

CCSOM - Constraining CMEs and Shocks by Observations and Modelling throughout the inner heliosphere

Résumé

Le Soleil est l'étoile la plus proche de la Terre et de nombreux processus astrophysiques peuvent être étudiés à l'aide des multiples observations de l'activité solaire en surface et des conséquences immédiates de cette activité dans l'espace interplanétaire. La couche la plus externe de l'atmosphère solaire, la couronne, est un milieu dynamique constitué d'un plasma dans lequel se produisent les processus transitoires les plus énergétiques du système solaire, c'est-à-dire les éruptions et les éjections de masse coronale (CME). Les CME sont de grandes quantités de plasma et de flux magnétique expulsés du Soleil vers le milieu interplanétaire (héliosphère). Le vent solaire rapide, les CME et les ondes de choc provoquées par les CME sont les principaux moteurs de la météo spatiale sur Terre et la cause des tempêtes géomagnétiques qui peuvent perturber le fonctionnement des satellites, les systèmes de navigation (GPS) et les communications radio. Par conséquent, ces phénomènes sont au centre de la recherche en météorologie spatiale, et également le sujet principal du projet CCSOM. Comme les observations du Soleil et de son atmosphère ne couvrent pas l'ensemble de la distance du Soleil à la Terre, elles ne sont pas suffisantes pour prévoir les perturbations météorologiques spatiales et leur impact géomagnétique sur Terre. Ainsi, pour reconstruire la propagation du vent solaire et des CME, nous devons nous appuyer sur des modèles, comme par ex. EUHFORIA (EUropean Heliospheric FORecasting Information Asset; Pomoell & Poedts, 2018) L'objectif principal du projet CCSOM était d'améliorer les connaissances sur le vent solaire, les CME et les ondes de choc induites par les CME, ainsi que la qualité de leurs prévisions sur Terre en utilisant le modèle EUHFORIA.

Dans le cadre du projet CCSOM, plusieurs méthodes ont été employées pour combiner les observations et résultats des modélisations et valider EUHFORIA. La position 3D des CME et des jets coronaux fut déterminée par des observations de deux points de vue différents (deux satellites STEREO ou un des deux STEREO et les observations de SOHO). Pour la reconstruction des CME, la méthode la plus utilisée a été le "Forward Modelling" (Thernisien et al. 2006, 2009; voir également Mierla et al. 2009 pour plusieurs méthodes de reconstruction). Pour les observations radio, la méthode principale a été celle de la triangulation radio utilisant des observations spéciales de "direction finding" (Krupar et al. 2012; Magdalenic et al. 2014); il s'agit de la seule méthode disponible pour estimer la position 3D de sources radio dans l'espace interplanétaire.. Nous avons également utilisé différentes méthodes statistiques pour la validation d'EUFHORIA (Hinterreiter et al. 2019; Samara et al. 2021).

La question scientifique primordiale de CCSOM était: *comment les CME se propagent et évoluent à travers l'héliosphère interne?* Pour répondre à cette question nous avons simulé le vent solaire et la propagation de CME/ICME (tubes de flux) dans des conditions de vent solaire réalistes et comparé les résultats avec les observations. Les résultats principaux du projet sont regroupés en trois ensembles et résumés ci-dessous:

Modélisation du vent solaire avec EUHFORIA: la modélisation du vent solaire avec EUHFORIA a été faite avec les paramètres par défaut d'EUFHORIA, ce qui est identique à ce qui est présenté dans Pomoell & Poedts (2018). Notre étude montre que les résultats obtenus dépendent fortement du simple model coronal inclus dans EUHFORIA (Hinterreiter et al. 2019; Hofmeister et al. 2020; Asvestari et al. 2019). La comparaison des observations in situ à 1 UA et des modélisations montre, qu'en moyenne, la vitesse du vent solaire est sous évaluée tandis que la densité du vent solaire est surévaluée. Ce résultat est lié au fait que les trous coronaux petits, étroits ou allongés ne sont pas

du tout présents dans le model coronal simple d'EUHFORIA ou que leur taille est fortement sous évaluée. Ce fait peut déjà se voir dans les résultats des modélisations à la première interface (0.1 UA) d'EUHFORIA, et devient encore plus évident quand les résultats sont comparés aux caractéristiques du vent solaire à 1 UA. Cela résulte probablement des problèmes inhérents du modèle de champ magnétique Potentiel Field Source Surface (PFSS) utilisé dans le modèle coronal de base d'EUHFORIA (Asvestari et al. 2019). Pour améliorer ces résultats, l'étape suivante a consisté à implémenter et tester des nouveaux modèles coronaux. Nous avons réussi à inclure le modèle coronal MULTI-PV (Pinto et al. 2017) dans EUHFORIA et réalisé les premiers tests de validation. Les résultats montrent qu'EUHFORIA avec MULTI-VP réalise de bien meilleures performances que le mode par défaut d'EUHFORIA (Samara et al. 2021). Une analyse statistique plus poussée est nécessaire pour définir le niveau de précision de cette nouvelle combinaison et ajuster plus précisément les différents paramètres. Il est également recommandé d'implémenter et de tester d'autres modèles coronaux récemment mis au point. De plus, dans le cadre de CCSOM, une nouvelle méthode statistique appelée DTW (Dynamic Time Warping; Samara et al. 2022) a été adaptée et testée pour évaluer le degré de précision avec lequel EUHFORIA reconstitue le vent solaire.

Afin de comprendre comment le vent solaire observé au niveau de la Terre dépend des caractéristiques des trous coronaux, nous avons effectué, en parallèle des simulations du vent solaire avec EUHFORIA une étude sur les caractéristiques des trous coronaux et du vent solaire rapide associé au niveau de la Terre (Samara et al. 2022). Le but était de déterminer quel est le meilleur paramètre d'entrée pour EUHFORIA, dans la modélisation du vent solaire prenant son origine dans des trous coronaux de morphologie différente. L'étude a montré que la surface des trous coronaux, leur étendue longitudinale et leur géométrie influence fortement la manière dont le vent solaire rapide atteint la Terre. C'est la raison pour laquelle nous recommandons que ces caractéristiques des trous coronaux soient prises en compte dans les modèles de vent solaire rapide.

Implémentation et test des modèles de CME avec champ magnétique dans EUHFORIA: un des objectifs de CCSOM était d'implémenter et de tester des modèles de CME qui prennent en compte le champ magnétique dans EUHFORIA. La modélisations des CME a été faite essentiellement à partir de la liste d'événements construite au début du projet. La même liste d'événements est déjà utilisée par d'autres projets (par exemple EUHFORIA 2.0 financé par le programme H2020). Dans le cadre de CCSOM nous avons analysé différents modèles magnétiques de CME et trouvé que le modèle de type spheromak est plus facile à inclure dans EUHFORIA que le modèle de tube de flux Gibson-Law. Pour évaluer l'efficacité du modèle spheromak, plusieurs études particulières ont été faites (Verbeke et al. 2019; Scolini et al. 2019, 2020a, 2021). Les résultats obtenus montrent de bonnes performances des modèles de type spheromak dans le cas où la direction de propagation est clairement vers la Terre. De bons résultats ont été également obtenus dans le cas de CME qui interagissent (Kilpua et al. 2019; Scollini et al. 2020b). Cependant, les modèles de type spheromak sont peu appropriés au cas où le CME ne se propage pas directement vers la Terre (Asvestari et al. 2021), comme par exemple lors de la traversée du flanc du CME. Nous avons fait plusieurs analyses ciblées afin de comprendre comment utiliser au mieux les modèles sphéromak. Le principal inconvénient dans ce genre de modèles est l'absence des "jambes" du CME, qui pose un problème important en cas d'impact transverse du CME avec la Terre. La recommandation est donc d'utiliser les modèles sphéromak avec prudence. Concernant le modèle Gibson-Law, nous avons continué à aplanir les difficultés déjà mentionnées. À la fin du projet, nous avons inclus le modèle FRI3D (A. Isavnin, 2016) dans EUHFORIA. Le modèle de CME "*Flux-Rope in 3D*" a la forme d'un croissant et est de ce fait mieux adapté à la modélisation des traversées du flanc des CME. Les premiers tests

et résultats ont été publiés (Maharana et al. 2022) et un article sur un événement utilisant FRI3D dans EUHFORIA est prêt à être soumis. Une étude statistique portant sur la modélisation des CME de la liste CCSOM a été faite avec un modèle de CME en "cône" (Magdalenic et al, en préparation). Une étude similaire avec le modèle spheromak est en cours dans le cadre du projet H2020 EUHFORIA 2.0. Enfin, nous avons développé et testé de nouvelles méthodes pour obtenir les caractéristiques des CME nécessaires comme paramètre d'entrée dans EUHFORIA (décrites en détail dans les différentes publications liées à CCSOM).

Les CME et les ondes de choc: les ondes de choc ont été difficiles à modéliser avec EUHFORIA puisque les CME sont insérés dans le modèle à 0.1 UA, une distance à laquelle les chocs sont déjà majoritairement formés. C'est pourquoi, nous avons d'abord travaillé sur des modèles coronaux permettant de prendre en compte les chocs dès la basse couronne. Nos résultats montrent que les chocs induits par les CMEs peuvent être modélisés par EUHFORIA, mais que la distance entre le choc et le CME n'est reproduite de manière satisfaisante qu'aux environs de 1 UA. L'étude des ondes de choc en radio (Palmerio et al. 2019; Magdalenic et al. 2020; Morosan et al. 2020; Mann et al. 2022), et leur suivi par radio triangulation ont amené d'importantes avancées (Jebaraj et al. 2020). Nous avons modélisé les ondes de choc induites par les CME et les émissions radio associées (Kouloumvakos et al. 2020, 2021; Jebaraj et al. 2021) avec le modèle "Magneto-Hydrodynamic Around a Sphere Thermodynamic" (Lionello et al. 2009; Riley et al. 2011). La recommandation est d'implémenter dans EUHFORIA des modèles coronaux permettant l'ajout de CME dans la basse couronne.

Afin d'améliorer l'approche concernant les chocs, et d'augmenter la vitesse de simulation, nous avons développé ICARUS, un nouveau modèle de vent solaire pour EUHFORIA. ICARUS (Verbeke et al. 2022) combine une grille de calcul étirée radialement et une méthode adaptative de taille des mailles (Adaptive Mesh Refinement (AMR)). Une publication à ce sujet est soumise. Certains paramètres mènent à une accélération du temps de calcul d'un facteur 28.

Un nouveau modèle global MHD a été développé (COCONUT), partiellement sous l'égide de CCSOM. Trois publications sur le modèle et sa validation sont sur le point d'être publiées, ainsi qu'un article sur l'importance des grilles de calcul non structurées dans COCONUT (Brchnelova et al. 2022). Le modèle de CME Titov-Démoulin modifié a été ajouté à COCONUT et a montré une évolution temporelle exacte, sans vitesse initiale, simplement en laissant l'état initial évoluer de manière consistante. À l'heure actuelle, ce modèle est gourmand en temps de calcul et nous travaillons à son optimisation.

En conclusion, CCSOM a été un projet très réussi avec plus de 40 publications scientifiques dans des revues à comité de lecture, et des améliorations sensibles des modèles. Il a été le précurseur de plusieurs projets actuellement en cours (SWIM, financé par BRAIN, et EUHFORIA 2.0, projet H2020) destinés à améliorer plus encore EUHFORIA.