçu dans les taches solaires par l'astronome américain G. Hale en 1908. Le champ magnétique global du Soleil ressemble à celui d'un dipôle avec renversement de la polarité N/S tous les 11 ans au maximum solaire, d'où un cycle magnétique de 22 ans, dévoilé aussi par G. Hale vers 1920. La [figure 5](#) montre ce cycle magnétique. Le magnétisme des taches, beaucoup plus intense, se superpose à celui du dipôle. Au début du cycle (4 ans avant le maximum), les taches qui émergent ont une polarité opposée à celle de leur hémisphère. La migration lente de leur champ vers les pôles annihile progressivement le champ polaire qui se renverse alors au maximum solaire ([figure 6](#)). Les taches sont souvent des groupes bipolaires, formant des grandes boucles magnétiques chaudes confinant le plasma, révélées par les raies UV du Fer ionisé de la basse couronne chaude (instruments imageurs EIT/SOHO et AIA/SDO). Le cycle solaire est lié à la rotation différentielle de l'étoile qui tourne plus vite à l'équateur (26 jours) qu'aux pôles (31 jours). Il existe aussi une circulation méridienne vers les pôles (environ 10 m/s) à l'origine des inversions des champs polaires, par transport, tous les 11 ans.

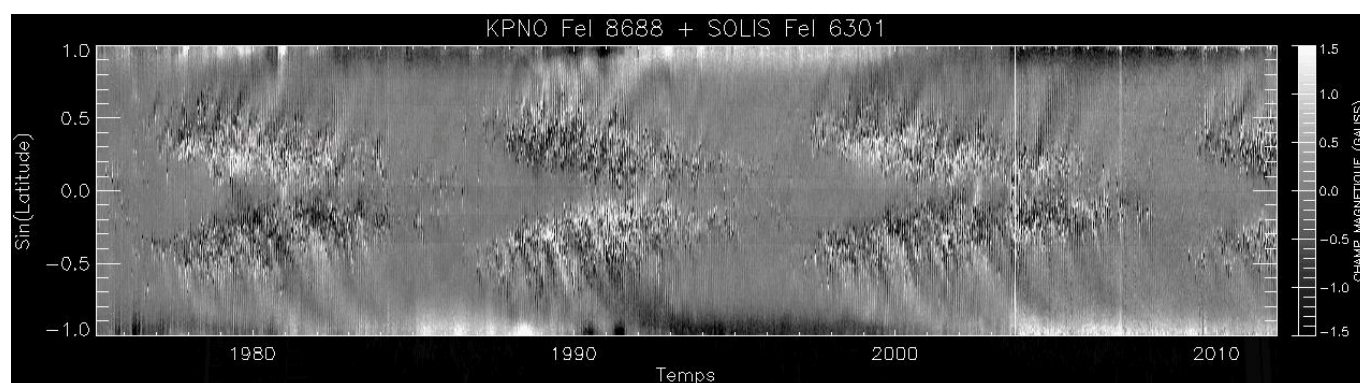


Figure 5 : cycles magnétiques mesurés à Kitt Peak (USA). En abscisse, le temps, et en ordonnée, le sinus de la latitude. Le pôle N est en haut, le pôle S en bas. Les polarités magnétiques sont en blanc/noir. La polarité des pôles se renverse vers 1980, 1991, 2002, 2013, soit 4 ans après le début d'un cycle, pendant le maximum. Les « ailes de papillon » représentent la polarité des taches ; elles naissent à haute latitude au début du cycle et durent quelques semaines. Quand le cycle avance, elles se forment à basse latitude.

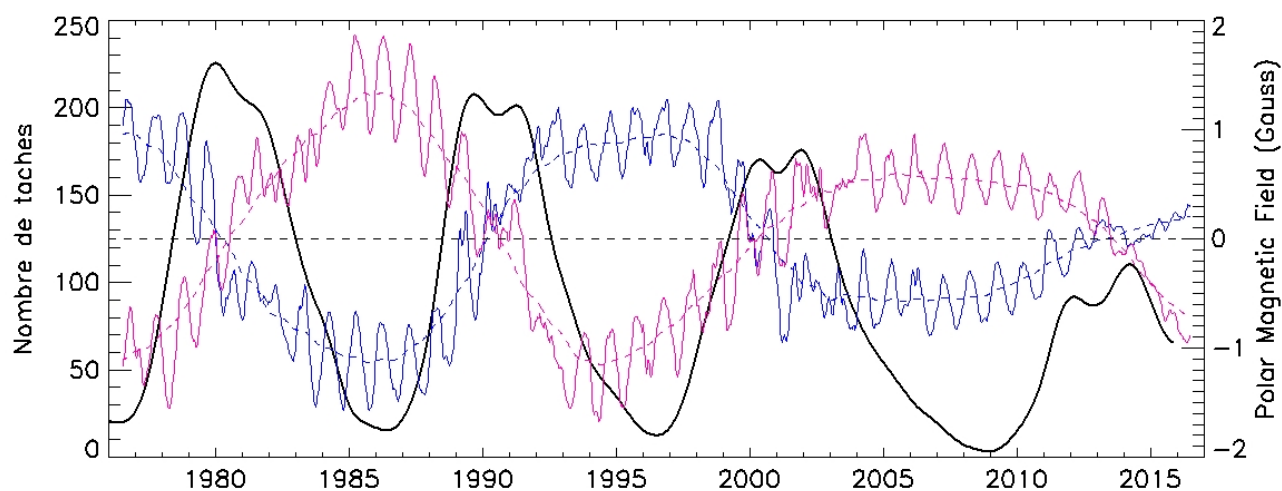
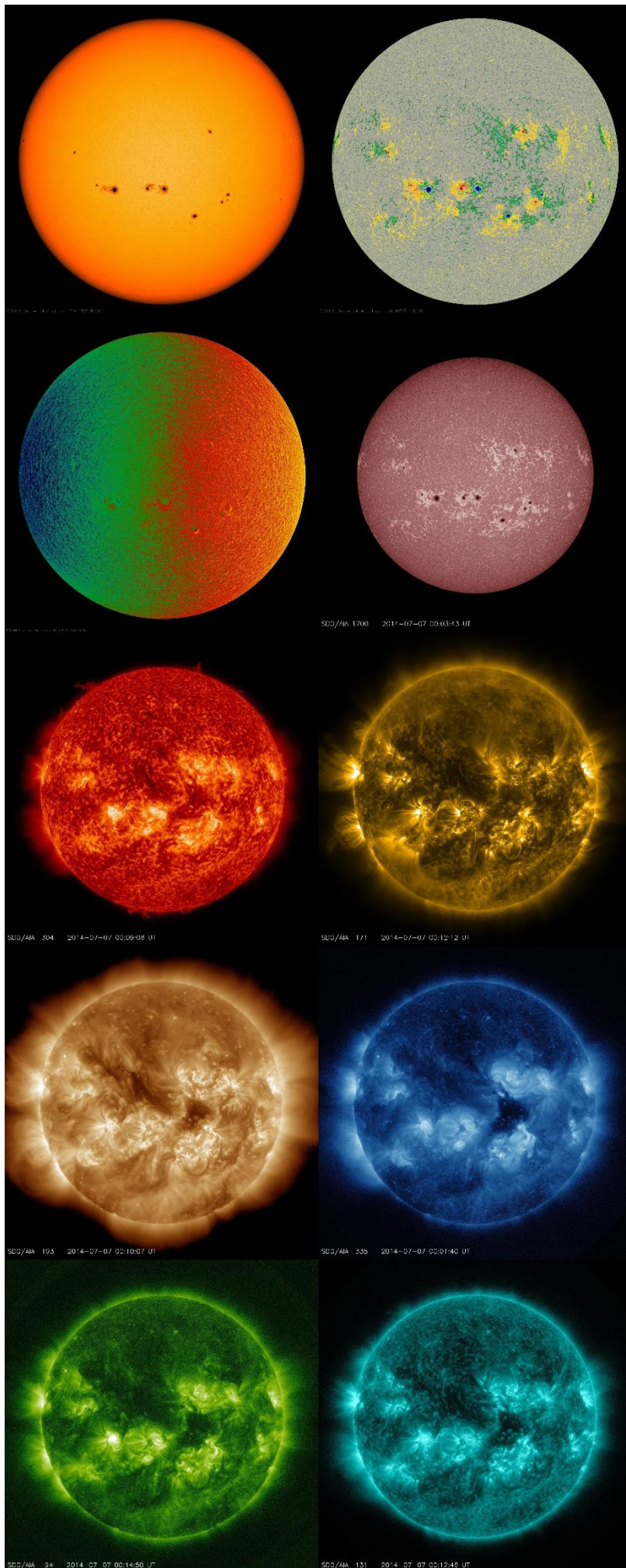


Figure 6 : champ magnétique polaire (en rouge et bleu pour les pôles N et S) mesurés à Wilcox (USA). En abscisse, le temps, et en ordonnée, la valeur du champ moyen ($1 \text{ G} = 10^{-4} \text{ T}$). La courbe noire représente le nombre des taches (Observatoire Royal de Bruxelles) et montre que le champ polaire s'inverse au maximum solaire. Les petites oscillations annuelles sont liées à l'orbitographie de la Terre.



La [figure 7](#) donne une idée de la richesse des observations faites toutes les minutes par le satellite SDO/NASA. Ces observations sont complétées par celles de SOHO (ESA/NASA) en ce qui concerne la couronne blanche à grand champ (jusqu'à 30 rayons solaires, [figure 8](#)) et par celles de STEREO qui voyage à peu près au niveau de l'orbite terrestre mais voit le Soleil sous un angle de vue différent, parfois même la face cachée ; c'est le cas de la [figure 8](#) où STEREO était diamétralement opposé à la Terre en 2015, donc derrière le Soleil à 300 millions de km.

Figure 7 : un aspect typique du Soleil le 7 Juillet 2014 vu par le satellite américain SDO/NASA.

Ligne 1 : Continu de la raie du fer neutre à 6173 Å (photosphère) et magnétogramme (jaune/rouge et bleu/vert pour les polarités magnétiques opposées). Les taches et les facules s'organisent en régions bipolaires, voire plus complexes.

Ligne 2 : Dopplergramme de la photosphère dans la raie du fer neutre à 6173 Å (jaune/rouge et bleu/vert pour les vitesses d'éloignement et d'approche). On voit la rotation solaire. Continu UV à 1700 Å de la chromosphère.

Lignes 3, 4, 5 : Images en UV aux longueurs d'onde de 304, 171, 193, 335, 94 et 131 Å, respectivement les raies de HeII (80000 K), FeIX (0.6 MK), FeXII (1 MK), FeXVI (2.5 MK), FeXVIII (6.3 MK) et FeXX (10 MK).

Les couleurs sont fausses et purement mnémoniques (les images étant monochromatiques). HeII signifie Helium ionisé 1 fois ; FeXX signifie Fer ionisé 19 fois. Plus le degré d'ionisation est élevé, et plus la température est forte. La raie de l'Helium correspond à la transition chromosphère/couronne où la température passe de 10000 K à 1 MK en quelques dizaines de km. Les raies du Fer ionisé sont celles de la couronne chaude à plusieurs MK.

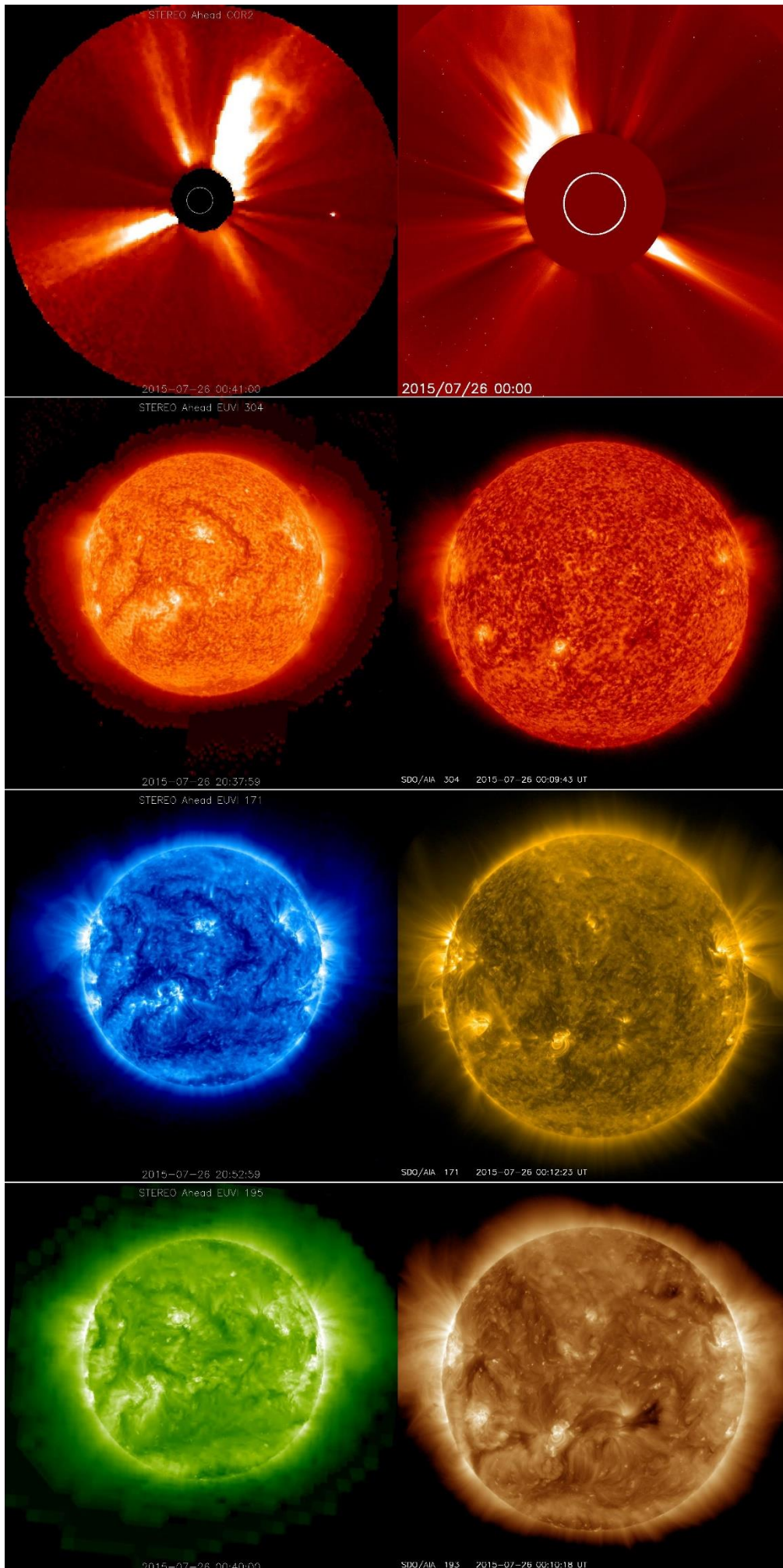


Figure 8 : un aspect très rare du Soleil le 26 Juillet 2015 vu par le satellite américain SDO/NASA depuis l'orbite terrestre et par la sonde STEREO A située à l'opposé du Soleil, donc à 300 millions de km de la Terre et dévoilant la face **cachée** du Soleil. 100% de la surface solaire était donc observée à ce moment exceptionnel.

Ligne 1 : les coronographes de STEREO (gauche) et de SOHO (droite) observent la couronne lointaine, STEREO est derrière le Soleil, SOHO devant (ce qui provoque l'inversion droite/gauche des deux images et jets coronaux)

Ligne 2 : STEREO (gauche) et SDO (droite) observent en UV les deux faces du Soleil (HeII 304 Å à 80000 K)

Lignes 3 : Images en UV à la longueur d'onde de 171 Å, raie FeIX (0.6 MK), on voit les deux faces du Soleil (STEREO à gauche, SDO à droite).

Lignes 3 : Images en UV à la longueurs d'onde de 195 Å, raie FeXII (1.0 MK), deux faces du Soleil visibles simultanément (STEREO à gauche, SDO à droite).

Les couleurs sont fausses et purement mnémoniques (les images étant monochromatiques, hormis celles de la ligne 1 qui sont en lumière blanche).

2 - La surface du Soleil ou photosphère : granulation et taches

Le satellite HINODE (JAXA/NASA) a permis d'observer la Soleil en haute résolution angulaire (0.3'' de pouvoir séparateur ou 200 km, dans le bleu) durant 10 ans, de 2006 à 2016. La surface solaire est appelée photosphère, épaisse de 300 km ; elle est à 5800 K. Elle est parsemée de petites cellules convectives, la granulation, de courte durée de vie (10 minutes). Cinq millions de granules (taille moyenne 1.5'' ou 1000 km) couvrent le Soleil ([figure 9](#)). La matière est montante dans les granules et descendante autour (1 km/s environ). La granulation est la signature des phénomènes à l'œuvre dans la zone convective du Soleil, sous jacente et opaque (de 0.85 à 1.0 rayon solaire). La granulation est parsemée d'une myriade de tubes magnétiques minces et concentrés ([figure 10](#)) à la limite du pouvoir séparateur des instruments. Ces tubes de flux atteignent 0.1 T, sont presque uniformément répartis, et dessinent les contours de la supergranulation où ils sont plus nombreux (30'' ou 20000 km). Les supergranules sont liés aux mouvements horizontaux des gros granules explosifs et forment un réseau ou une maille à plus grande échelle présente partout sur le Soleil, avec des durées de vie bien plus longues (24 heures) que la granulation.

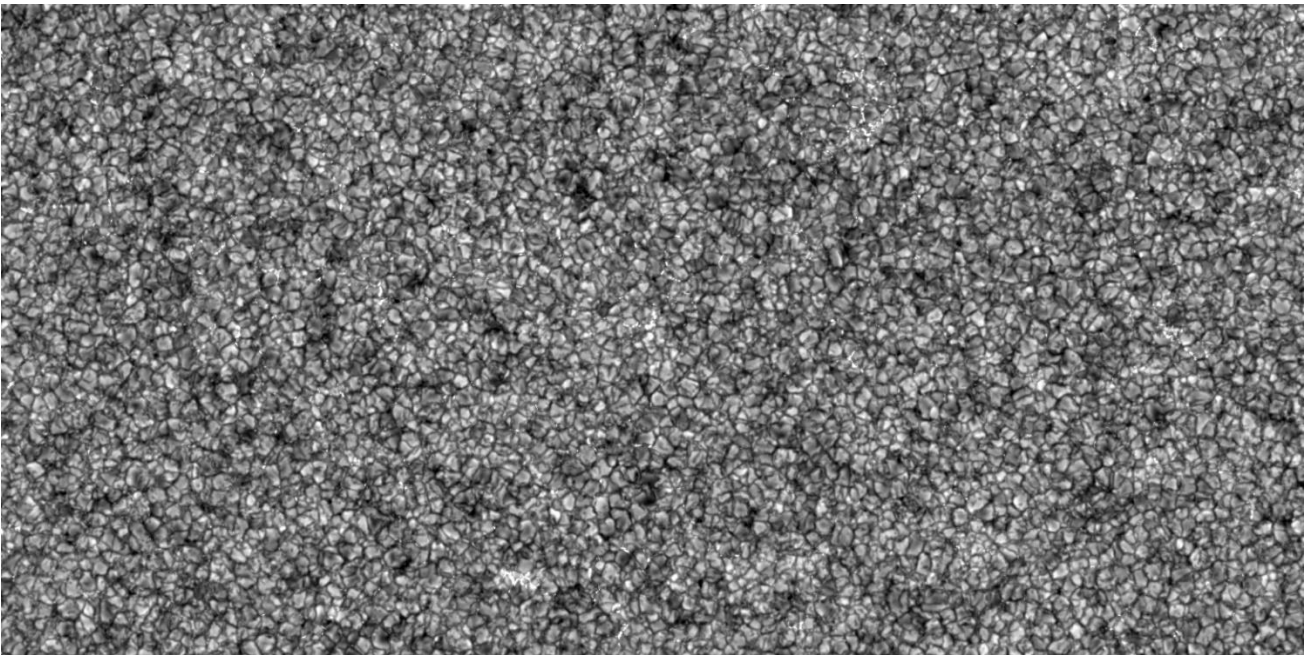


Figure 9 : granulation observée par le SOT/BFI sur HINODE (filtre sur la bande CN à 3883 Å).

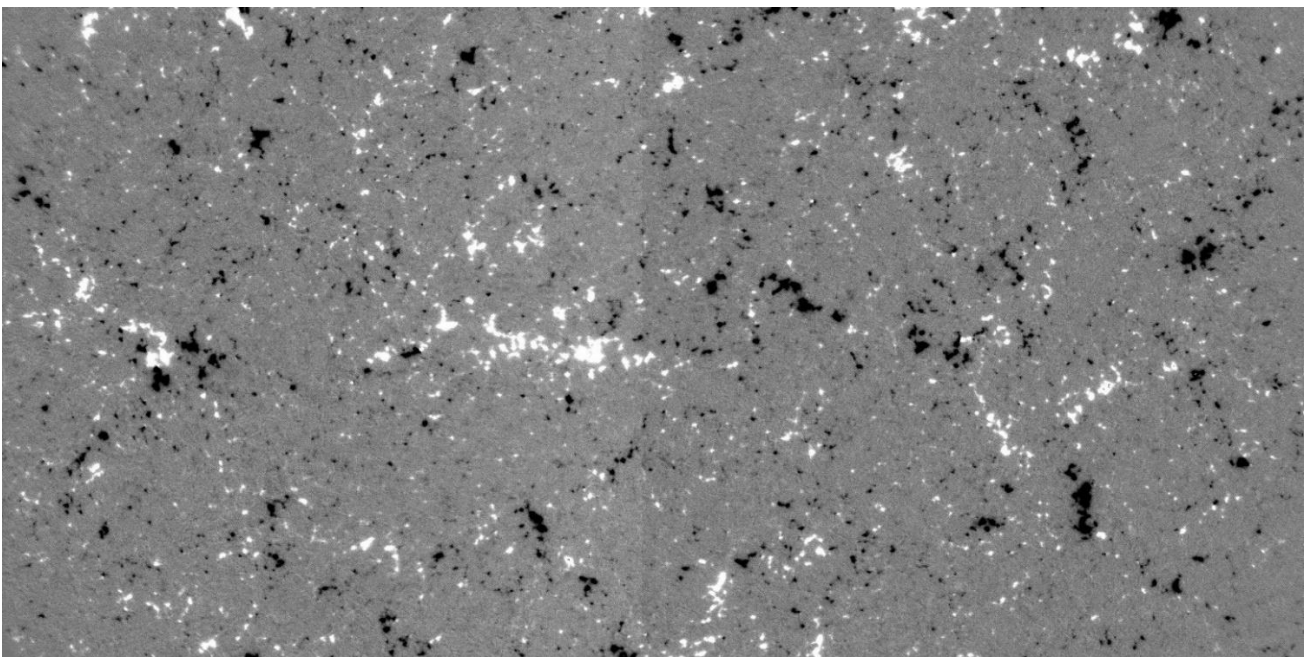


Figure 10 : petites polarités magnétiques observée par le SOT/NFI sur HINODE (effet Zeeman).

La photosphère contient aussi les taches, dont le nombre est cyclique. Les taches naissent en quelques jours, à haute latitude au début d'un nouveau cycle, avec une polarité opposée de celle de leur hémisphère ; au fur et à mesure de l'avancée du cycle de 11 ans, elles apparaissent à des latitudes proches de l'équateur (diagramme aile de papillon, [figure 5](#)). Les taches ont un champ magnétique B intense, jusqu'à 0.2 T. Elles stockent une grande quantité d'énergie magnétique ($B^2/2\mu_0$ par unité de volume). La [figure 11](#) montre la naissance d'un groupe de taches puis son évolution durant la rotation du Soleil pendant 6 jours.

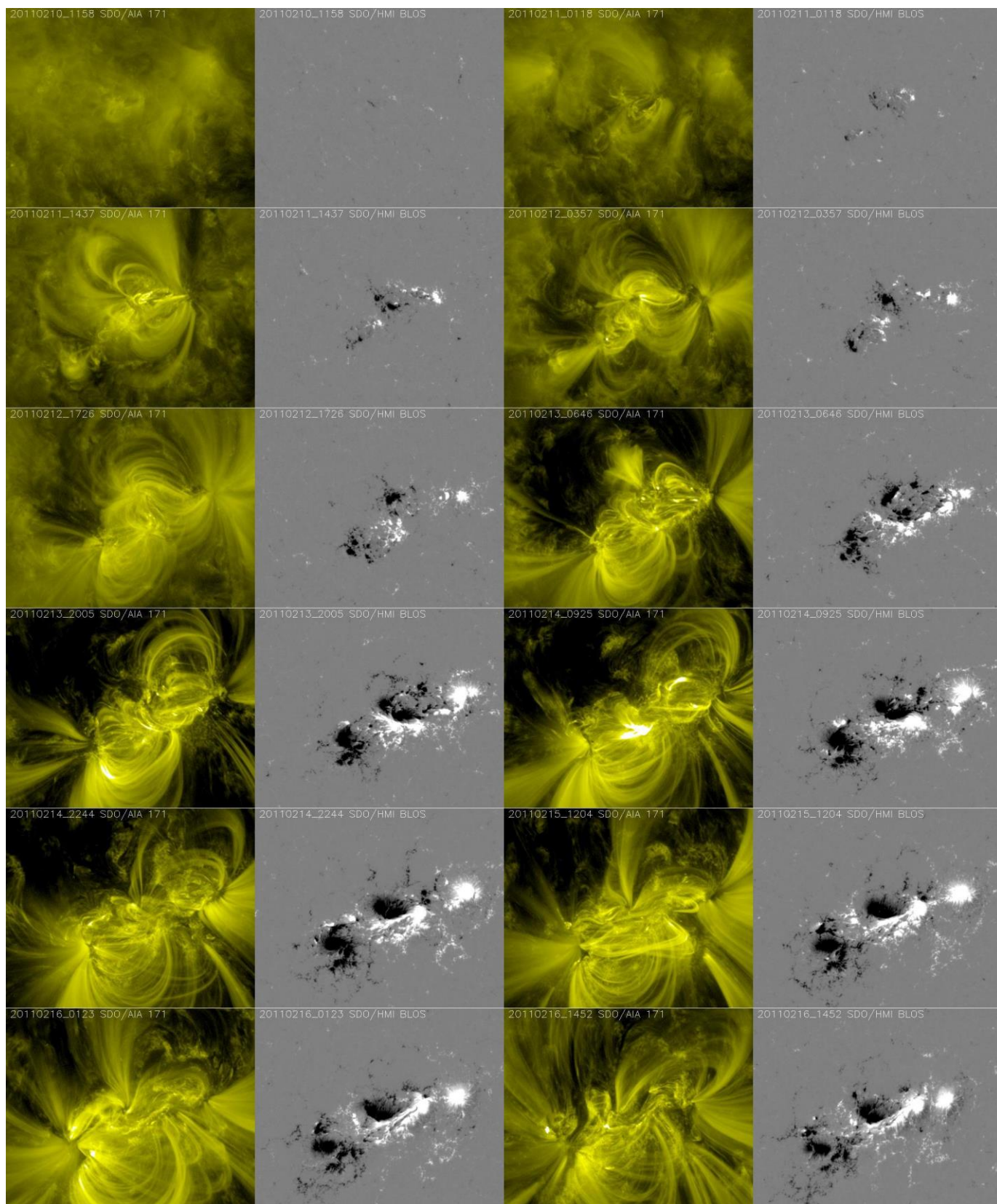


Figure 11 : naissance d'un groupe de taches. En jaune, plasma à 0.6 MK avec de grandes boucles magnétiques joignant les taches, dont les polarités magnétiques sont en noir/blanc (SDO/AIA et HMI).

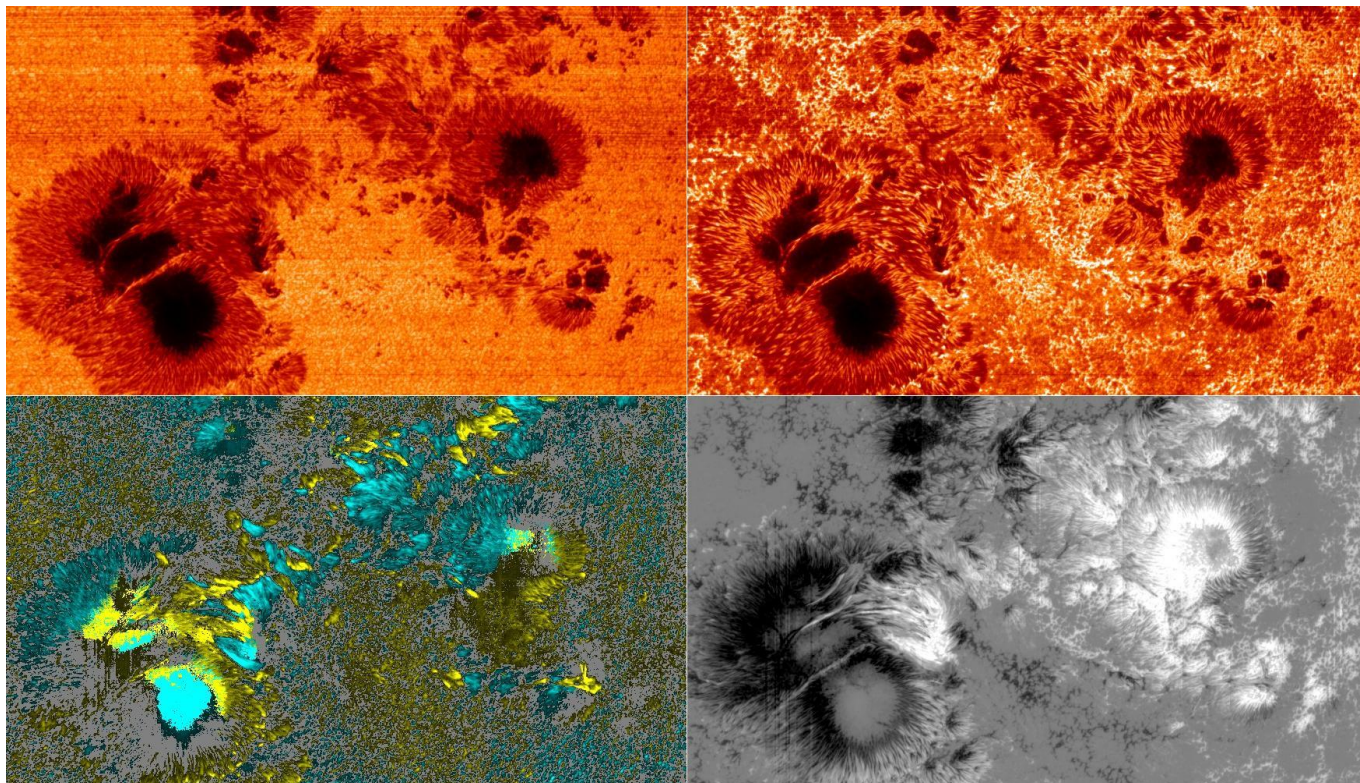


Figure 12 : groupe de taches. En bleu/jaune, vitesses Doppler (projection de la vitesse sur la ligne de visée). En noir/blanc, polarités magnétiques par effet Zeeman (Raie FeI 6302 Å, HINODE SOT/SP).

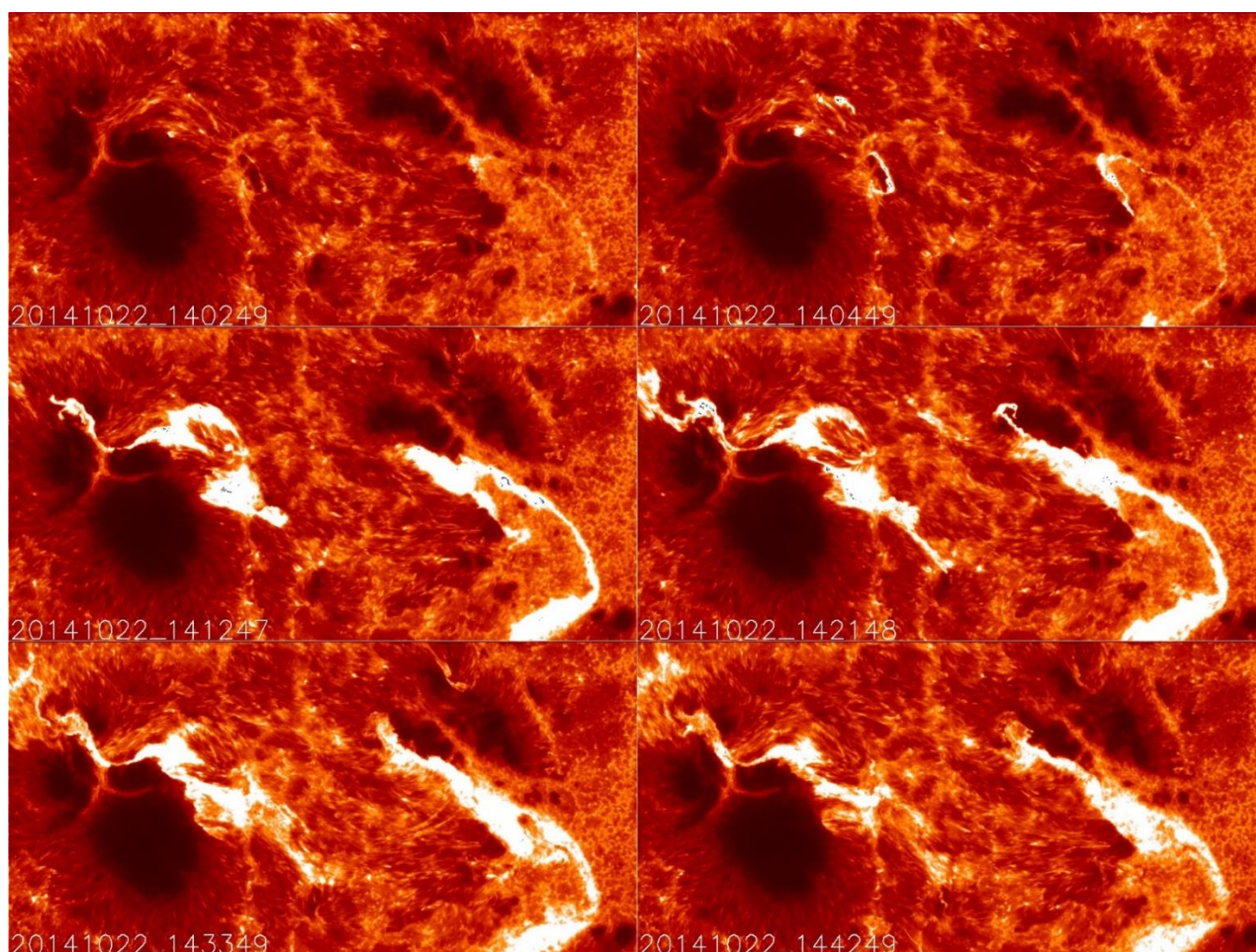


Figure 13 : Eruption dans un groupe de taches (SDO/AIA, HeII 304 Å à 80000 K). L'embrillancement est soudain (phase de flash vers 14H12), mais la phase graduelle dure ensuite plusieurs heures.

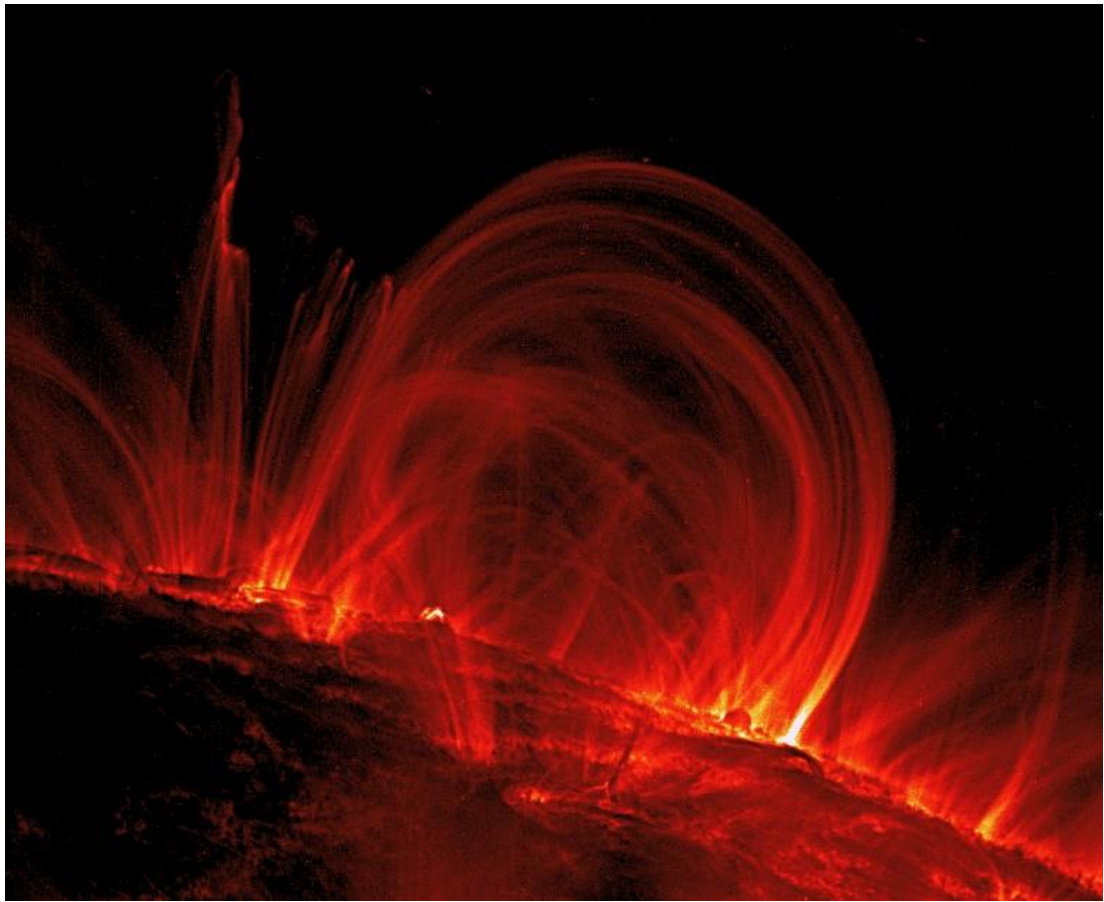


Figure 14 : grandes boucles magnétiques entre régions actives en UV à 1 MK (TRACE/NASA).

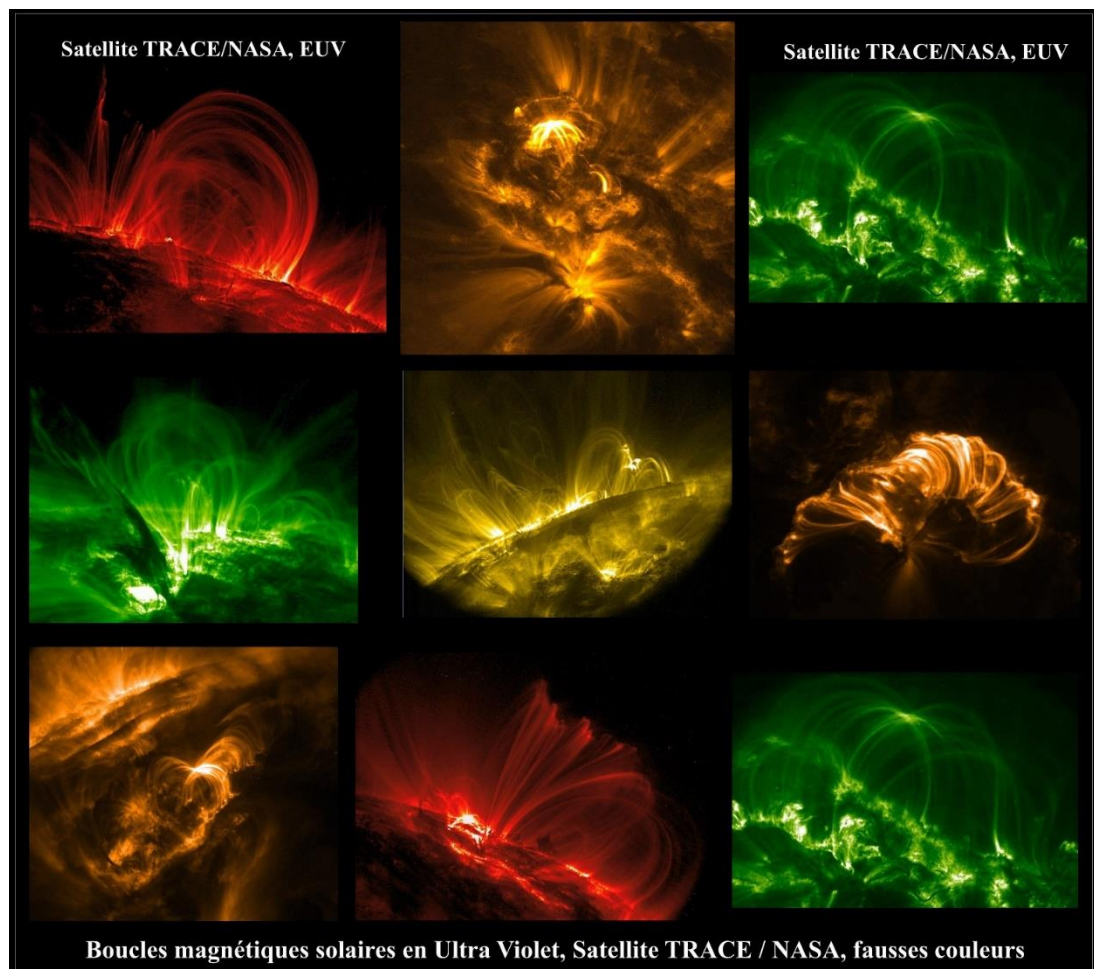


Figure 15 : exemples de grandes boucles magnétiques en UV à plusieurs MK (TRACE/NASA).

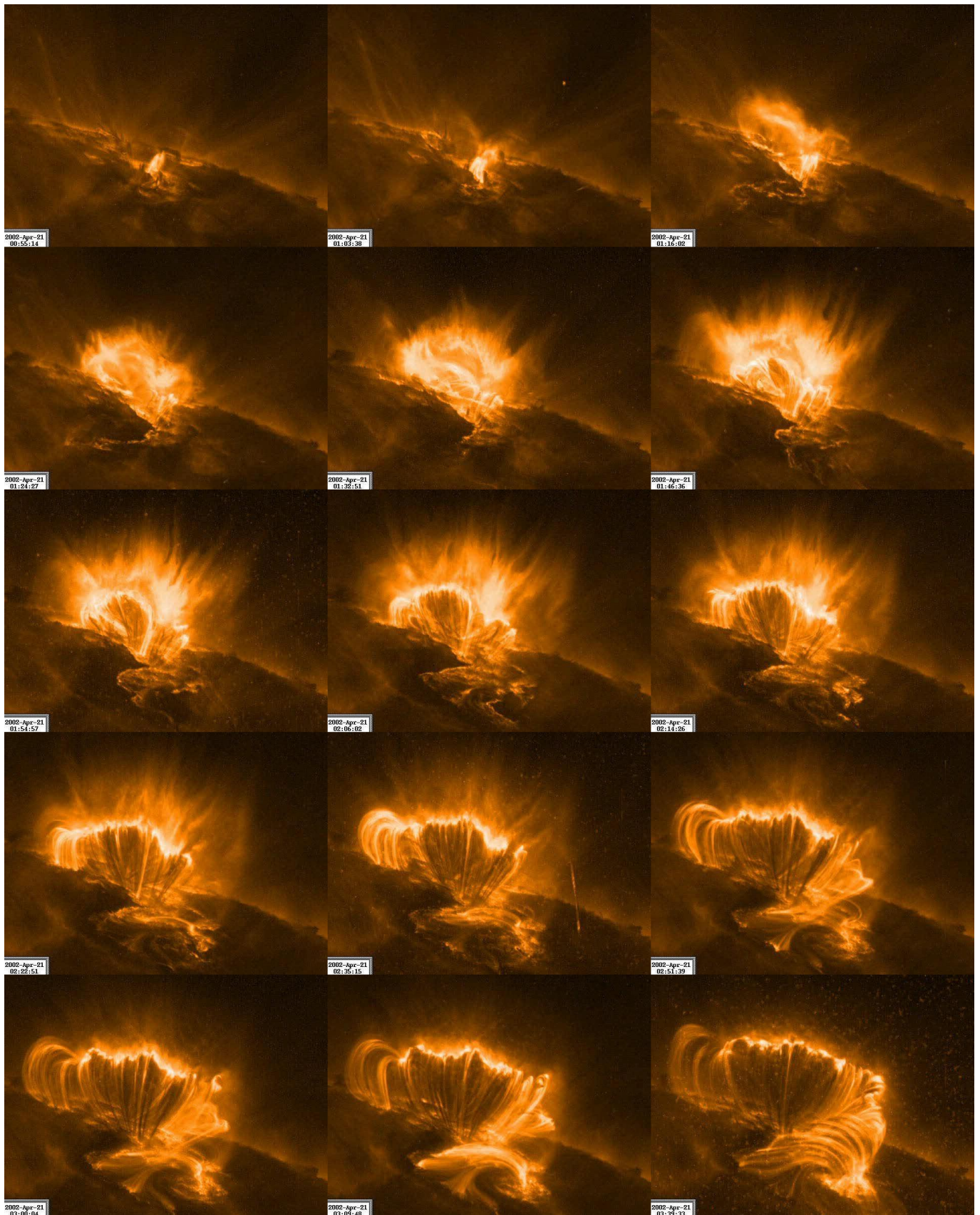


Figure 16 : éruption en UV avec formation d'une arcade magnétique à plus de 1 MK (TRACE/NASA).

La configuration magnétique des taches, qui stockent l'énergie magnétique ($B^2/2\mu_0$ par unité de volume, [figure 12](#)), peut devenir instable notamment sous l'action de mouvements photosphériques (cisaillement, torsion) ; il se produit alors une éruption convertissant l'énergie magnétique excédentaire en énergie cinétique (éjections) et chaleur (embrillancements, [figure 13](#)). Les taches sont surmontées de grandes boucles de champ magnétique qui piègent le plasma coronal (elles sont chaudes et denses, font plus

de 100 000 km de haut, **figures 14 et 15**). Une éruption fait souvent apparaître deux filets brillants (**figure 13**) surmontés dans la couronne par une arcade magnétique chaude en évolution rapide (**figure 16**). Les boucles peuvent s'ouvrir et provoquer une éjection de matière. Les éruptions solaires libèrent, selon leur puissance (elles sont rangées en classes, B, C, M et X, au sein d'une échelle logarithmique), de 10^{21} à 10^{24} J, et on estime que qu'elles ne peuvent excéder $5 \cdot 10^{25}$ J. Seule une fraction de l'énergie magnétique disponible (de l'ordre de 10%) est libérée. La matière éjectée retombe pour partie sur le Soleil et pour partie se dilue dans le milieu interplanétaire (cela dépend de sa vitesse par rapport à celle de libération du Soleil, 600 km/s). Pour comparaison, l'humanité consomme environ 10^{21} J en énergie annuelle.

3 – La chromosphère et les filaments

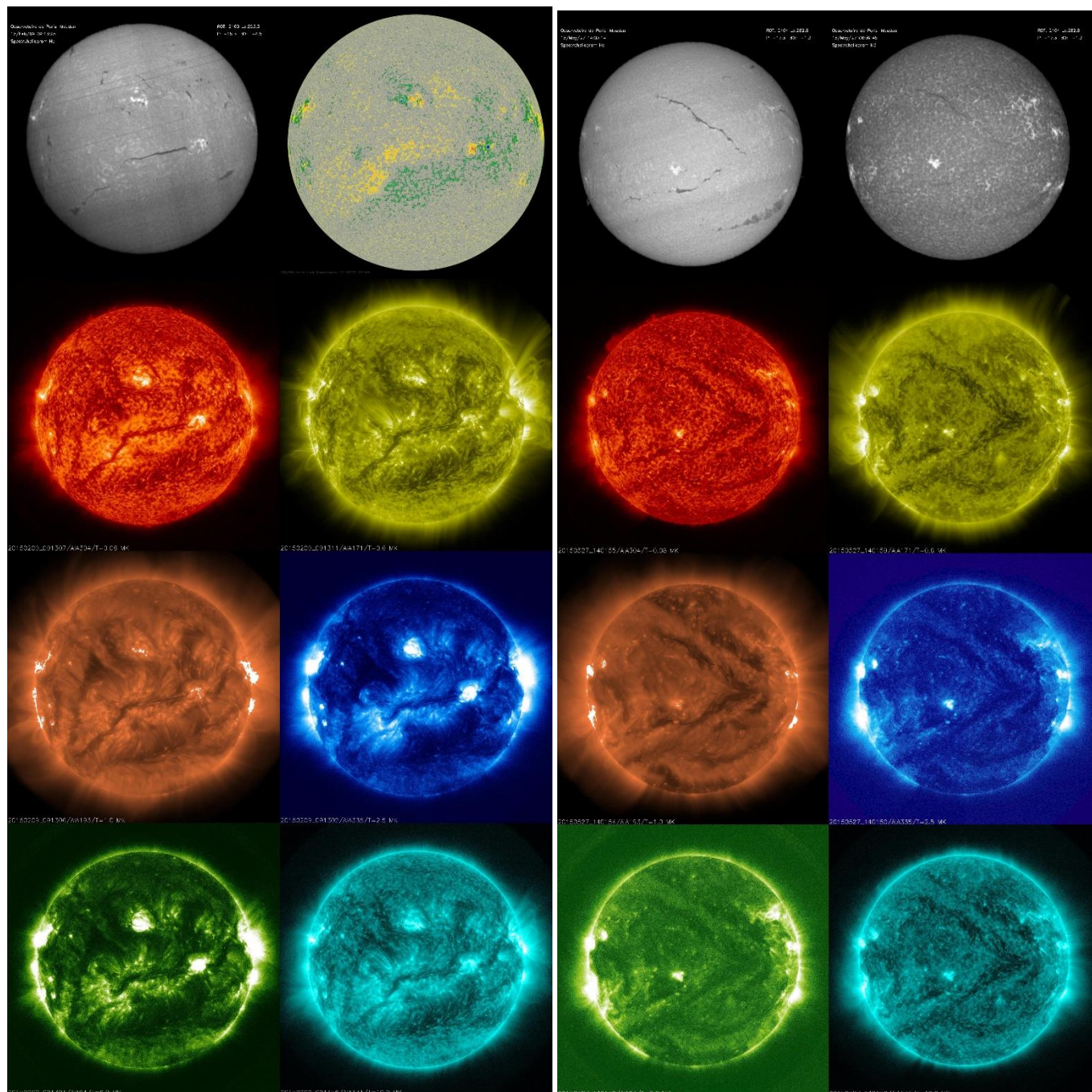
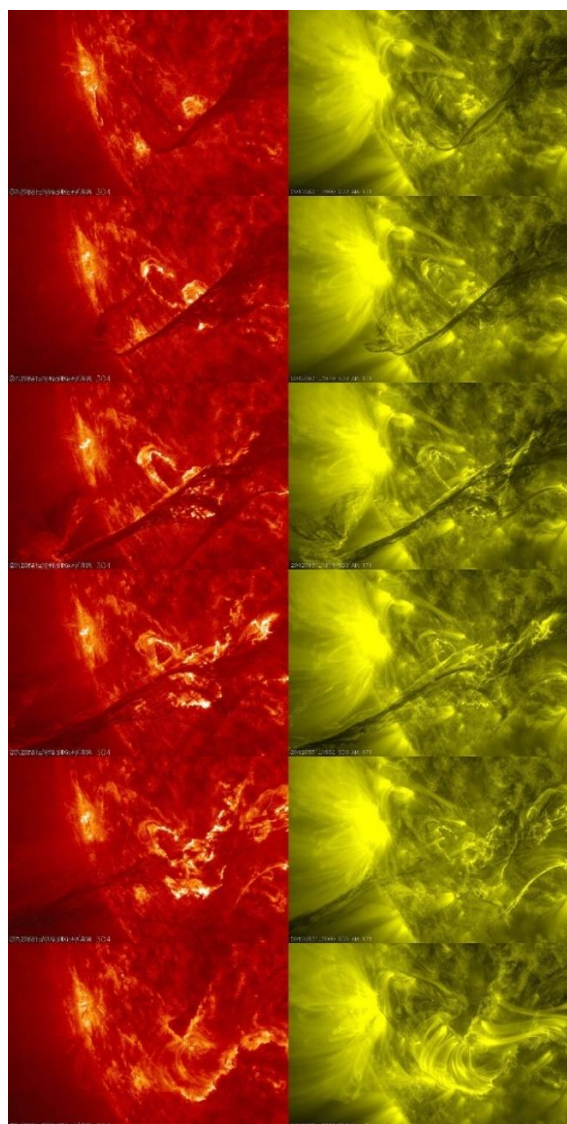


Figure 17 : deux exemples de filaments de longueur exceptionnelle. Les images noir et blanc sont chromosphériques (8000 K, observatoire de Meudon). Les images en UV, en fausses couleurs (SDO/AIA), sont aux longueurs d'onde de 304, 171, 193, 335, 94 et 131 Å, respectivement dans les raies de HeII (80000 K), FeIX (0.6 MK), FeXII (1 MK), FeXVI (2.5 MK), FeXVIII (6.3 MK) et FeXX (10 MK).

La chromosphère est une couche épaisse de 2000 km qui surmonte la photosphère ; de température voisine (8000 K), sa pression est beaucoup plus faible (1 Pa au lieu de 1000 Pa, donc sa densité également). Les atomes sont neutres, comme dans la photosphère. Des ondes acoustiques ou magnéto acoustiques, issues de la photosphère, traversent la chromosphère et dissipent leur énergie, peut être sous forme de chocs. La masse volumique ρ décroissant avec l'altitude, l'amplitude en vitesse des oscillations peut augmenter et excéder la vitesse locale du son ($C_s = (\gamma kT/m)^{1/2}$), la vitesse d'Alfven ($C_a = B/(\mu_0 \rho)^{1/2}$), ou encore la vitesse des ondes magnéto-sonores $(C_s^2 + C_a^2)^{1/2}$, et engendrer des chocs dissipant l'énergie et chauffant ainsi le milieu. Ainsi, il existe une brusque remontée de température : en quelques dizaines de km, elle passe de 10^4 K à 10^6 K. Cette fine couche est la zone de transition chromosphère couronne.

De longs filaments sombres (figure 17) apparaissent dans la chromosphère, ainsi que des plages brillantes, de champ magnétique modéré ($B < 0.05$ T), qui peuvent être isolées ou entourer les taches, formant avec elles les régions actives. Les filaments sont de la matière chromosphérique (8000 K) en suspension dans la couronne 100 fois plus chaude, à plus de 10000 km d'altitude. Ils sont soutenus contre la pesanteur ($g = 275 \text{ ms}^{-2}$) par une force de Laplace ($\mathbf{j} \wedge \mathbf{B}$ par unité de volume), ils surmontent en effet toujours deux grandes zones de polarités magnétiques opposées (figure 17, haut), signifiant que leur support est magnétique, avec courants électriques \mathbf{j} et champs \mathbf{B} plutôt faibles (0.001 T). C'est le champ magnétique qui les isole thermiquement de leur environnement coronal chaud (la conduction de la chaleur ne se faisant pas perpendiculairement au champ). Les raies d'absorption $H\alpha$ et CaII K dévoilent bien les filaments, dont la longueur peut dépasser le rayon solaire. La figure montre que les filaments ont un aspect diffus dans les raies coronales à 1 MK: en effet, ce n'est pas la matière froide (8000 K) du filament qui apparaît, mais son couloir magnétique sous jacent (situé autour de la ligne d'inversion du champ), beaucoup plus large.



Les filaments peuvent devenir instables, notamment si leur support magnétique est perturbé par une éruption voisine, ou plus simplement sous l'influence de mouvements photosphériques, comme un cisaillement évolutif de part et d'autre de la ligne d'inversion. Dans ce cas, la matière du filament peut être éjectée, comme le montrent les figures 18 et 19, voire se répandre partiellement dans le milieu interplanétaire. Les phénomènes dynamiques affectant les filaments sont soudains (durée de l'ordre de l'heure) et portent le nom de « disparition brusque » ou DB. Lorsque les filaments sont vus au limbe, ils passent en émission dans les raies et sont appelés protubérances (figure 19).

Figure 18 : éjection d'un filament vu par SDO/AIA dans deux raies UV formées à 80 000 K (HeII, fausse couleur rouge) et 0.6 MK (FeIX, fausse couleur jaune). Les cinq premières lignes sont des observations à 19H00, 19H40, 19H46, 19H52, 20H00 puis plus tard, 23H00. En une heure, le filament est éjecté. Vers 23H00, on voit une arcade magnétique formée au dessus de filets brillants typiques d'une éruption. Il s'agit donc d'une « disparition brusque » du filament consécutive à la perturbation de son support magnétique par l'éruption voisine.

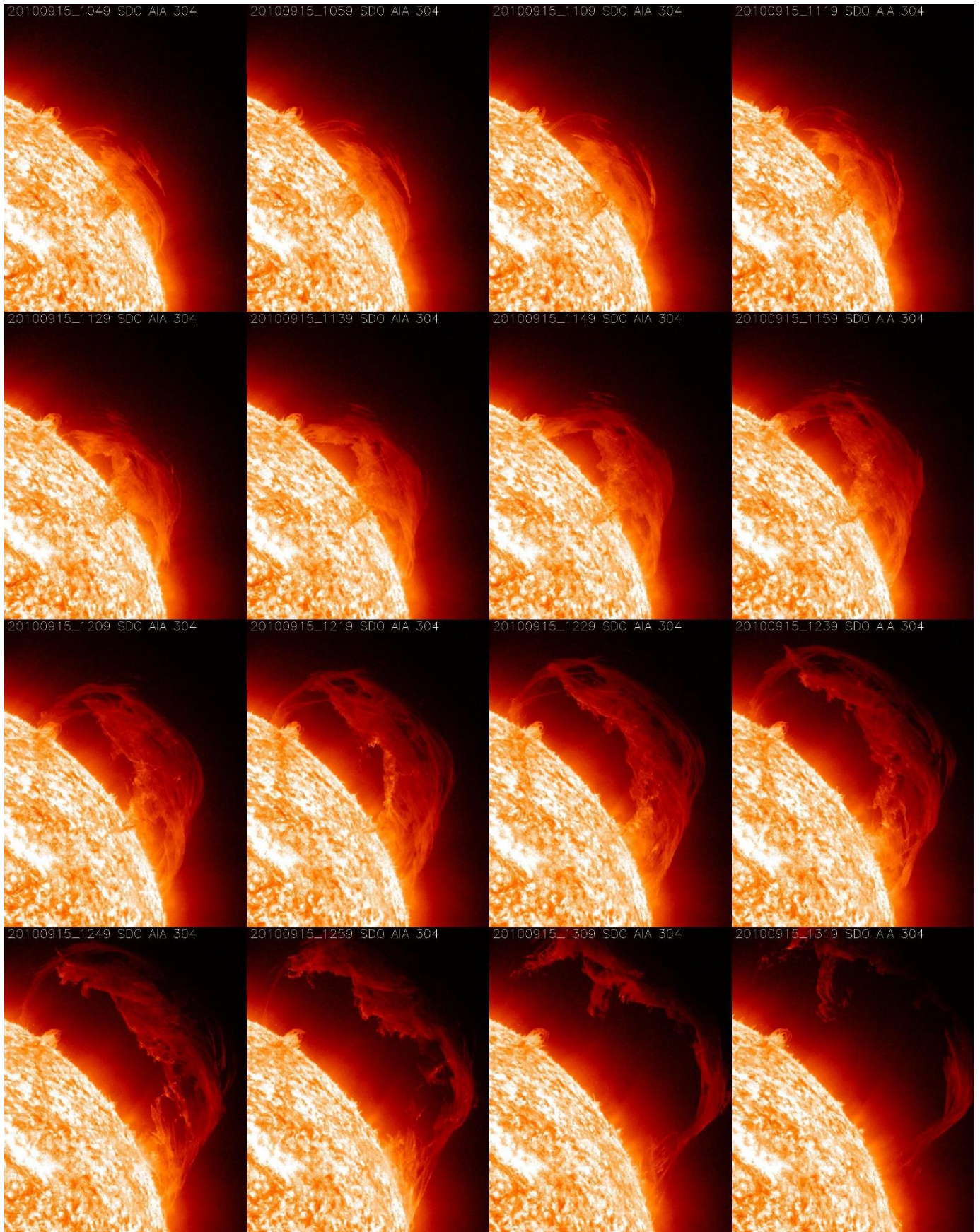


Figure 19 : éjection d'une protubérance vue par SDO/AIA dans la raie HeII 304 Å formée à 80 000 K (fausses couleurs). Les 16 instants d'observation vont de 10H49 à 13H19, la matière est éjectée vers le milieu interplanétaire. De tels évènements ont été filmés par Bernard Lyot au Pic du Midi dans la raie H α (8000 K) vers 1935, à l'aide de ses inventions (le coronographe et le filtre monochromatique biréfringent). SDO permet d'explorer d'autres gammes de températures, plus chaudes.

4 – Les éruptions

Le satellite SDO/NASA (instrument AIA), grâce aux raies étagées en température (de 10^5 à 10^7 K), permet d'étudier les éruptions comme jamais ce fut possible auparavant, avec une bonne résolution spatiale ($0.6''/\text{pixel}$) et temporelle (45 s). L'instrument a cinématographié depuis 2010 un très grand nombre de petites et grandes éruptions, celles de classe X étant les plus violentes, et également les plus rares. Les figures 20, 21 et 22 montrent de beaux exemples de chronologies éruptives observées par SDO. Les éruptions convertissent l'énergie magnétique en énergie cinétique et calorifique, ce qui met la matière en mouvement et produit un chauffage. Lorsque la matière atteint la vitesse de libération du Soleil (vitesse qui permet d'échapper à la gravitation), elle peut balayer le milieu interplanétaire en renforçant le vent solaire et atteindre la Terre, produisant des aurores polaires lors de l'excitation de l'oxygène et de l'azote de la haute atmosphère. Le mécanisme essentiel de conversion d'énergie est probablement la reconnexion magnétique (modification de la topologie des lignes de champ avec diminution de l'énergie magnétique de la région active), expliquée dans la dernière partie.

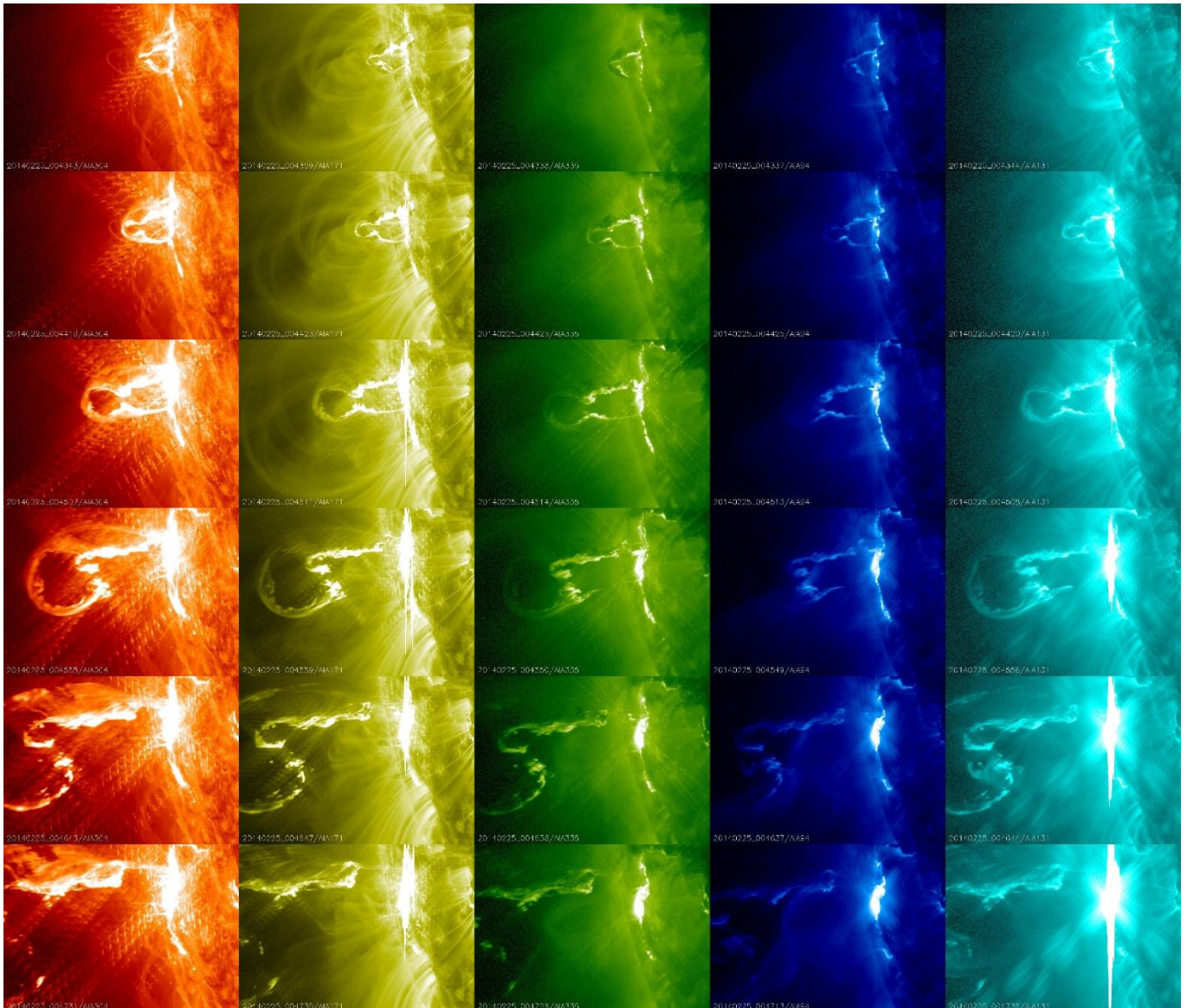


Figure 20 : exemple de chronologie éruptive, le 25 Février 2014. Les images en UV, en fausses couleurs (SDO/AIA), sont aux longueurs d'onde de 304, 171, 335, 94 et 131 Å, respectivement dans les raies de HeII (80000 K), FeIX (0.6 MK), FeXVI (2.5 MK), FeXVIII (6.3 MK) et FeXX (10 MK). Les 6 lignes d'images sont séparées de 45 s, ce qui donne une idée de la rapidité de la phase de flash, caractérisée par une éjection de matière (boucle de champ magnétique instable) et d'un embrillancement soudain, qui sature le capteur, surtout dans la colonne de droite à 10 MK.

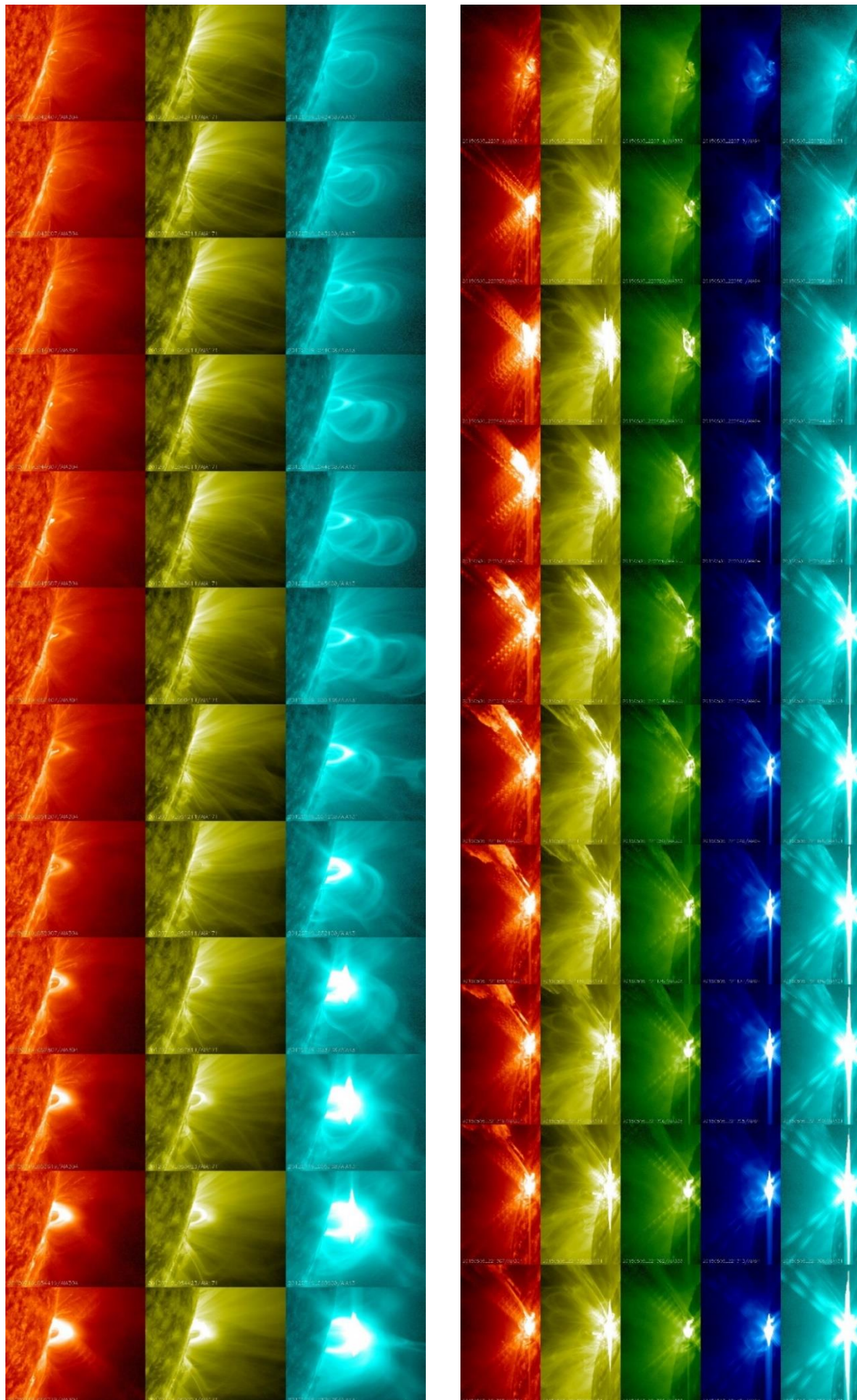


Figure 21 : deux exemples de chronologies éruptives, à gauche le 19 Juillet 2012 de 04H24 à 05H52, à droite le 5 Mai 2015 de 22H07 à 22H14. Les images en fausses couleurs montrent la phase de flash de l'éruption à différentes températures, 10^5 , 10^6 et 10^7 K à gauche, et 10^5 , 10^6 , $3 \cdot 10^6$, $6 \cdot 10^6$ et 10^7 K à droite. Mêmes raies que pour la figure 20. Observations en UV de SDO/AIA.

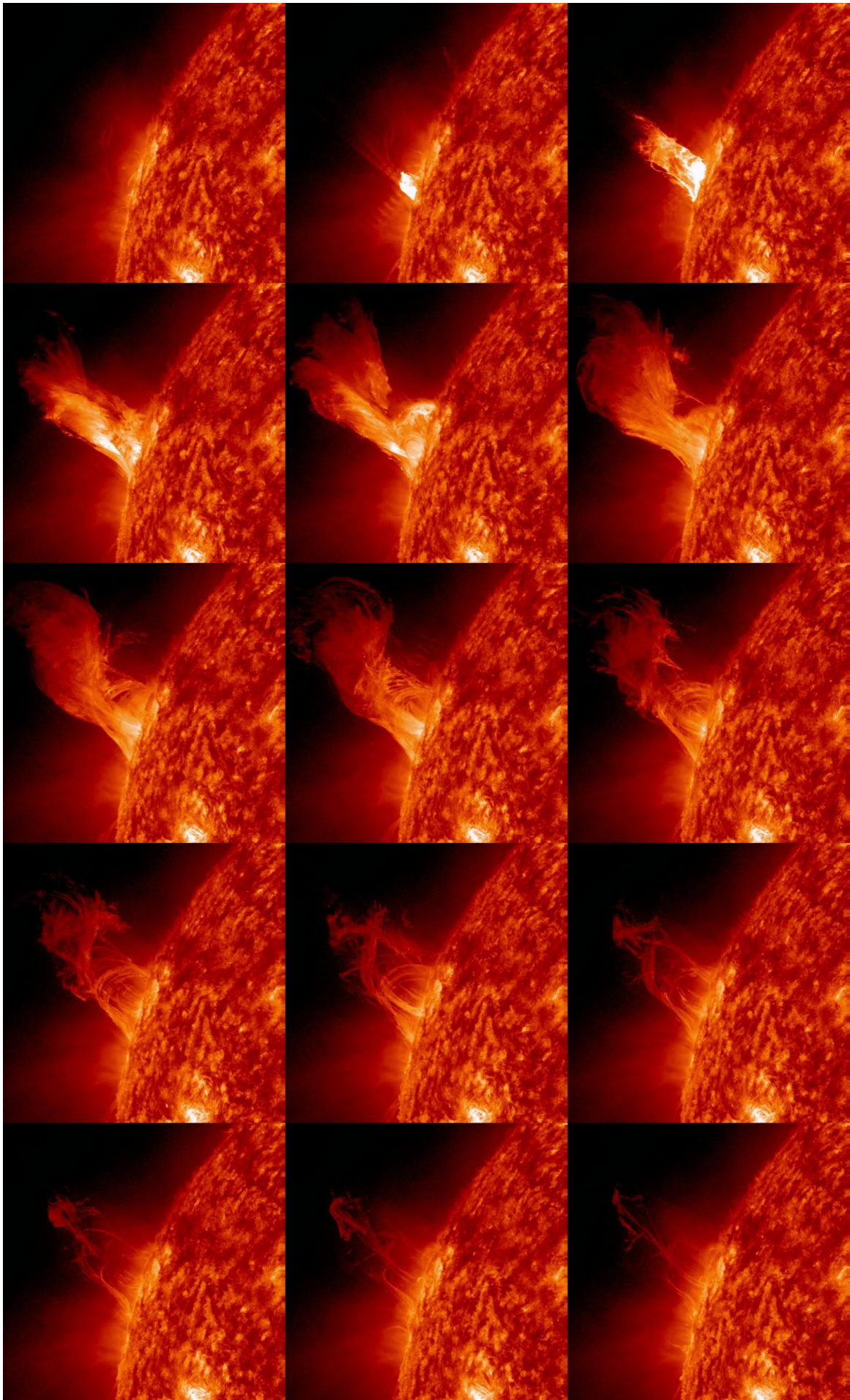


Figure 22 : éruption au limbe, images en fausses couleurs montrant la phase de flash de l'éruption puis la phase graduelle, température 80000 K dans la raie HeII 304 Å. Observations en UV de SDO/AIA.

Les éruptions violentes, notamment de classe X, en raison de la libération soudaine d'une grande quantité d'énergie, déclenchent la propagation d'une onde de choc dans la basse couronne qui balaie le Soleil à la vitesse de 500 à 1000 km/s, c'est-à-dire à une vitesse super magnéto-sonique, donc plus rapide que la vitesse du son (150 km/s) ou que la vitesse d'Alfven (quelques centaines de km/s selon l'intensité du champ magnétique). La [figure 23](#) est le résultat de la détection d'une telle onde coronale par différence d'images successives. La progression du choc a une action sur la chromosphère sous jacente, qui se trouve comprimée vers le bas au passage du choc (présence d'un « redshift », le retour à l'état normal étant marqué par un « blueshift », d'où l'intérêt d'observer le profil des raies comme H α sensible à l'effet Doppler) ; la contrepartie chromosphérique de l'onde coronale est appelée onde de Moreton, du nom de son découvreur. C'est un phénomène assez rare et toujours éphémère (une dizaine de minutes).

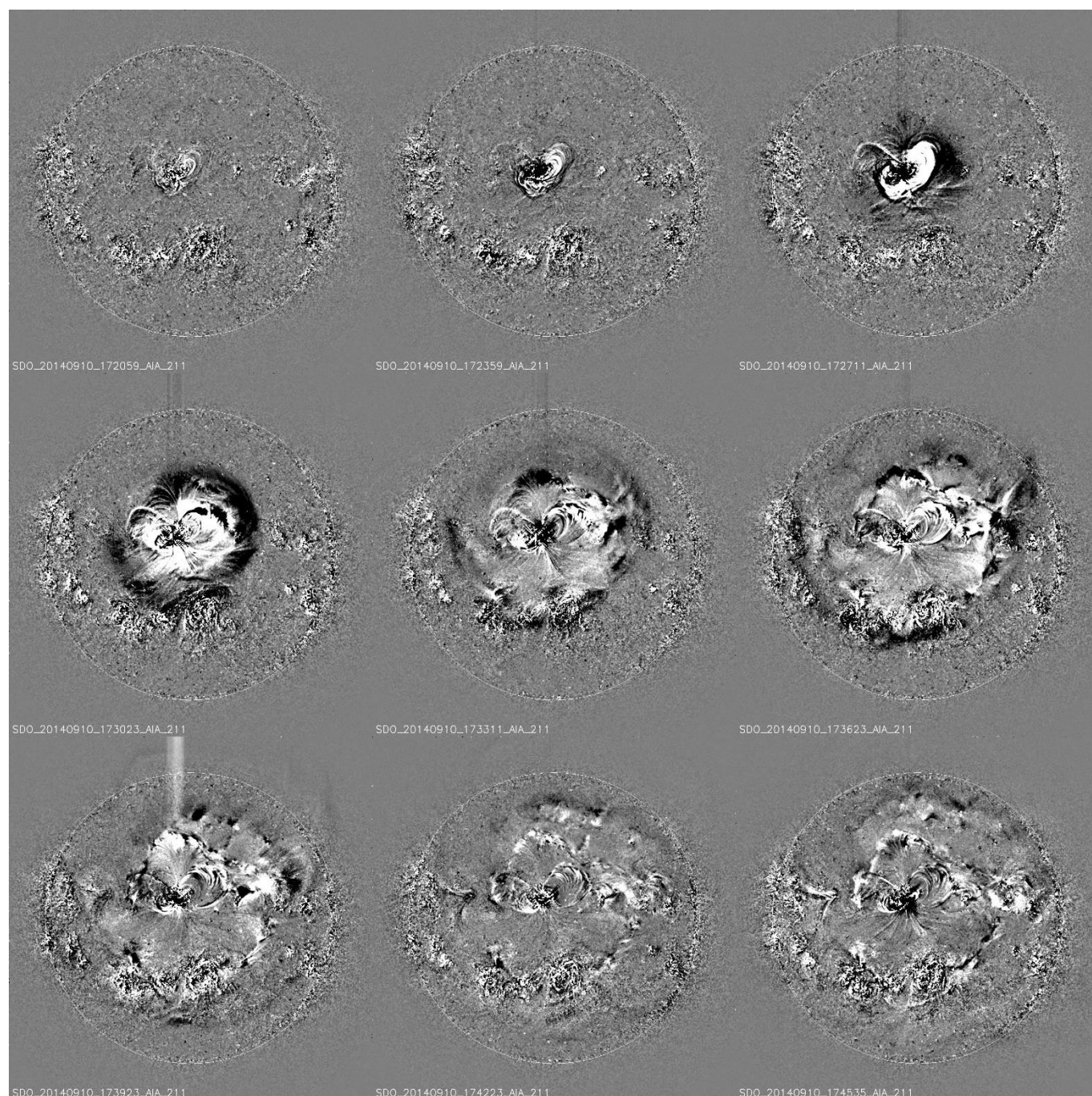


Figure 23 : onde coronale observée par SDO/AIA dans la raie du Fe XIV à 211 Å (température de 2 MK), il s'agit d'une différence d'images successives (car la variation d'intensité est faible), le 10 Septembre 2014 entre 17H21 et 17H45. Remarquer à 17H30 la symétrie presque circulaire du front de choc, qui se propage radialement et horizontalement autour du site éruptif, ici proche du centre du Soleil. La totalité de la surface solaire est ainsi balayée par le choc en une vingtaine de minutes.

5 – Les éjections de masse coronale (CME)

Les éruptions sont souvent accompagnées d'une éjection de matière (environ 10^{12} kg) qui peut être, selon son énergie cinétique, injectée dans le milieu interplanétaire et le parcourir en suivant les lignes du champ magnétique à grande distance. Le plasma, constitué de particules chargées, échappe à l'attraction solaire si sa vitesse est supérieure à 600 km/s (c'est toujours le cas des électrons, car ils sont 1860 fois plus légers que les protons, cependant ceux-ci peuvent être tirés par le champ électrique résultant). La [figure 24](#) montre de telles CME observées par le coronographe C3 en lumière blanche de SOHO/LASCO.

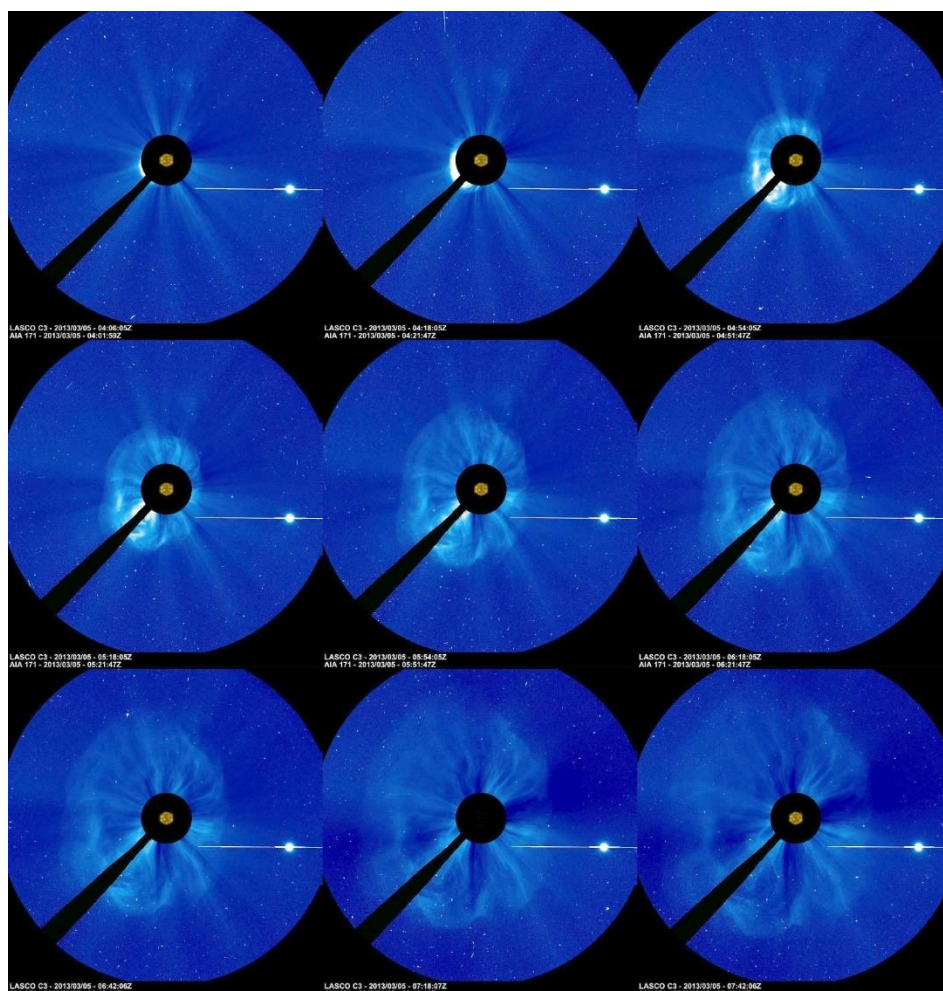
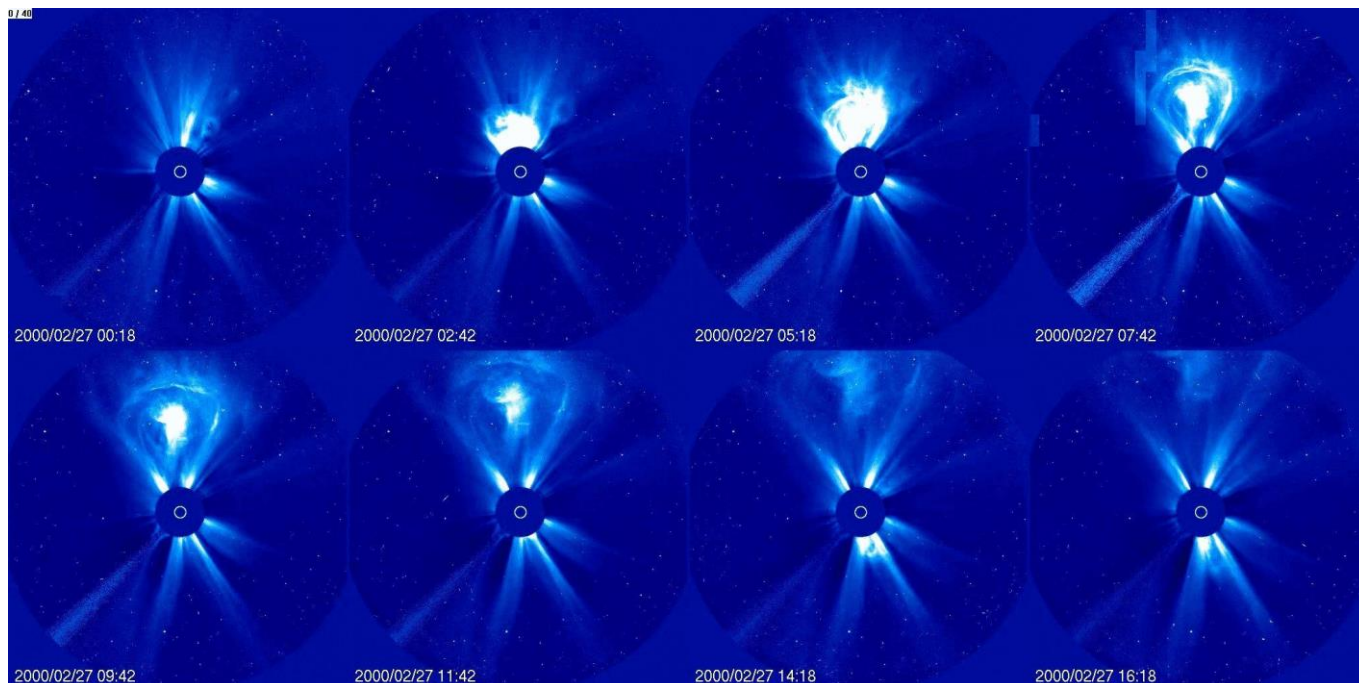


Figure 24 : deux CME de géométries différentes. Le Soleil (cercle blanc) est masqué par un disque occulteur pour ne pas éblouir le capteur CCD, qui voit un immense champ, jusqu'à 30 rayons solaires.

Haut : éjection d'une « bulle » de plasma par ouverture de la configuration magnétique le 27 Février 2000 entre 00H18 et 16H18. Cette CME n'est pas dirigée vers la Terre.

Bas : une CME de « halo », c'est-à-dire dessinant un cône symétrique dans la direction de l'observateur, donc orientée vers la Terre, le 5 Mars 2013, entre 04H06 et 07H42. On distingue une planète intérieure à droite.

6 – Quelques exemples de grandes éruptions

Les 28 Octobre (vers 12H) et 4 Novembre 2003 (vers 18H), deux éruptions exceptionnelles (figure 25), respectivement de classe X17 et de classe X28, se produisirent. Si elles avaient une énergie comparable en rayons X (mesurés par les satellites GOES de la NASA), leur effet à la Terre a été très différent, comme le montre la figure. Le flux de rayons cosmiques (d'origine essentiellement galactique) a baissé 24 H après l'éruption du 28 Octobre, le temps que la perturbation solaire parvienne à la Terre, au sein du vent solaire. De même, les 3 composantes du vecteur champ magnétique mesurées par GOES ont été perturbées au même moment. Mais rien de tout cela ne s'est passé le 4 Novembre. Pourquoi ?

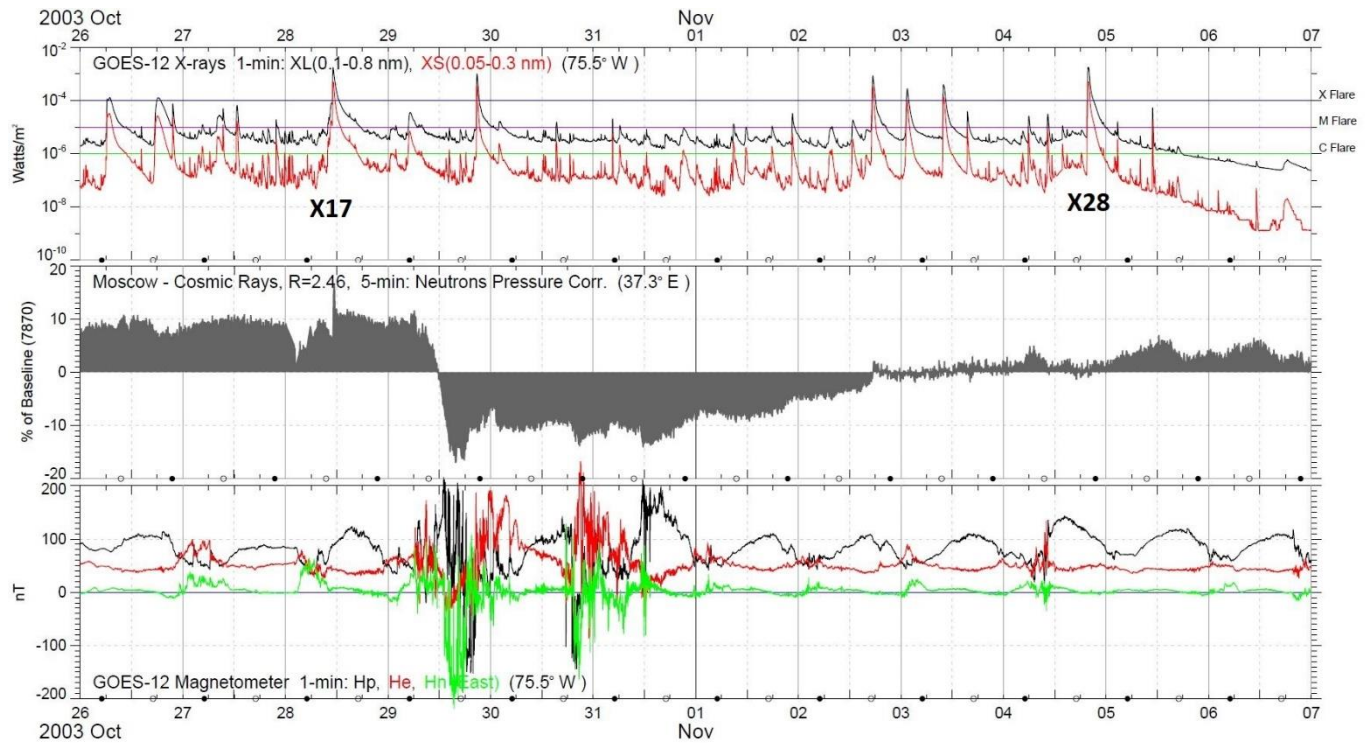
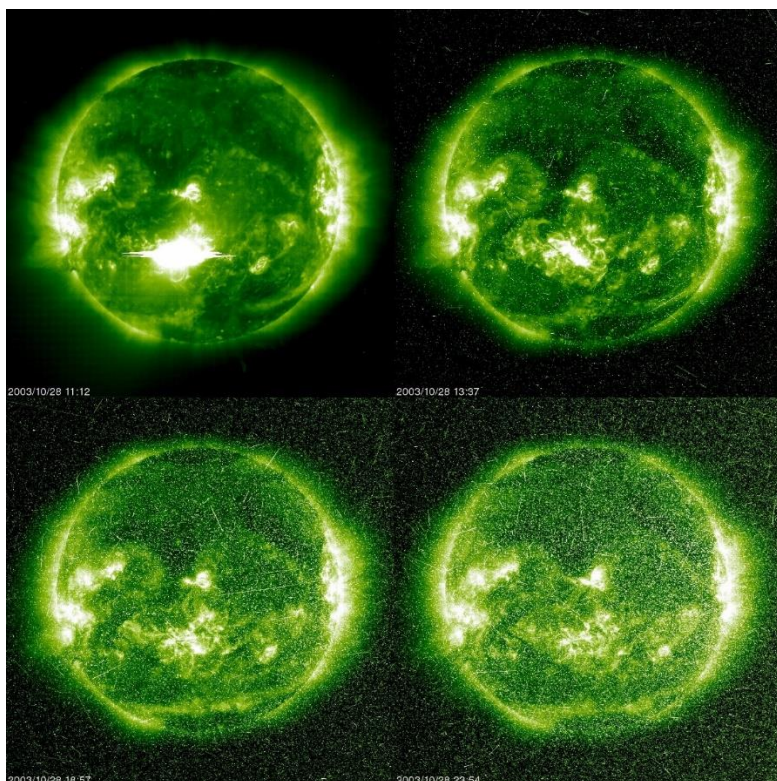


Figure 25 : Flux de rayons X (en haut), de rayons cosmiques (au milieu) et les 3 composantes du vecteur champ magnétique (en bas) mesurées par les satellites GOES en fonction du temps (en abscisse).



L'éruption du 28 Octobre s'est produite près du centre du disque, comme le montre la figure 26, alors que celle du 4 Novembre a eu lieu au limbe (figure 28). En conséquence, la première avait toutes les chances de diriger le plasma éjecté vers la Terre, comme on le voit sur la figure 27 des observations coronographiques à grand champ, alors que ce n'était pas possible pour la seconde, bien que plus puissante.

Figure 26 : éruption du 28 Octobre 2003 vue en UV par la sonde SOHO (température de plusieurs MK), instrument EIT, à 11H12, 13H37, 18H57 et 23H54.

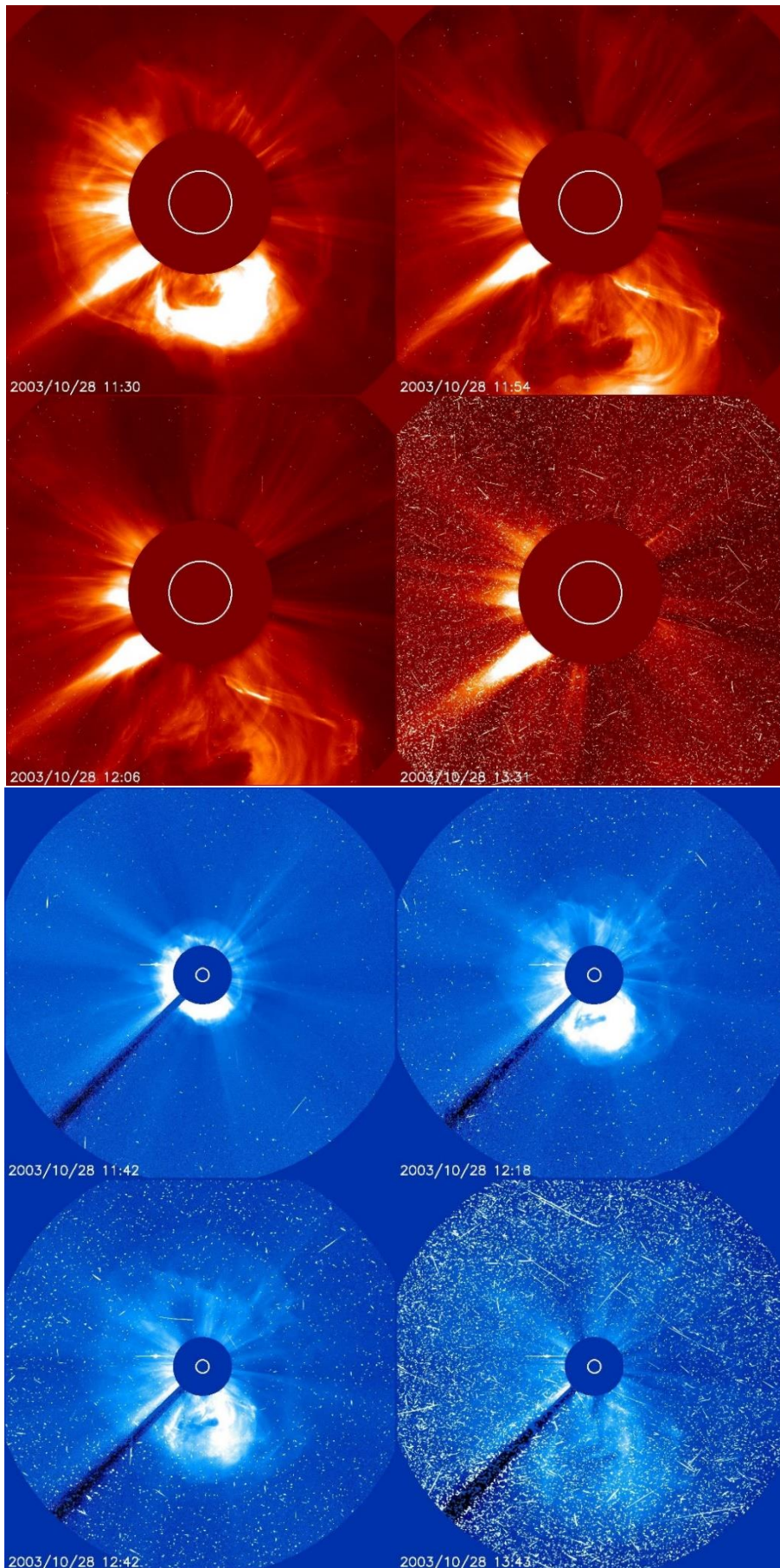


Figure 27 : l'éruption du 28 Octobre 2003 vue par les coronographes C2 (haut) et C3 (bas) de SOHO/LASCO en lumière blanche (le disque solaire est masqué pour éviter l'éblouissement des CCD, le rond blanc représente le Soleil). On assiste à une CME de « halo » vers la Terre. Remarquer vers 13H30 l'impact de particules chargées qui viennent percuter les capteurs CCD des deux coronographes.

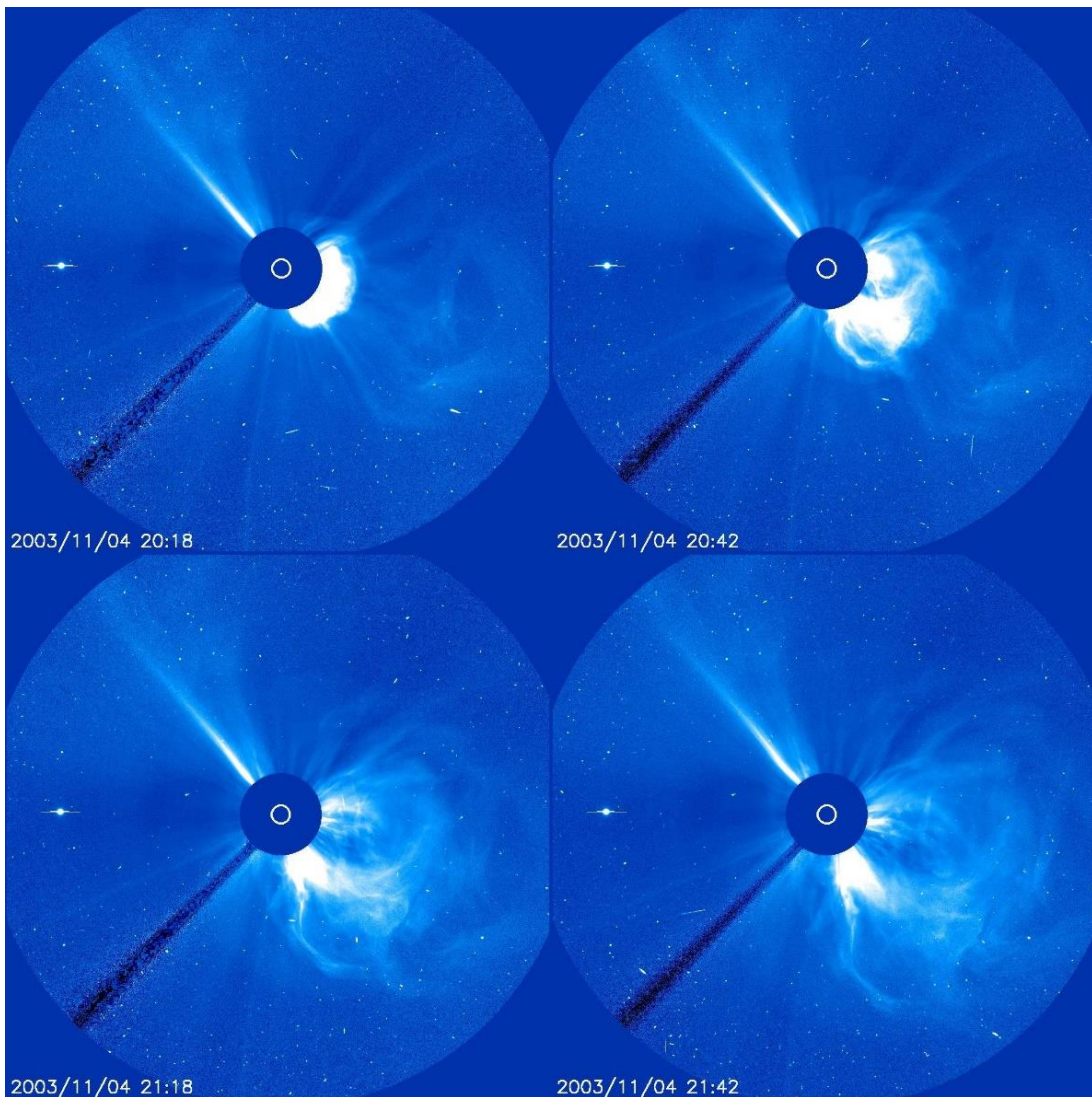
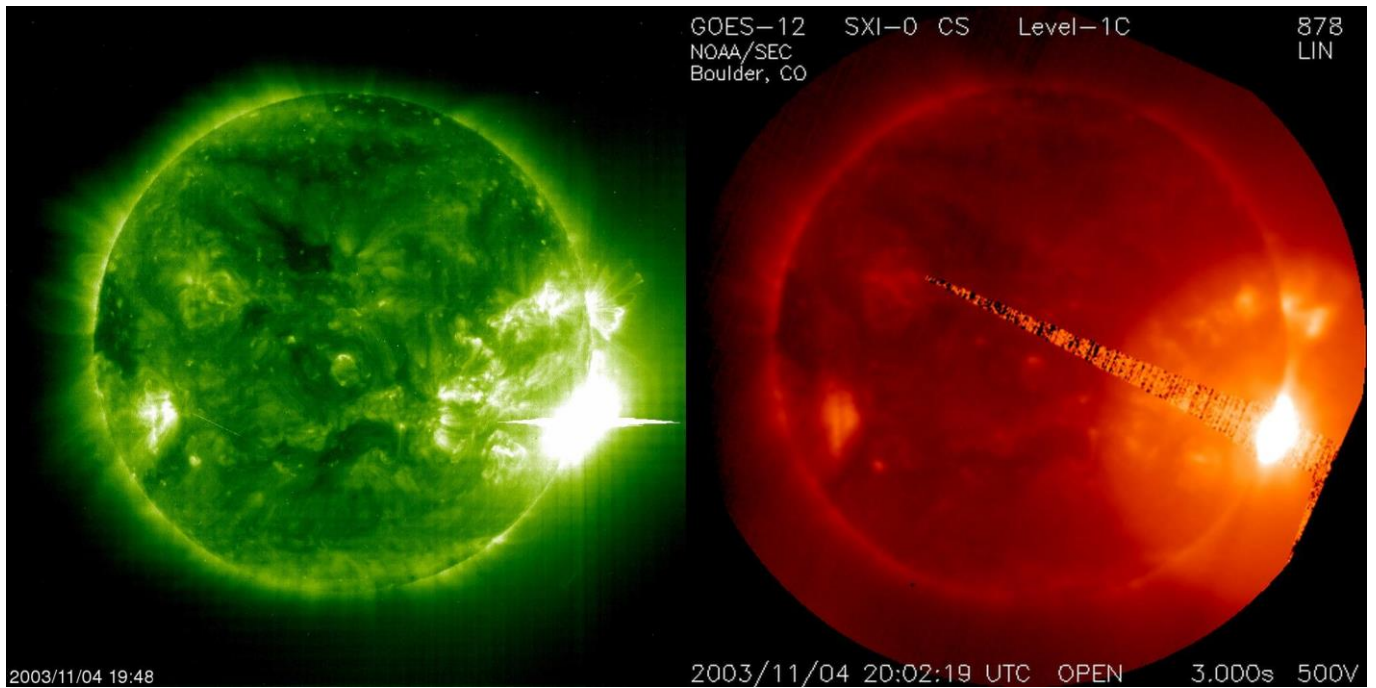


Figure 28 : l'éruption au limbe du 4 Novembre 2003 (même région active que celle du 28 Octobre 2003).
 En haut à gauche : en UV, instrument SOHO/EIT. En haut à droite, en rayons X, instrument GOES. En bas : séquence d'observations du coronographe C3 à grand champ SOHO/LASCO, en lumière blanche, à 20H18, 20H42, 21H18, 21H42, montrant la CME associée à l'éruption, mais non dirigée vers la Terre. Le Soleil (représenté par le rond blanc) est masqué par un disque anti éblouissement du capteur CCD.

Le 10 Septembre 2017, une violente éruption de classe X9 (figures 29 et 30) se produisit au limbe, sans impacter la Terre. Elle fut observée par SDO, opérationnel depuis 2010, et offrant beaucoup plus de détails que SOHO (images de 16 Mpixels au lieu de 1 Mpixel), avec une meilleure résolution temporelle (45 s au lieu de plusieurs dizaines de minutes).

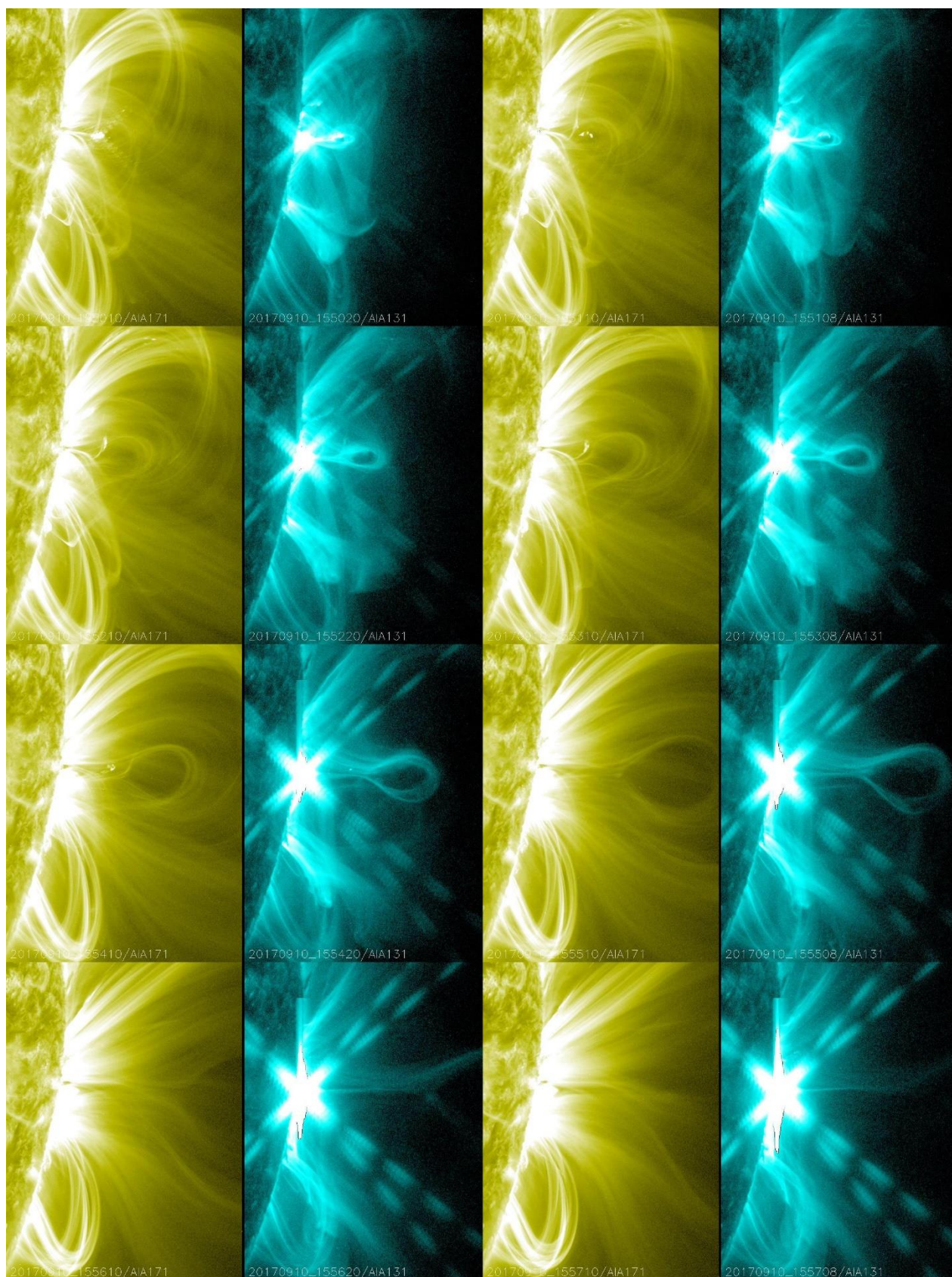


Figure 29 : l'éruption au limbe du 10 Septembre 2017 à deux températures (1 MK, jaune, 10 MK, bleu), vue en UV par SDO/AIA entre 15H50, et 15H57 par pas d'une minute. Remarquer l'éjection d'une bulle de plasma au moment de la phase de flash de l'éruption, marquée par la saturation du capteur.

Cette éruption, non dirigée vers la Terre, est accompagnée d'une CME très bien observée à grande distance par les coronographes à grand champ de SOHO. Notons au passage que ces coronographes sont entrés en opération en 1996, il y a 28 ans ; cette longévité est exceptionnelle, l'instrument LASCO de SOHO est conservé en état de marche aussi longtemps que possible car ses coronographes sont uniques !

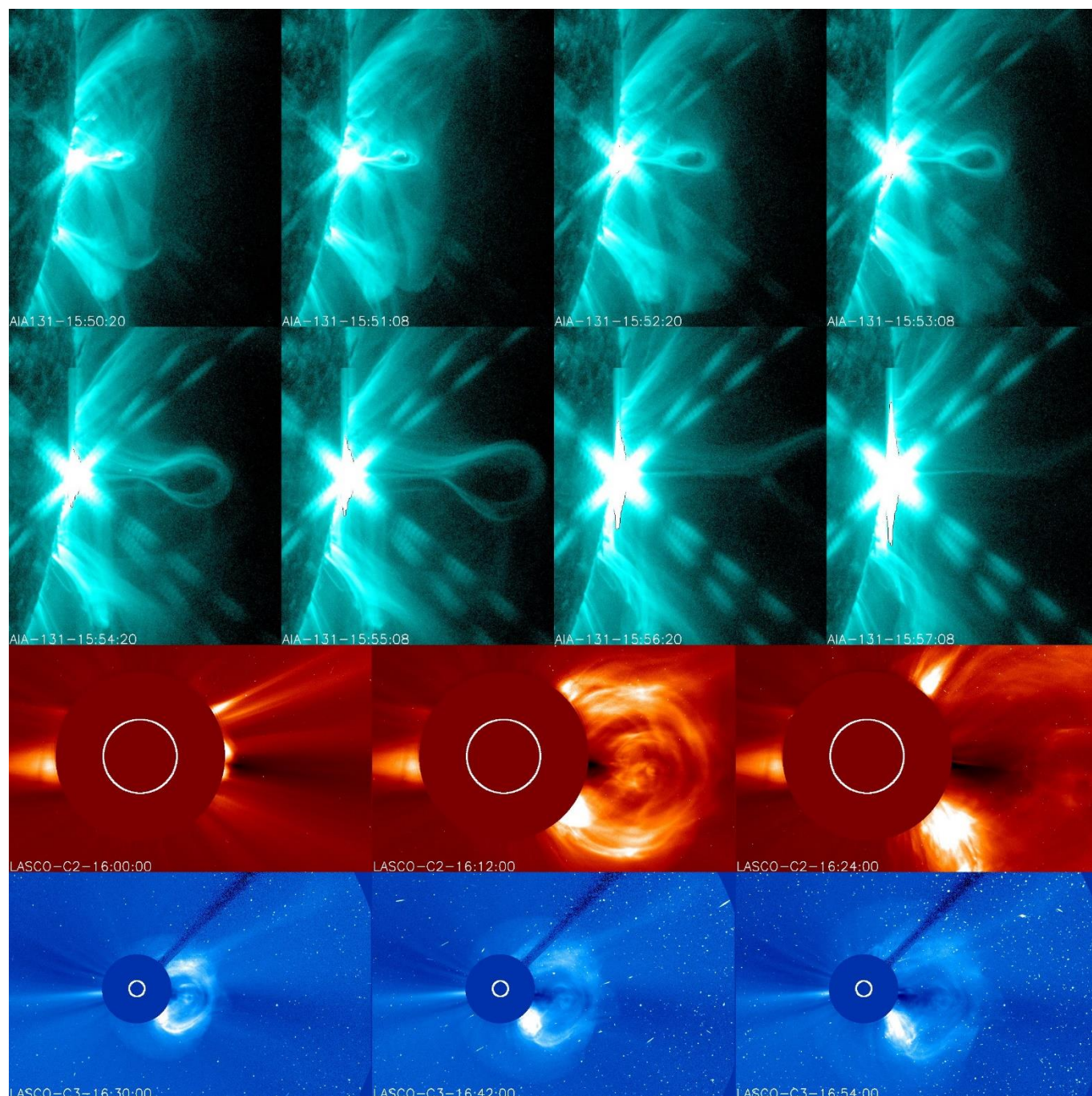


Figure 30 : l'éruption au limbe du 10 Septembre 2017 vue en UV par SDO/AIA (en haut) entre 15H50 et 15H57 par pas d'une minute (température 10 MK). En bas, images des coronographes en lumière blanche C2 et C2 de SOHO/LASCO (16H00, 16H12, 16H24 pour C2 et 16H30, 16H42, 16H54 pour C3). Fausses couleurs. Les coronographes montrent l'injection de matière dans le milieu interplanétaire. Le Soleil est le rond blanc occulté par un disque anti éblouissement des capteurs CCD.

7 – La reconnexion magnétique, phénomène à l'œuvre dans les éruptions

Lors d'une éruption, l'énergie magnétique est convertie sous d'autres formes, thermique (chauffage), 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 (figure 31).

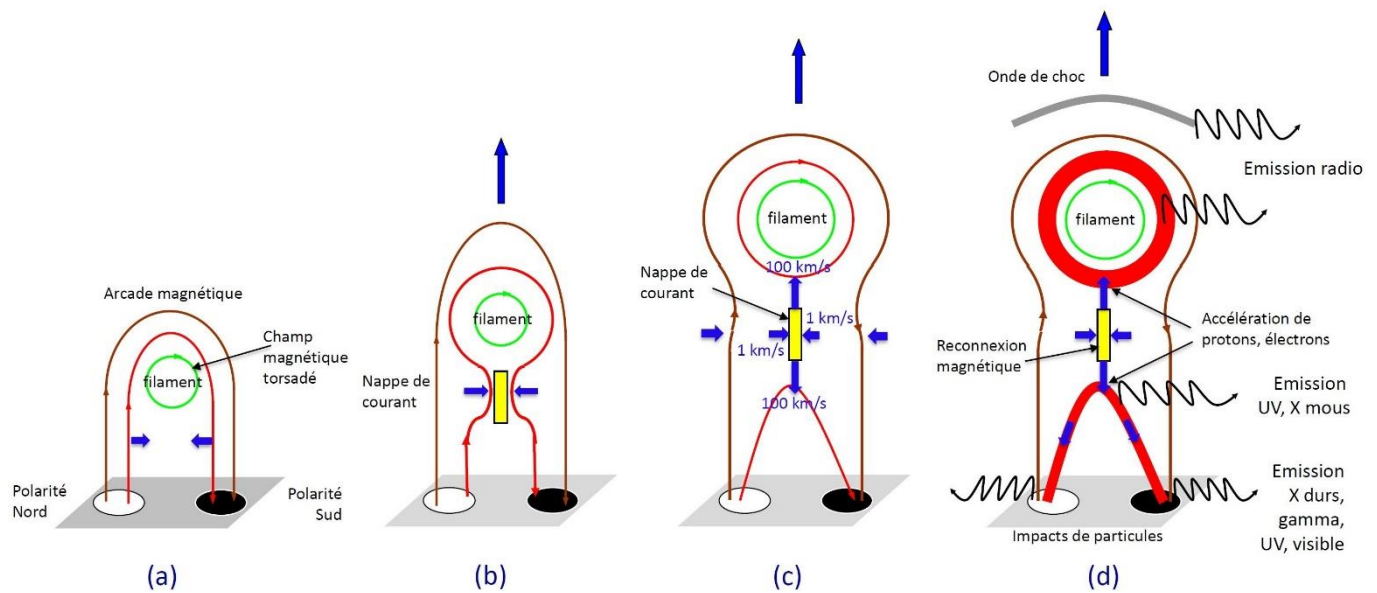


Figure 31 : Modèle d'éruption et d'éjection de masse coronale (schémas d'après L. Klein, OP)

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, comme l'illustre la figure 32. 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 sur la surface solaire (la photosphère). L'arcade va réagir en s'élevant et un mécanisme de reconfiguration du champ se met alors en place.

Les lignes magnétiques 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 \mathbf{j} intense ($\text{rot } \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{j} + \mu_0 \epsilon_0 \partial \mathbf{E} / \partial t$, équation de Maxwell Ampère). Comme le plasma solaire possède une conductivité électrique finie γ , le champ magnétique se met à diffuser dans la nappe ($\mathbf{j} = \gamma \mathbf{E}$, loi d'Ohm), 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 (densité de puissance $P = \mathbf{j}^2 / \gamma$) qui chauffe le plasma et émet alors 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 ($C_a = B / (\mu_0 \rho)^{1/2}$, flèches bleues, c et d). La matière projetée vers le bas va impacter la surface solaire en formant 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 au paragraphe 6.

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.

Le phénomène de reconnexion magnétique est très difficile à observer car la nappe de courant est extrêmement mince (en dessous du pouvoir séparateur des télescopes). Les figures 33, 34 et 35 montrent des présomptions d'observations de reconnexion magnétique dans une nappe de courant.

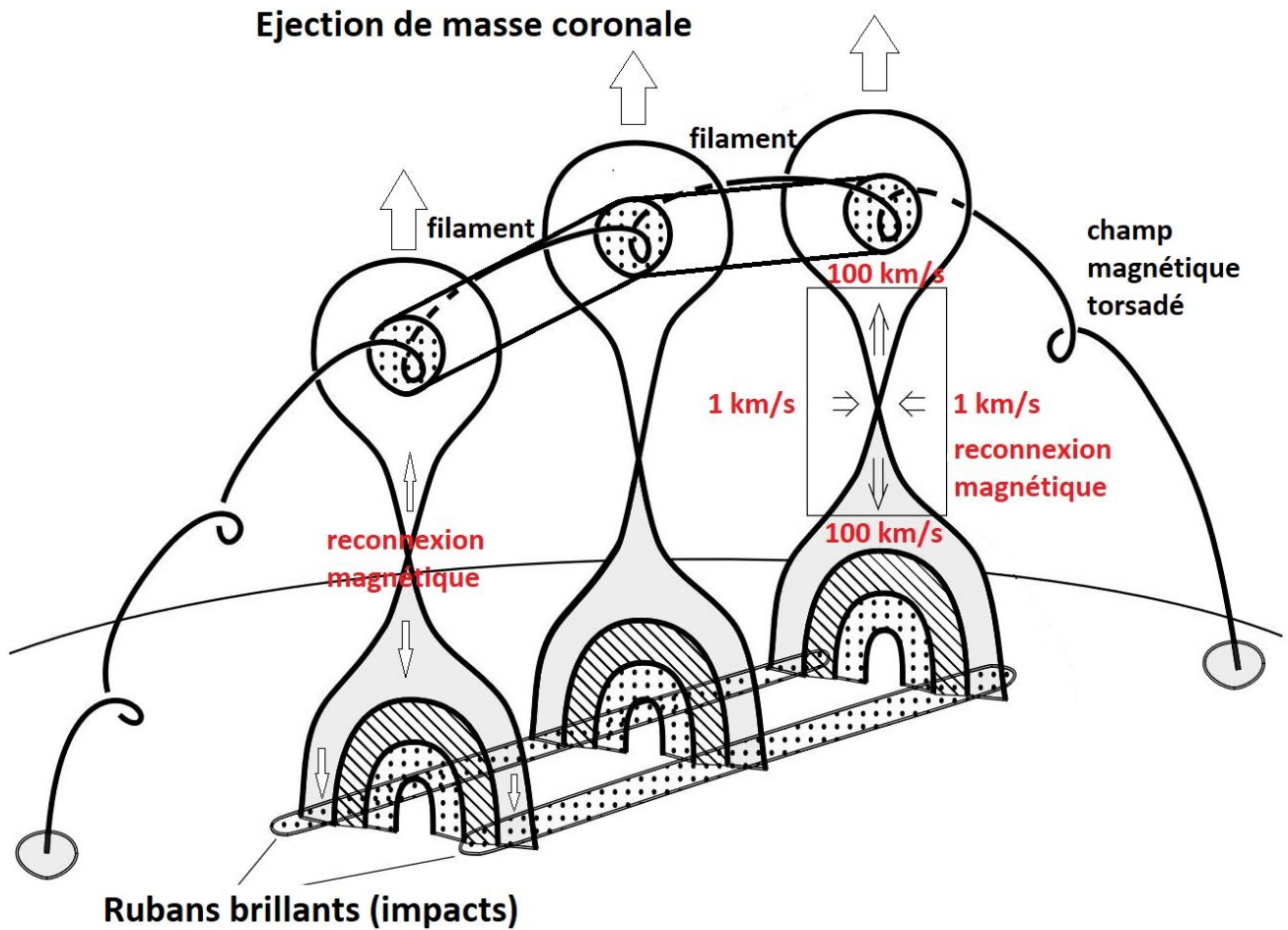


Figure 32 : Modèle d'éjection de masse coronale impliquant un filament dans un champ torsadé. Le filament, au dessus du site de reconnexion, est éjecté en formant une CME. Deux rubans brillants, à la base de l'arcade, se développent, c'est la signature de l'impact de particules précipitées vers le bas par la reconnexion magnétique.

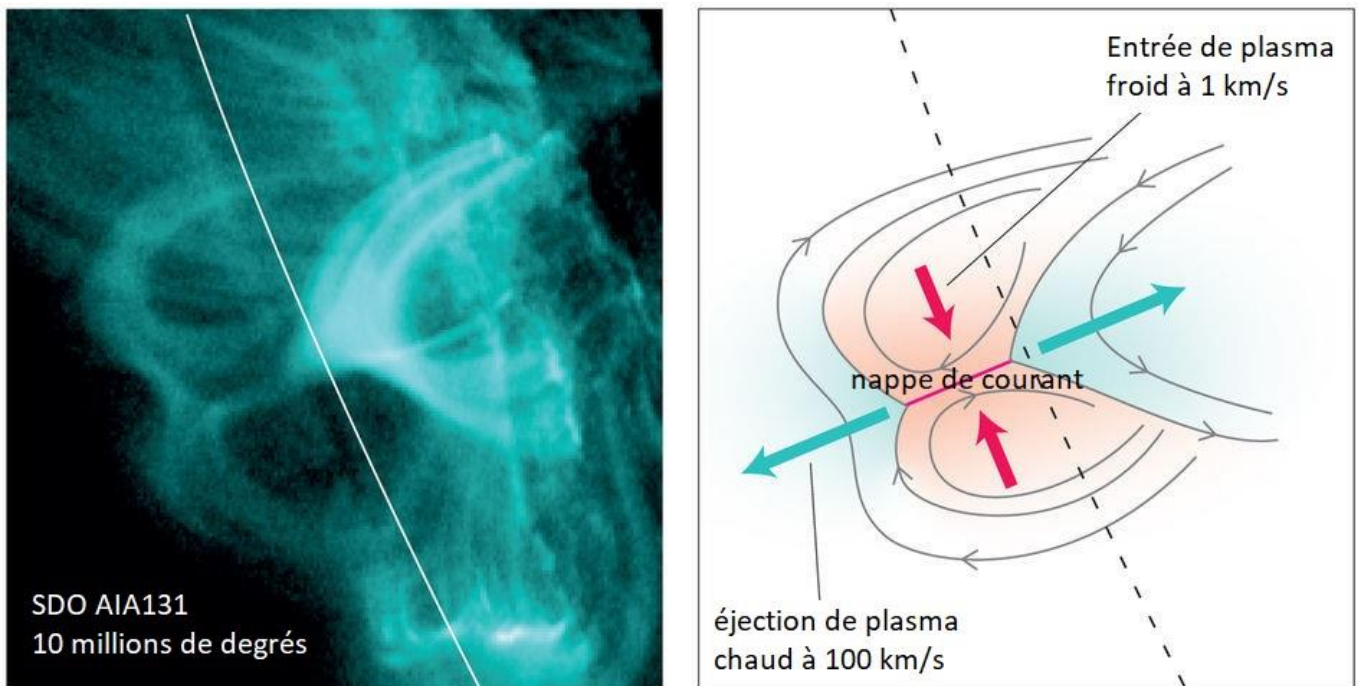


Figure 33 : observation présumée d'un phénomène de reconnexion magnétique dans une nappe de courant par SDO/AIA en UV à 10 MK, raie FeXX 131 Å.

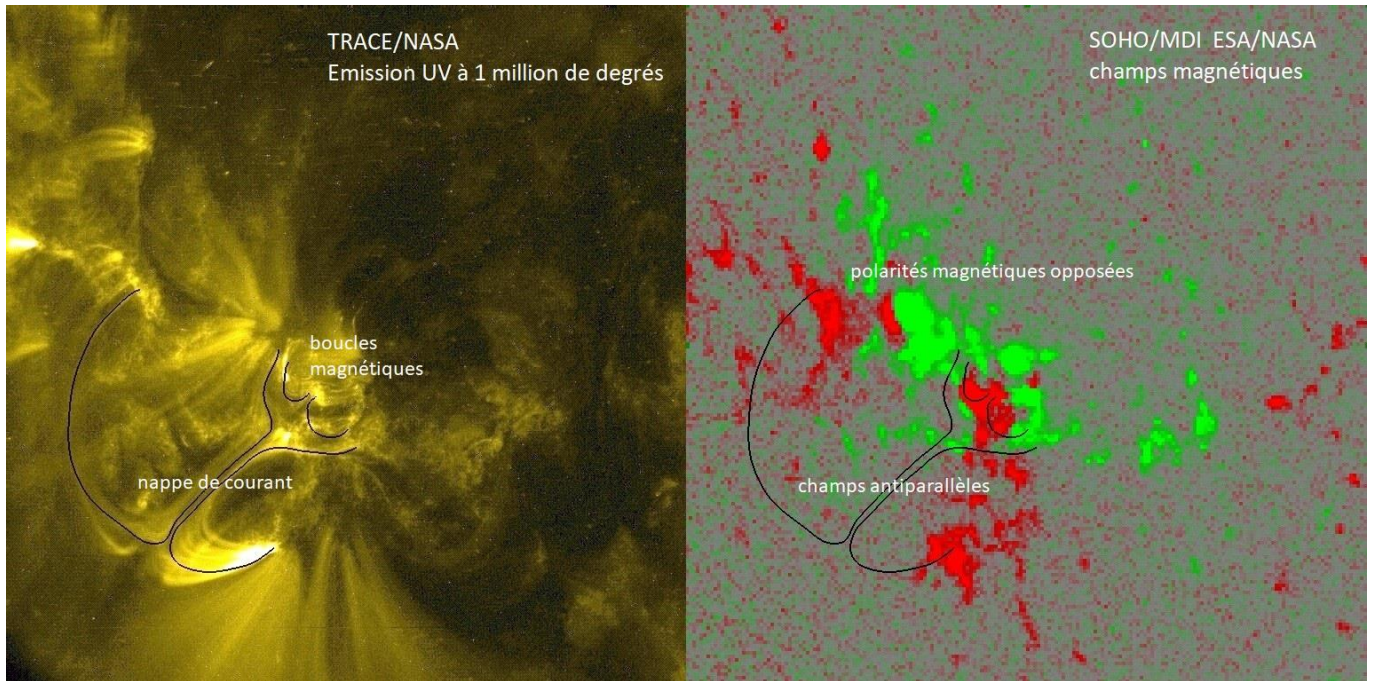


Figure 34 : observation présumée d'un phénomène de reconnexion magnétique dans une nappe de courant par l'instrument TRACE/NASA en UV (à gauche), avec à droite les polarités magnétiques photosphériques (rouge/bleu) vues par le magnétomètre MDI à bord de la sonde SOHO.

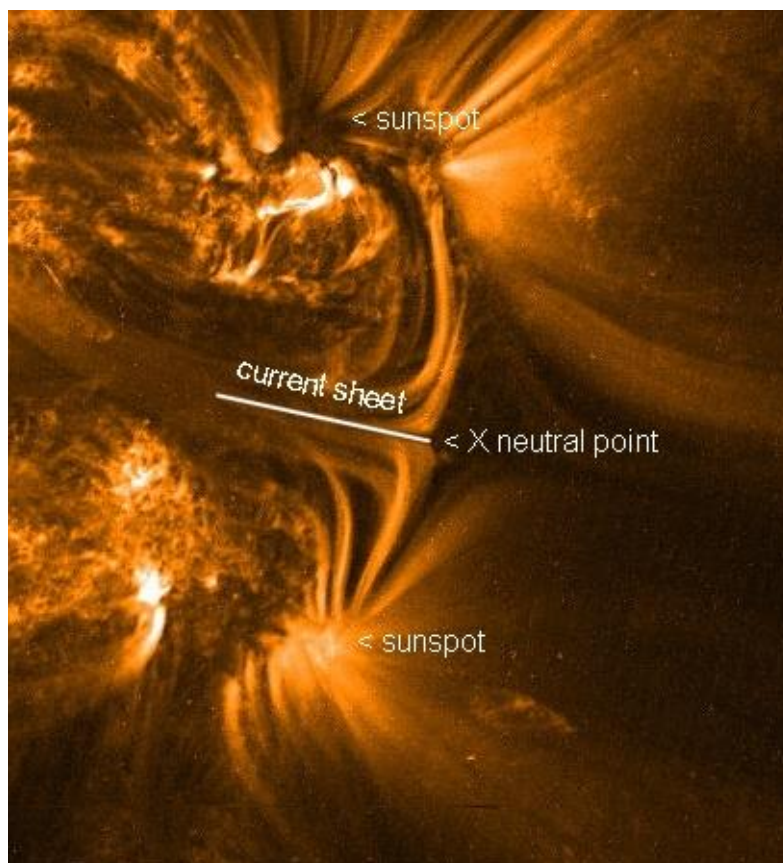


Figure 35 : observation présumée d'un phénomène de reconnexion magnétique dans une nappe de courant par l'instrument TRACE/NASA en UV à quelques MK de température

8 - Quelques liens utiles

Base de données solaires, Meudon

<https://bass2000.obspm.fr>

images du satellite SDO/NASA

<https://sdo.gsfc.nasa.gov/data/>

images de la sonde SOHO/ESA-NASA au point de Lagrange L1

<https://soho.nascom.nasa.gov/data/realtime-images.html>

images de la sonde STEREO/NASA orbitant autour du Soleil

<https://stereo.gsfc.nasa.gov/beacon/>

SPACE WEATHER LIVE

<https://www.spaceweatherlive.com/>

LMSAL SOLAR EVENTS

https://www.lmsal.com/solarsoft/latest_events/

SIDC Brussels

<https://www.sidc.be/>

NOAA Space Weather Prediction Center

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

GOES X rays

<https://www.swpc.noaa.gov/products/goes-x-ray-flux>