

Les éruptions chromosphériques (flares) et les éjections coronales de masse (CME) sont les événements solaires les plus violents (voir cours de Jean-Louis Zerbo). Ils se produisent généralement à peu de temps d'intervalle, l'éruption précédant la CME.

Nous nous intéressons ici à la série de CME et d'orages magnétiques observée en octobre-novembre 2003 (orages d'Halloween). En particulier, on va prêter attention à un événement solaire extrême qui s'est produit le 28 Octobre 2003. Dans cette activité, on propose de suivre du Soleil à la Terre l'éruption chromosphérique et l'éjection coronale de masse qui se sont produites ce jour-là et d'en étudier les effets.

L'éruption chromosphérique et ses effets

Le flash UVX de l'éruption chromosphérique est observé en UV par SoHO et en X par un satellite géostationnaire du programme GOES. L'effet de cette éruption est observé avec un maximum d'intensité entre 11h et 11:15 TU (Figure 1).

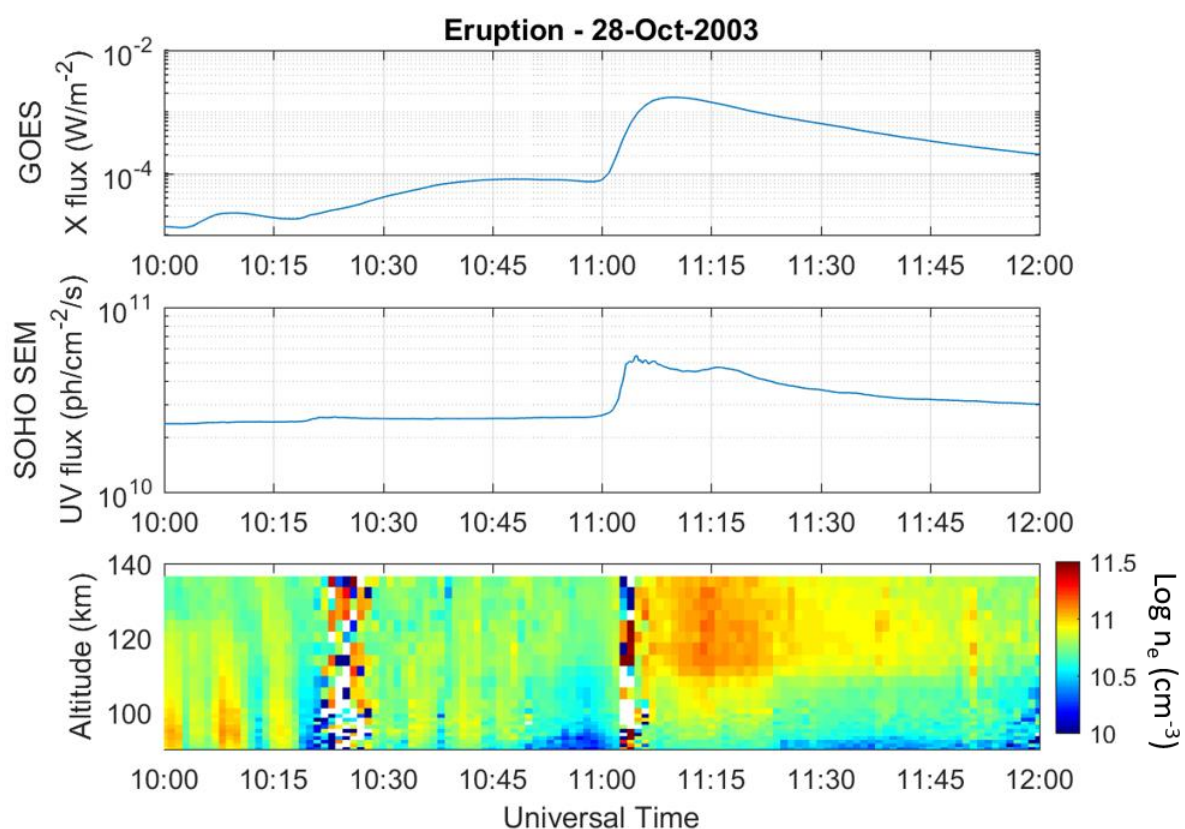


Figure 1: flux X dans la bande 0,1 – 0,8 nm mesuré par GOES ; flux UV dans la bande 26-34 nm mesuré par SoHO et concentration électronique dans l'ionosphère mesurée par un radar EISCAT. (Crédits : Irap ; sources de données : NOAA, ESA/NASA, EISCAT)

Temps de parcours de la lumière

Q1 - Sachant que GOES est un satellite géostationnaire que l'on considèrera à 1UA ($1,5 \times 10^8$ km) du Soleil et que SoHO est au point de Lagrange L1 (à $1,5 \times 10^6$ km de la Terre), calculer :

- i) le temps que met la lumière pour aller du Soleil à GOES,
- ii) le décalage de temps entre les observations de SoHO et de GOES.

Calcul de la puissance du flux UV en W/m²

Dans la Figure 1, le flux surfacique F des UV est donné en photons par cm² et par seconde.

Q2 - Sachant que la courbe montre le flux des UV de longueurs d'onde dans le vide entre 26 et 34 nm, retrouver le flux surfacique énergétique F_w en W/m² (on prendra la longueur d'onde moyenne de 30 nm pour le calcul).

Q3 - Comparer au flux X. (On rappelle la constante de Planck : $6,62 \times 10^{-34}$ J.s)

Ionisation de la haute atmosphère

Le flash UV et X a ionisé la haute atmosphère comme le montre le dernier panneau de la Figure 1 (densité électronique mesurée par un radar EISCAT).

Q4 - De visu les concentrations électroniques à 120 km d'altitude avant et au maximum de l'émission UV. Evaluer les augmentations absolue et relative de la concentration électronique

L'éjection coronale de masse et ses effets

Vitesse de la CME et temps de propagation jusqu'à la Terre

On va dans un premier temps analyser une séquence d'images de SoHO (Figure 2) pour estimer la vitesse de propagation de la CME et son temps de parcours jusqu'à l'orbite de la Terre.

Remarque pour qui voudrait faire le test avec une autre CME. Pour être certain que la CME choisie atteigne effectivement la Terre, il est prudent de sélectionner une CME dite « halo ». Ce type de CME doit ce qualificatif au fait qu'elle semble être expulsée dans toutes les directions à partir du Soleil. En fait, il s'agit de CME qui se dirigent vers la Terre (ou dans le sens l'opposé, il faut faire attention) donc elles nous semblent gonfler tout autour du disque solaire. Un catalogue de CME halo se trouve à cette adresse :

https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/halo/halo.html.

De plus ; les images de SoHO peuvent être obtenues (ou refaites pour être plus visibles) à partir du site <http://www.heliviewer.org>.

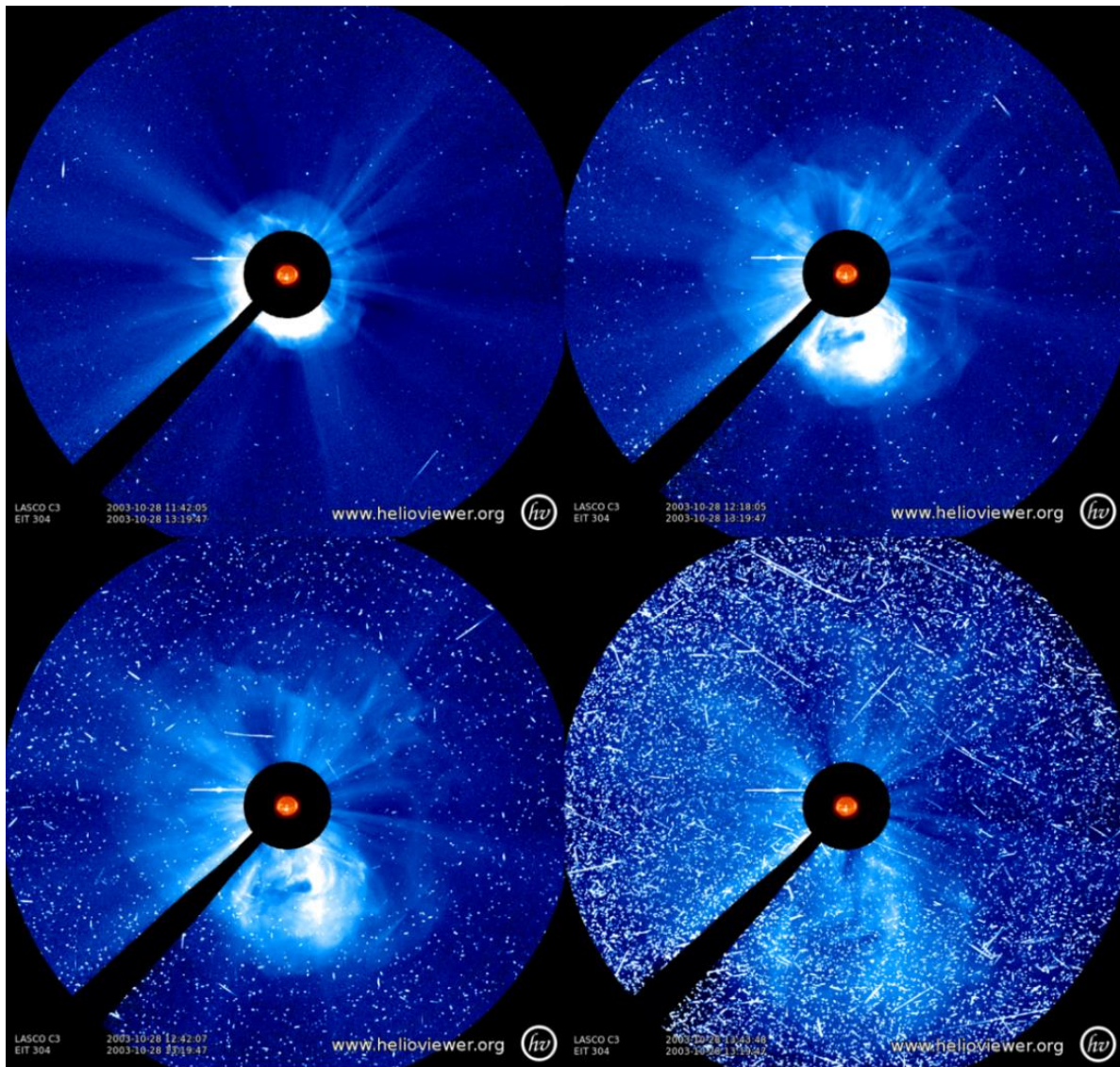


Figure 2: Images composites des instruments EIT (disque solaire en UV) et LASCO C3 (coronographe grand champ) à bord de SoHO (crédit : NASA/ESA)

Q5 - Calibration des images de la Figure 2 : mesurer le diamètre du Soleil (rouge) et connaissant son rayon ($R_{\odot} = 696 \times 10^6 \text{ m}$), déduire l'échelle de l'image. On peut faire ce même travail en prenant le bord interne du champ de vue de C3 (noir) qui est à $3,7 R_{\odot}$ du centre solaire.

Q6 - Mesurer la distance au centre du Soleil du bord limite de la CME en bas de chaque image. Tracer un graphe avec le temps LASCO C3 (indiqué en bas à gauche de chaque image de la Figure 2) en abscisse et la distance en ordonnées. En déduire la vitesse d'éjection de la CME.

Q7 - En supposant cette vitesse constante à travers l'espace interplanétaire, estimer le temps d'arrivée à la Terre en temps universel (distance Soleil-Terre $d_{ST} = 1,5 \times 10^8 \text{ km}$)

Vérification et effets magnétiques sur Terre

Nous pouvons maintenant confronter ce temps d'arrivée aux données récoltées au sol sur Terre. En effet, l'arrivée d'une CME a une signature caractéristique notamment dans les données des magnétomètres au sol qui sont très sensibles aux systèmes de courants électriques dans la magnétosphère, systèmes de courants qui sont bouleversés par la compression de la magnétosphère. Une autre signature du *sudden storm commencement* est une élévation brutale de Dst ou Sym-H.

Q8 - Afficher ce dernier dans Amda pour déterminer, à la minute près, le temps d'arrivée de CME au niveau de la Terre. Discuter ce temps d'arrivée par rapport à celui prédit précédemment.

Niveau de dose en avion

Quand le corps humain est exposé à des électrons ou des protons de haute énergie, cela s'apparente à une exposition à de la radioactivité. Les particules ont l'énergie nécessaire pour pénétrer notre organisme et aller abîmer l'ADN qui compose nos cellules. L'atmosphère nous protège de ces émissions mais lors des transports aériens, l'altitude fait que cette protection naturelle est amoindrie. Nous pouvons avoir une idée de la dose équivalente encaissée par notre organisme à bord d'un avion grâce au programme SIEVERT proposé par l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) : <https://www.sievert-system.org/#Calcul>.

The screenshot shows the SIEVERT web application interface. At the top, there is a navigation bar with the IRSN logo on the left and the SIEVERT logo on the right. The main content area is titled "Evaluez la dose reçue" and contains two columns for "DÉPART" and "ARRIVÉE". Each column has fields for "Pays" (a dropdown menu), "Ville" (a dropdown menu), "Date" (a text input field), and "Heure" (a time selection dropdown). Below these fields, there is a "Type d'avion" dropdown menu set to "Subsonique". A "Calculer" button is located at the bottom of the form. A disclaimer in French is visible below the button: "Sous réserve des modifications de la réglementation locale, les dates et heures du vol prennent en compte le décalage horaire et éventuellement l'heure d'été. Vérifier la durée du vol." The footer of the page includes the version number "Version : 2.3.7" and links for "Mentions légales", "Glossaire", "Plan du site", and "Contact".

Capture d'écran 1 : calcul de dose proposé par le système SIEVERT. (Crédit : IRSN)

Nous allons mettre en évidence deux effets. Le premier est que les particules chargées accèdent plus facilement aux basses altitudes aux pôles qu'à l'équateur. Pour cela, reprenons l'exemple du 29/10/2003 et comparons deux vols de durées équivalentes mais qui ont des

routes différentes, un Amsterdam – San Francisco qui passe par les hautes latitudes et un vol Amsterdam – Le Cap qui trace plein sud par la zone équatoriale.

Q9 - Le vol KL597 décolle à 10h20 heure locale d'Amsterdam et atterrit à 12h45 heure locale à San Francisco, soit une durée de vol de 11h25. Trouver la dose équivalente reçue par les passagers.

Q10 - Le vol KL605 décolle à 10h00 heure locale d'Amsterdam et atterrit à 21h15 heure locale au Cap, soit une durée de vol de 11h15. Trouver la dose équivalente reçue par les passagers.

Q11 – Comparer et discuter les deux vols.

Même si ces doses sont largement en-dessous des normes en vigueur (1mSv/an pour le public), elles présentent un risque potentiel pour le personnel navigant ou pour les voyageurs fréquents qui enchaînent les vols. À titre de comparaison, les français sont exposés à 1,4 mSv/an à cause des émanations naturelles de radon ; 0,8 mSv/an par les analyses médicales (radio, scanner).

Q12 - Comparons maintenant notre vol Amsterdam – San Francisco de 2003 au même vol, à la même date mais en 2008 (Soleil calme). Quelle est la dose équivalente ? Discuter avec le vol de 2003.