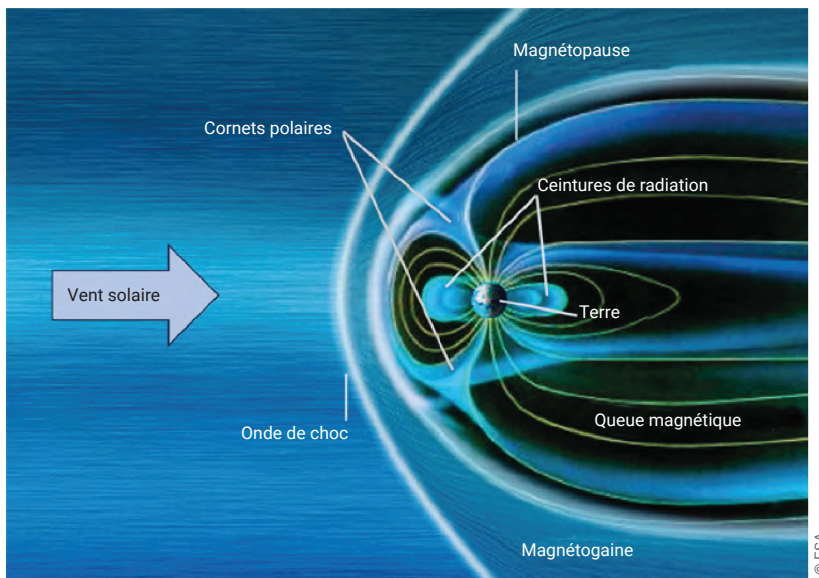


SMILE : La magnétosphère terrestre bientôt dévoilée grâce aux rayons X

Dimitra Koutroumpa (dimitra.koutroumpa@latmos.ipsl.fr),
Laboratoire Atmosphères Observations Spatiales (UVSQ, Université Paris-Saclay, Sorbonne Université, CNRS),
11 Boulevard d'Alembert, 78280 Guyancourt

La magnétosphère est un vaste bouclier magnétique qui entoure notre planète et la protège des particules chargées émises par le Soleil, appelées vent solaire. L'interaction entre champ magnétique terrestre et vent solaire relève du domaine de la météorologie spatiale. Celle-ci varie en fonction de l'activité solaire et peut impacter les technologies spatiales, les réseaux de communication, et même la vie sur Terre. Pour mieux comprendre ce bouclier invisible, une mission spatiale sino-européenne, nommée SMILE (pour *Solar wind Magnetosphere Ionosphere Link Explorer*), utilisera une technique innovante d'imagerie aux rayons X. Elle permettra ainsi pour la première fois d'observer la magnétosphère et d'étudier de façon globale sa dynamique face au forçage du vent solaire.



1. Schéma simplifié du couplage magnétosphère terrestre-vent solaire. Le vent solaire s'écoule de gauche à droite. Il est ralenti et chauffé au niveau de l'onde de choc, puis dévié à la magnétopause. L'espace entre ces limites constitue la magnétogaine. La magnétosphère, représentée par les lignes du champ magnétique terrestre, est déformée par la pression du vent solaire : comprimée du côté jour et étirée dans la queue magnétique du côté nuit. Aux pôles, les lignes ouvertes forment les cornets polaires, permettant l'entrée des particules solaires. Celles-ci peuvent être piégées, formant les ceintures de radiation.

La magnétosphère et son rôle pour la météo de l'espace

La magnétosphère, bulle de plasma qui domine l'environnement spatial de la Terre, est formée par l'interaction entre le champ magnétique terrestre, celui du Soleil et le vent solaire – un flux de particules chargées émis par le Soleil. Sa structure complexe comprend plusieurs zones (fig. 1). La magnétopause est la limite extérieure où la pression du vent solaire s'équilibre avec celle du champ terrestre. En amont, le vent solaire supersonique est brusquement ralenti et chauffé, formant une onde de choc et une zone de plasma plus chaud et dense : la magnétogaine. Sous l'effet de la pression du vent solaire, la magnétosphère est comprimée côté jour et étirée côté nuit, formant une longue queue magnétique. Aux pôles, les cornets polaires correspondent aux régions de lignes ouvertes du dipôle terrestre, facilitant l'entrée des particules solaires.

En théorie, la magnétopause – et la magnétosphère dans son ensemble, hormis les cornets polaires – est étanche au vent solaire. Toutefois, lorsque la direction du

>>>

>>>

champ magnétique solaire, entraîné par le vent solaire, s'oppose à celle du champ terrestre, leurs lignes se reconnectent, libérant de l'énergie et modifiant la dynamique du plasma [1]. Des particules solaires pénètrent alors la magnétosphère, et peuvent être piégées et accélérées, notamment dans les ceintures de radiation.

La fréquence et l'intensité des phénomènes de reconnexion sont corrélées avec l'activité solaire, qui suit un cycle d'environ 11 ans. Durant le maximum d'intensité, des éruptions solaires et des éjections de masse coronale (CME) peuvent produire des perturbations majeures dans l'environnement terrestre : orages géomagnétiques, aurores intenses, perturbations de satellites, coupures radio et dysfonctionnements électriques au sol. Ces phénomènes constituent la météo de l'espace, dans laquelle la magnétosphère joue un rôle central.

Jusqu'à récemment, l'étude de la magnétosphère reposait surtout sur des mesures *in situ* du plasma. Des missions en constellation – utilisant plusieurs satellites identiques en vol coordonné – telles que Cluster,

Themis et MMS ont révolutionné notre compréhension de la physique magnétosphérique et de la reconnexion. Leurs mesures multipoints, réalisées en formations 3D tétraédriques espacées typiquement de 10 à 600 km ont permis de sonder les échelles ioniques et électroniques. Cependant, les mesures *in situ* restent très localisées dans l'espace et le temps et exigent des observations sur plusieurs années pour reconstruire globalement la forme et position de la magnétopause.

Quelques missions ont utilisé la télédétection pour des mesures UV ou de particules neutres énergétiques, mais majoritairement pour l'imagerie aurorale (IMAGE, TWINS, POLAR). Une exception notable est IMAGE, qui a fourni les premières mesures directes à distance de la magnétopause grâce au *Radio Plasma Imager*, confirmant sa forme et son mouvement. Toutefois, ces mesures radio ne donnaient la position de la frontière que dans une seule direction à un instant *t*, d'où le besoin de multiples observations unidirectionnelles pour reconstruire la surface complète.

Émissions X par échange de charge : nuisance ou opportunité ?

Pour obtenir une vision globale de la forme et de la position de la magnétopause en s'affranchissant des contraintes spatio-temporelles des mesures *in situ*, une nouvelle technique de télédétection a été envisagée : l'imagerie par rayons X.

Cette approche s'inspire de la détection inattendue des comètes aux rayons X par le satellite ROSAT en 1996 (<https://cutt.ly/hearsarc-nasa-hyakutake>). Les comètes étant froides, leur émission X fut initialement une surprise, mais fut vite interprétée comme l'émission X par échange de charge du vent solaire qui interagit avec les neutres cométaires [2] (voir encadré).

Les mêmes émissions sont produites autour des planètes, où le vent solaire interagit avec la couche externe de l'atmosphère (appelée exosphère). Pour la Terre, les premières observations ont aussi eu lieu avec ROSAT, durant le sondage du ciel effectué en 1990-1991, avant même la détection des

ÉMISSION X PAR ÉCHANGE DE CHARGE

L'émission X par échange (ou transfert) de charge (en anglais *Solar Wind Charge-exchange X-rays* ou SWCX) est produite quand les ions multichargés du vent solaire (par exemple l'oxygène ou le carbone) entrent en collision avec les atomes neutres d'une comète ou d'une atmosphère. Minoritaires dans le vent solaire, ces ions sont formés dans la couronne solaire et transportés avec le vent solaire. Lors des collisions avec des particules neutres (a), les ions capturent des électrons dans des niveaux électroniques excités (b). Leur désexcitation produit des photons X dans la gamme d'énergie 0,1 - 2 keV (c).

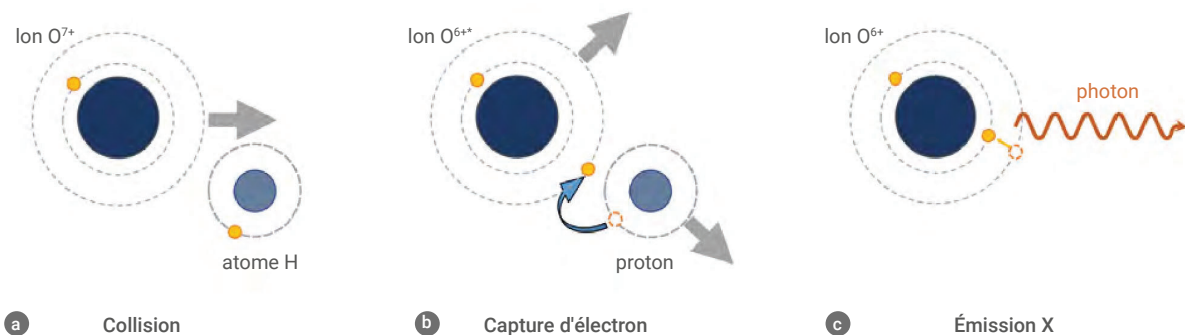
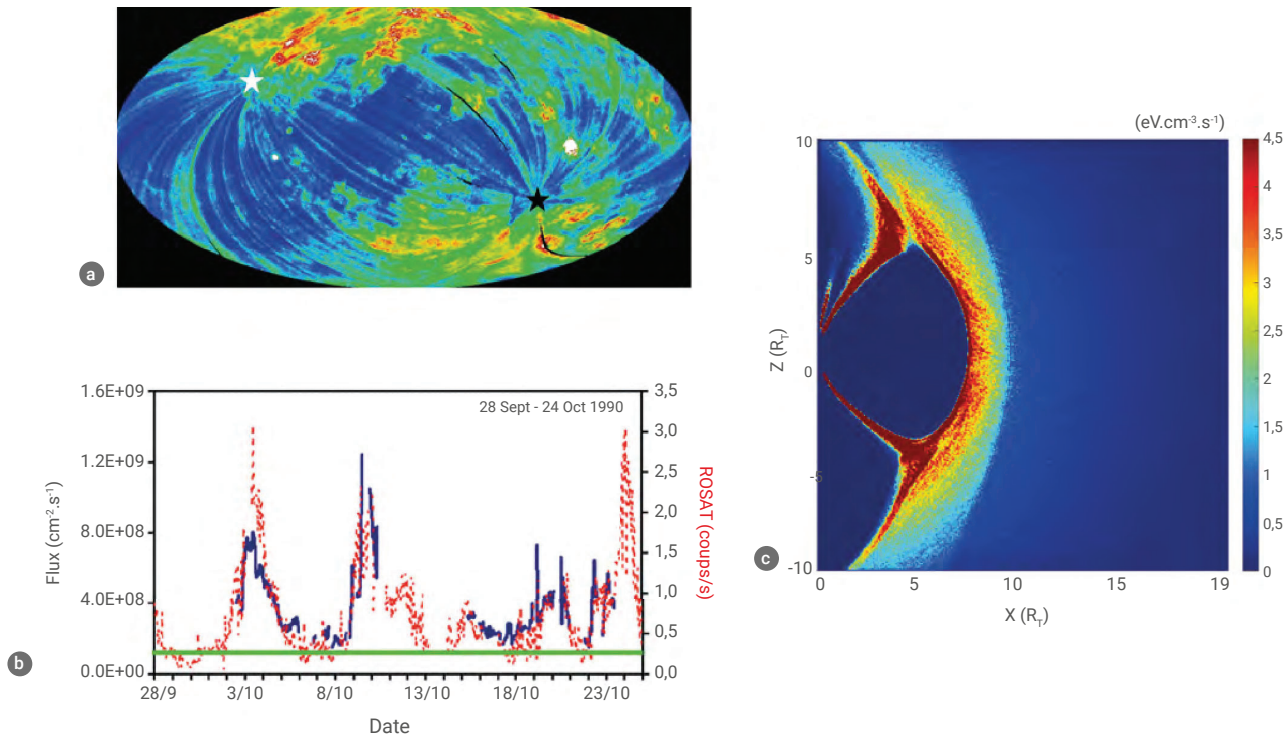


Schéma du mécanisme d'émission par échange de charge.

(a) L'ion (ex. O^{7+} , bleu foncé) entre en collision avec un atome d'hydrogène terrestre (bleu clair). Les cercles pointillés indiquent les niveaux électroniques (électrons en jaune) et les flèches grises les vitesses.

(b) L'atome H cède son électron, capté sur un niveau excité de l'ion devenu O^{6+} .

(c) Lors de la désexcitation vers l'état fondamental, l'électron émet un photon X.



2. (a) Carte X (0,1 – 0,4 keV) issue du sondage ROSAT, en coordonnées galactiques, avec le centre galactique au milieu [3]. L'échelle de couleur indique l'intensité (bleu = faible, rouge = forte). Les stries vertes reliant les pôles écliptiques nord (étoile blanche) et sud (étoile noire) proviennent de l'émission SWCX terrestre et du mode de balayage de ROSAT (grands cercles perpendiculaires à l'axe Soleil – Terre). (b) Le signal ROSAT (rouge, coups/s) suit étroitement les variations du vent solaire (bleu, particules/cm²/s), d'après [4]. La ligne horizontale verte indique la correction empirique appliquée au niveau minimal quasi constant. (c) Coupe d'émissivité SWCX (eV.cm⁻³.s⁻¹) dans le plan méridional (XZ), calculée avec le code particule-test du laboratoire Atmosphères, Observations Spatiales (LATMOS) [5]. La Terre se situe à la position (0,0), le pôle nord est vers +Z. Le vent solaire arrive de droite à gauche : la production SWCX, quasi nulle dans le vent non perturbé, augmente à l'onde de choc (~10 R_T), atteint son maximum à la magnétopause (~7 R_T) et dans les cornets. À l'intérieur de la magnétosphère, l'émission est nulle, à cause de l'absence d'ions du vent solaire.

comètes. À l'époque, ce signal terrestre, très variable et parfois plus intense que l'émission du ciel profond visée (fig. 2a), était traité comme un bruit parasite qui faussait l'interprétation des processus qui avaient réellement lieu dans les cibles astrophysiques. Son origine, d'abord inconnue, fut rapidement corrélée aux variations du vent solaire (fig. 2b). Les astrophysiciens appliquèrent alors une correction empirique au niveau minimum quasi stable pour l'éliminer et obtenir des cartes aux rayons X propres.

L'intensité SWCX (*Solar Wind Charge-exchange X-rays*) est proportionnelle à la quantité de neutres et au flux ionique, d'où sa forte corrélation avec le vent solaire. Dès lors, et grâce à l'interprétation des observations cométaires, les spécialistes du vent solaire et des plasmas spatiaux identifièrent l'émission SWCX comme un outil potentiel pour étudier l'interaction vent solaire-pla- nètes, en particulier pour la Terre.

Les ions du vent solaire étant générale- ment exclus de la cavité magnétosphérique (à l'intérieur de la magnétopause), l'émission SWCX y est quasi nulle. Dans le vent solaire non perturbé (en amont de l'onde de choc), la densité ionique est suffisante mais la densité des neutres trop faible (cette densité varie comme l'inverse du cube du rayon terrestre). En revanche, dans la magnéto- gaine, où les ions sont comprimés contre la magnétopause, la densité des neutres reste assez élevée. Ainsi, dans cette région, l'émission SWCX se retrouve amplifiée. De même, dans les cornets polaires, les ions pénètrent facilement le long des lignes de champ ouvertes et atteignent des couches atmosphériques plus denses, augmentant à nouveau l'émission. Nous obtenons ainsi un nouveau diagnostic, complémentaire des mesures *in situ*, qui permet de cartographier la magnétopause et les cornets polaires et d'étudier leurs variations temporelles (fig. 2c).

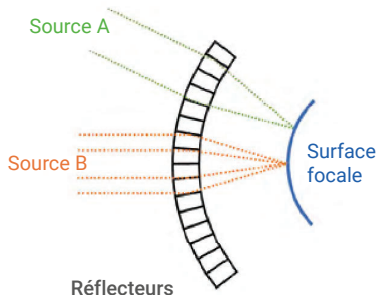
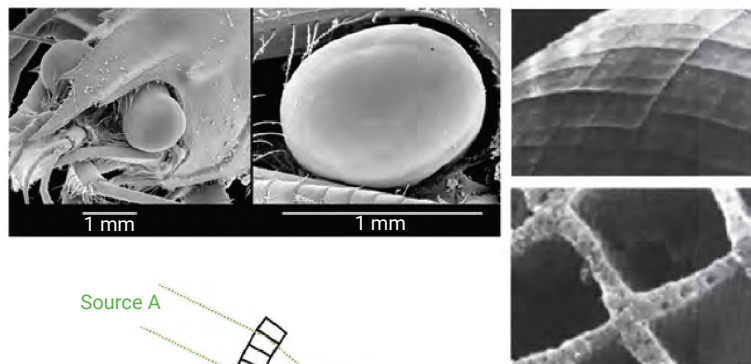
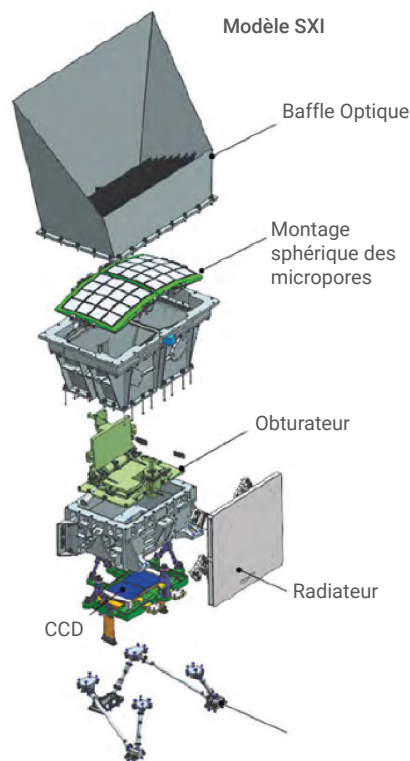
Plusieurs projets ont été proposés à la NASA (MagEX, STORM) et à l'ESA (AXIOM et AXIOM-C) afin d'exploiter cette technique de cartographie X du champ magnétique terrestre. Ces efforts ont conduit en 2015 à la sélection de SMILE, mission conjointe entre l'Agence spatiale européenne (ESA) et l'Académie des sciences chinoise (CAS).

La mission SMILE

La charge utile de SMILE comprend deux instruments de télédétection – le spectro- imageur *Soft X-ray Imager* (SXI) et un ima- geur ultraviolet auroral (*Ultraviolet aurora Imager* - UVI) – ainsi qu'un ensemble de détecteurs *in situ* regroupant un analyseur d'ions légers (*Light Ion Analyser* - LIA) et un magnétomètre (MAG) pour surveiller les propriétés du plasma dans le vent solaire et la magnéto- gaine.

SXI (fig.3 à gauche) est un télescope à grand champ, utilisant la technologie

>>>



3. Gauche : éclaté du modèle SXI montrant les principaux éléments : baffle optique, tubes à micropores, obturateur, radiateur et CCD [6].
Droite : vues à différentes échelles d'un œil de homard illustrant les micropores (Photo : ESA/J.Camp), avec en bas le schéma du principe de fonctionnement.

>>>

d'optique à micropores, pour cartographier la position, la forme et l'évolution de la magnétopause et des cornets polaires via l'émission SWCX. Il intègre deux grandes caméras CCD (*Charge-Coupled Device*) sensibles aux rayons X couvrant la gamme 0,2–2,5 keV permettant une caractérisation spectrale de l'émission [6].

Le système d'optique à micropores est aussi appelé *lobster-eye* (œil de homard), car la même géométrie se retrouve dans les yeux des crustacés (fig. 3 à droite). Les yeux du homard sont constitués de pores carrés microscopiques parallèles, disposés sur une sphère, qui réfléchissent la lumière sous un angle d'incidence faible – comme des ricochets – vers différents points de la surface focale. En combinant ces points, le homard peut voir l'objet dans son ensemble. Optimale en faible luminosité, la méthode se dégrade en forte lumière : les réflexions multiples génèrent du bruit. Elle est particulièrement adaptée aux faibles rapports signal/bruit, comme dans le domaine des rayons X.

Ce système a été testé pour la première fois en vol avec le prototype STORM (*Sheath Transport Observer for Redistribution of Mass*) lors du lancement de la fusée suborbitale DXL en 2012 [7]. Grâce à cette technologie, SXI dispose d'un large champ

de vue (15,5° x 26,5°) pour une taille relativement modeste – 85 cm avec son baffle, pour 32 kg environ – alors que l'ensemble de la plateforme SMILE mesure 3,5 m de long pour environ 700 kg. À titre de comparaison, ROSAT offrait un champ de vue de seulement 2°, pour une longueur totale d'environ 5 m et une masse de 2,4 tonnes, tandis que le télescope spatial XMM-Newton possède un champ de vue d'environ 30', pour une longueur totale d'environ 10 m et une masse de 3,8 tonnes.

UVI est une caméra UV pour imager les aurores boréales. Elle reliera les processus aux frontières de la magnétosphère (vus par SXI) à ceux affectant les particules chargées précipitant dans l'ionosphère. Basée sur un capteur numérique CCD, elle opère entre 155 et 175 nm, avec un champ de vue de 10°x10°. Sa résolution sera de 150 km à l'apogée, avec quatre miroirs à revêtement mince pour focaliser la lumière. La résolution temporelle atteindra 60 s.

LIA déterminera les propriétés et le comportement des ions du vent solaire et de la magnétogaine en mesurant la distribution 3D des vitesses des protons et des particules alpha. Il comprend deux analyseurs électrostatiques montés de part et d'autre de la plateforme. Il échantillonne la distribution 3D complète sur 4π et mesure les ions

d'énergie comprise entre 0,2 et 20 keV, avec une résolution temporelle jusqu'à 0,25 s.

MAG mesurera l'orientation et l'amplitude du champ magnétique du vent solaire et détectera les chocs et discontinuités le long de l'orbite de la sonde. Deux capteurs triaxiaux seront installés sur une perche de 3 m, espacés de ~80 cm, avec l'électronique sur le corps principal. Cette configuration permet un fonctionnement en gradiomètre et la soustraction précise du champ propre du satellite. MAG mesurera les trois composantes du champ magnétique.

La mission utilise un satellite stabilisé sur trois axes, placé sur une orbite très elliptique et inclinée (apogée de ~20 R_T et 73° d'inclinaison), d'une période d'environ 51 heures. Les opérations ont lieu au-dessus d'une altitude de 50 000 km, lorsque le satellite se trouve hors des ceintures de radiation. Cela permet de maximiser les observations continues de la magnétogaine diurne avec SXI et des aurores boréales avec UVI à chaque orbite (fig. 4 à gauche). Pendant l'essentiel de l'orbite de SMILE, les CCD de SXI opèrent en mode comptage de photons, fournissant pour chaque photon X détecté son temps d'arrivée, son énergie et sa position sur le détecteur.

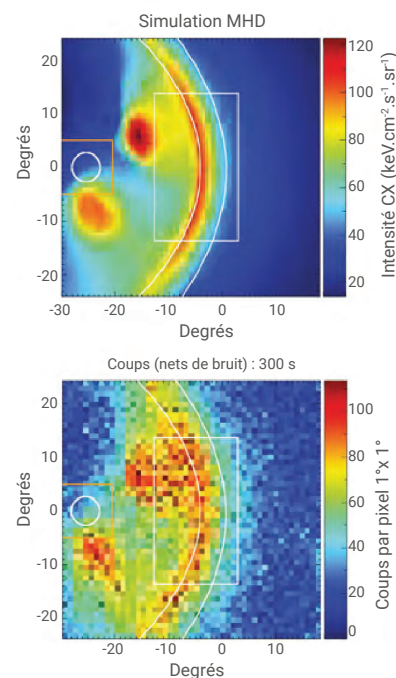
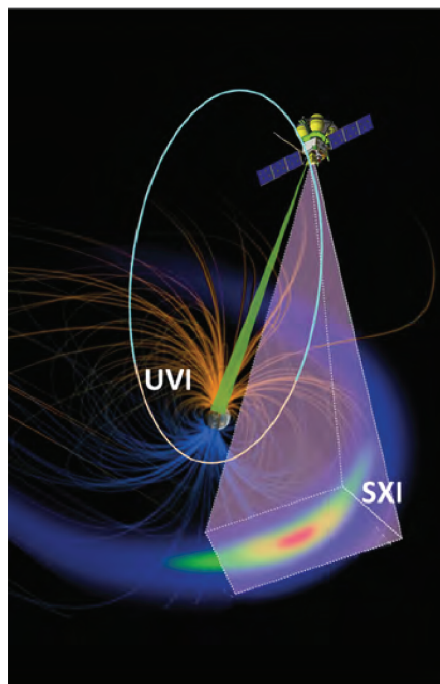
Un groupe de travail international (UK, France, Chine, USA, Autriche, Finlande) pilote les activités de simulation afin de prédire le signal SWCX et d'évaluer la capacité de SXI à satisfaire les exigences scientifiques : détection de la magnétopause et des cornets polaires. Le groupe emploie des codes magnétosphériques (MHD, hybrides, particule-test, cinétiques) pour modéliser en 3D la production SWCX, prédire les variations des frontières magnétosphériques selon les conditions de vent solaire et développer des méthodes d'extraction de la magnétopause et des cornets polaires. Les volumes simulés sont intégrés le long de la ligne de visée de SXI depuis différentes positions orbitales, combinés au signal du fond du ciel et le bruit de particules, puis traités par un simulateur de SXI afin de générer images et spectres associés selon la réponse instrumentale (fig. 4 à droite). Les résultats montrent que SXI pourra localiser la magnétopause subsolaire avec une précision d'environ $0,5 R_T$, pour un vent solaire typique ($\sim 5 \times 10^8 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) et un temps d'intégration de 5 minutes.

Conclusion

SMILE est prévu pour une durée nominale de 3 ans, extensible jusqu'à 7 ans avant désorbitation. Son lancement, prévu au printemps 2026 juste après le maximum du cycle solaire, lui permettra d'observer une large variété de phénomènes solaires énergétiques, d'étudier la réponse de la magnétosphère et de caractériser les émissions SWCX terrestres.

Ce type d'émission X est observé depuis plus de 35 ans dans divers environnements (comètes, Mars, Terre, Jupiter, milieu interplanétaire). En orbite terrestre, il a toujours été considéré comme une nuisance pour les observations astrophysiques lointaines, car il est extrêmement variable et difficilement prévisible. Avec SMILE, il devient pour la première fois l'objet central d'une mission dédiée, ouvrant des perspectives majeures pour l'héliophysique, la météo de l'espace et l'astrophysique.

L'auteure remercie Steve Sembay, Qiuyu Xu, Simona Nitti, Ronan Modolo, Jenny Carter et Colin Forsyth ainsi que le CNES qui finance les travaux de simulation des équipes françaises associées à SMILE. ■



4. Gauche : Vue d'artiste de SMILE, avec un modèle des lignes du champ magnétique terrestre (source S. Nitti, NASA). La phase active des instruments est surlignée en bleu clair sur l'orbite. Le champ de vue SXI (pyramide pâle) cible les émissions SWCX de la magnétogaine diurne. Celui de UVI (faisceau vert) vise l'empreinte du cornet polaire nord. Droite : Carte d'intensité SWCX (en $\text{keV} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$) issue de simulations MHD (haut) et image issue du simulateur SXI (bas), nette de bruit (en coups/pixel), pour le cas d'un CME impactant la Terre. Le vent solaire s'écoule de droite à gauche. Les régions de la magnétopause (arc rouge) et des cornets polaires (ovales rouge-orangé) se détachent nettement. Les courbes blanches indiquent la magnétopause (interne) et l'onde de choc (externe). Le champ de vue SXI réel (rectangle blanc) ne couvre qu'une partie de l'image. Le cercle blanc marque la Terre et le rectangle orange le champ de vue UVI. Images tirées de [8].



- 1• L. Rezeau et G. Belmont, *Reflets de la Physique* **59** (2018) 20-25, <https://doi.org/10.1051/refdp/201859020>
- 2• T.E. Cravens, *Geophysical Research Letters* **24**, 1 (1997) 105-108, <https://doi.org/10.1029/96GL03780>
- 3• S.L. Snowden et al., *The Astrophysical Journal* **691**, 1 (2009) 372-381, <https://doi.org/10.1088/0004-637X/691/1/372>
- 4• T.E. Cravens et al., *Journal of Geophysical Research* **106**, A11 (2001) 24883-24892. <https://doi.org/10.1029/2000JA000461>
- 5• Q. Xu et al., *JGR: Space Physics* **130** (2005) e2025JA034416, <https://doi.org/10.1029/2025JA034416>
- 6• S. Sembay et al., *Earth and Planetary Physics* **8**, 1 (2024) 5-14, <https://doi.org/10.26464/epp2023067>
- 7• M.R. Collier et al., *Rev. Sci. Instrum.* **86** (2015) 071301, <https://doi.org/10.1063/1.4927259>
- 8• G. Branduardi-Raymont et C. Wang, "The SMILE Mission", *Handbook of X-ray and Gamma-ray Astrophysics* **95** (2022), <https://doi.org/10.48550/arXiv.2208.03757>