

LA MISSION SOLAR ORBITER, PREMIERS RÉSULTATS UN AN APRÈS LE DÉBUT DE LA PHASE SCIENTIFIQUE NOMINALE

Milan Maksimovic, Directeur de Recherches au CNRS, Astrophysicien au LESIA, Observatoire de Paris, responsable de l'instrument RPW (Radio & Plasma Waves)

Cette mission est destinée à comprendre le mécanisme des émissions solaires. Elle devrait permettre de résoudre l'énigme du chauffage étonnant de la couronne solaire et de réduire l'impact des activités solaires sur les activités humaines.

Ce premier novembre 2022, la sonde Solar Orbiter a accompli la première année de sa phase scientifique nominale. Principalement développée et financée par l'Agence spatiale européenne (en anglais ESA pour European Space Agency) et les états membres, avec une participation américaine de la NASA (National Aeronautics and Space Administration), la sonde a été lancée le 10 février 2020 depuis Cap Canaveral en Floride. Depuis, elle a parcouru plus de 2 milliards 932 millions de kilomètres, a subi trois assistances gravitationnelles par Vénus et une par la Terre qu'elle a frôlée à seulement 460 km d'altitude pour se retrouver sur sa trajectoire elliptique actuelle avec un périhélie¹ de 0,29 unité astronomique² du Soleil. Ce périhélie sera atteint le 11 avril 2023.

La mission Solar Orbiter, doit répondre principalement à la question « Comment le Soleil crée-t-il et contrôle-t-il son héliosphère ? », région de l'espace soumise à l'influence du vent solaire (flux de particules électriquement chargées) et qui englobe l'ensemble du Système solaire. Ce programme a formellement été approuvé par le Comité des programmes scientifiques de l'ESA en octobre 2011. Il est le fruit de deux décennies de soutien et de promotion scientifique d'une communauté astrophysique constituée à la fois par les physiciens « solaires », traditionnellement observateurs du Soleil et de sa couronne par imagerie, et par les spécialistes des plasmas astrophysiques accessibles depuis l'espace. La sonde Solar Orbiter comporte une charge utile de dix instruments dédiés à l'étude du Soleil, de son vent solaire ainsi que de l'héliosphère interne (la plus proche du Soleil).

L'humanité vit dans l'atmosphère étendue du Soleil qu'est l'héliosphère. Comprendre les connexions et le couplage entre le Soleil et l'héliosphère est d'une importance fondamentale pour nos sociétés qui dépendent fortement de technologies de communication satellitaires sensibles aux perturbations d'origine solaire.

¹ Endroit de la trajectoire qui est au plus proche du Soleil,

² L'unité astronomique (UA) est la distance entre la Terre et le Soleil, soit environ 150 millions de kilomètres.

Pourquoi étudier le vent solaire ?

Le vent solaire est le résultat de l'expansion thermique de la couronne solaire qui, suite à une température élevée à sa base, ne peut rester en équilibre hydrostatique autour du Soleil. En effet, la couronne solaire, dont la température est de l'ordre de 5 500 kelvins à sa base, voit sa température atteindre brutalement environ un million de kelvins à une altitude de l'ordre de 2 000 km. Cette énergie thermique est ensuite convertie en énergie cinétique pour donner naissance à un vent qui devient supersonique à une distance de quelques rayons solaires du Soleil et dont la vitesse d'expansion est ensuite comprise entre 200 et 800 km/s. Par quel(s) mécanisme(s) et par le biais de quelle(s) source(s) d'énergie la couronne solaire est-elle chauffée ? Quelle est la physique exacte de l'accélération du vent solaire et notamment de celle du vent rapide (≈ 800 km/s) qui est émis par les trous coronaux solaires où la température des électrons du plasma est paradoxalement plus faible que dans le reste de la couronne ? Malgré une série quasi ininterrompue de missions spatiales solaires lancées à partir des années 1960 et malgré de nombreux progrès à la fois observationnels et théoriques réalisés durant cette période, ces questions, qui sont probablement liées, constituent une des dernières grandes énigmes de la physique solaire, avec des implications probables pour la physique stellaire en général et les relations entre les nombreuses exoplanètes et leurs étoiles respectives.

Le magnétisme solaire, moteur de l'héliosphère

Le champ magnétique du Soleil, qui joue un rôle central dans la quasi-totalité des problématiques scientifiques abordées par Solar Orbiter, est créé à l'intérieur de notre étoile par ce qu'on appelle l'effet dynamo. D'immenses structures magnétiques sont générées au sein du Soleil et s'élèvent vers la surface par poussée d'Archimède en formant de larges arches. Une fois émergées, celles-ci créent les taches solaires visibles sur la surface – zones de

champ magnétique intense et de température inférieure à celle de la surface environnante – ainsi que les boucles magnétiques observables dans l’atmosphère du Soleil. Ces boucles, ancrées à la surface du Soleil peuvent stocker, sous forme magnétique, de grandes quantités d’énergie mécanique associée aux mouvements convectifs de la photosphère (surface visible du Soleil). Ces derniers sont similaires aux mouvements de bouillonnement de l’eau d’une casserole posée sur une plaque chauffante. Quand les boucles magnétiques coronales deviennent instables, de gigantesques éruptions se produisent alors et génèrent un très grand nombre de particules énergétiques (ions, électrons, neutrons...) et de photons visibles, gamma, X et ultraviolets, comme le feraient les grands accélérateurs de particules sur Terre. Une fraction, parfois importante, de ces particules énergétiques peut s’échapper de la couronne solaire vers le Système solaire. En parallèle, ces éruptions solaires peuvent parfois éjecter des quantités phénoménales de matière, sous forme de plasma (typiquement 10^{12} kg), à une vitesse de plusieurs centaines de kilomètres par seconde. Les conséquences de l’impact de ces éjections coronales dites de masse et de ces particules énergétiques sur les magnétosphères, les atmosphères planétaires et les satellites artificiels constituent le sujet d’étude de la météorologie de l’espace. Cette discipline étudie l’impact de l’activité solaire sur les activités humaines, des routes aériennes polaires aux voyages interplanétaires en passant par les télécommunications ou bien la qualité du signal GPS.

Solar Orbiter, son profil de mission et son instrumentation

Le principe de base de la mission Solar Orbiter est de s’approcher le plus possible du Soleil afin de capturer et caractériser, par imagerie, le déclenchement des éruptions solaires et des éjections coronales de masse, puis analyser *in situ* le plasma constitutif de ces bourrasques de vent solaire avant que leurs propriétés ne soient modifiées par leur propagation dans l’héliosphère. Après avoir été générée, une éjection coronale de masse typique met une quarantaine d’heures pour atteindre l’orbite terrestre. Solar Orbiter, qui peut s’approcher à moins d’un tiers d’UA du Soleil, permettra d’observer la matière coronale générée par une éruption solaire seulement une douzaine d’heures après sa naissance.

La sonde européenne a donc été lancée le 10 février 2020 par un lanceur américain fourni par la NASA et a emporté une batterie complète de dix instruments, dont l’accommodation sur la sonde est illustrée sur la figure 1. Parmi ces derniers, quatre – dits instruments *in situ* – permettent une caractérisation détaillée des particules et des champs électriques et magnétiques du vent solaire

localisés autour de la sonde. Il s’agit de l’analyseur du vent solaire SWA (Solar Wind Analyser), du détecteur de particules énergétiques EPD (Energetic Particle Detector), du magnétomètre à saturation MAG (Magnometer) et de l’analyseur d’ondes radio et de plasma RPW (Radio and Plasma Wave analyser). Les six autres instruments – dits de télédétection – fournissent, *via* imagerie et spectroscopie à haute résolution et grand champ, des diagnostics du plasma solaire depuis l’intérieur de l’étoile jusqu’à la naissance du vent dans la couronne.

Ces instruments sont : l’imageur-polarimètre PHI (Polarimetric and Helioseismic Imager), l’imageur ultraviolet extrême EUI (Extreme Ultraviolet Imager), l’imageur spectral 2D de l’environnement coronal fonctionnant dans l’ultraviolet extrême SPICE (Spectral Imaging of the Coronal Environment), le spectro-imageur rayons X STIX (Spectrometer/telescope for Imaging X-rays), le coronographe visible et ultraviolet METIS/COR (Multi Element Telescope for Imaging and Spectroscopy / Coronagraph) ainsi que l’imageur SolO-HI (Solar Orbiter-Heliospheric Imager).

La communauté scientifique française, le CNES (Centre national d’études spatiales) ainsi que le CNRS (Centre national de la recherche scientifique) ont été très impliqués dans le développement de RPW, SWA, EUI, SPICE, PHI et STIX. Par ailleurs, en plus de sa contribution à la mission via le lanceur, la NASA a également fourni l’ensemble de l’instrument SolO-HI ainsi que des parties des instruments SWA et EPD.

Après une phase de croisière de près de 20 mois et plusieurs manœuvres d’assistance gravitationnelle autour de Vénus et de la Terre, la sonde a été placée sur une orbite elliptique autour du Soleil et en fait le tour en 168 jours. À son périhélie de 0,29 UA la sonde est plus proche du Soleil que la planète Mercure. En plus de diminuer le temps de propagation des perturbations solaires dans l’héliosphère interne, ce périhélie de 0,29 UA permet d’obtenir les images de la couronne avec la meilleure résolution jamais atteinte (environ 100 km sur le Soleil). Cette orbite réduit également la rotation apparente du Soleil durant les passages au périhélie, permettant ainsi des observations prolongées des régions qui produisent les perturbations mesurées dans le vent solaire. Du fait de cette orbite particulière, la sonde et son instrumentation sont soumis à un environnement thermique très rude car le flux de rayonnement solaire atteint à 0,29 UA est environ treize fois supérieur à celui qui arrive au niveau de la Terre. Cette contrainte a donc imposé l’utilisation d’un bouclier thermique constitué de plusieurs couches de feuilles de titane et d’aluminium, et recouvert sur sa face avant d’un matériau noir, l’*Enbio Black* (du nom de la société irlandaise qui le produit) ou *Solar Black* spécialement conçu pour cette mission. La face avant du

bouclier, en permanence exposée à la lumière du Soleil, peut ainsi atteindre plus de 500 °C, tandis que la sonde et les instruments en son sein, protégés derrière ce bouclier seront dans leur zone de confort thermique entre -40 et +50 °C.

La mission scientifique primaire (nominale) de Solar Orbiter doit durer cinq ans. Une extension de mission, si elle a lieu à partir de 2026, permettra, grâce à de nouvelles manœuvres gravitationnelles autour de Vénus, d'incliner l'orbite de la sonde jusqu'à 30° par rapport au plan de l'écliptique (le plan de l'orbite de la Terre et

de la plupart des planètes autour du Soleil). Cette orbite originale devrait offrir un avantage inédit : observer pour la première fois par imagerie les pôles de notre étoile.

Complémentarité avec la mission américaine Parker Solar Probe

Lancée le 12 août 2018, la sonde de la NASA Parker Solar Probe (PSP) – appelée ainsi en l'honneur d'Eugene Parker, astrophysicien américain spécialiste de physique solaire – est en quelque sorte la cousine de Solar Orbiter (SO). Bien

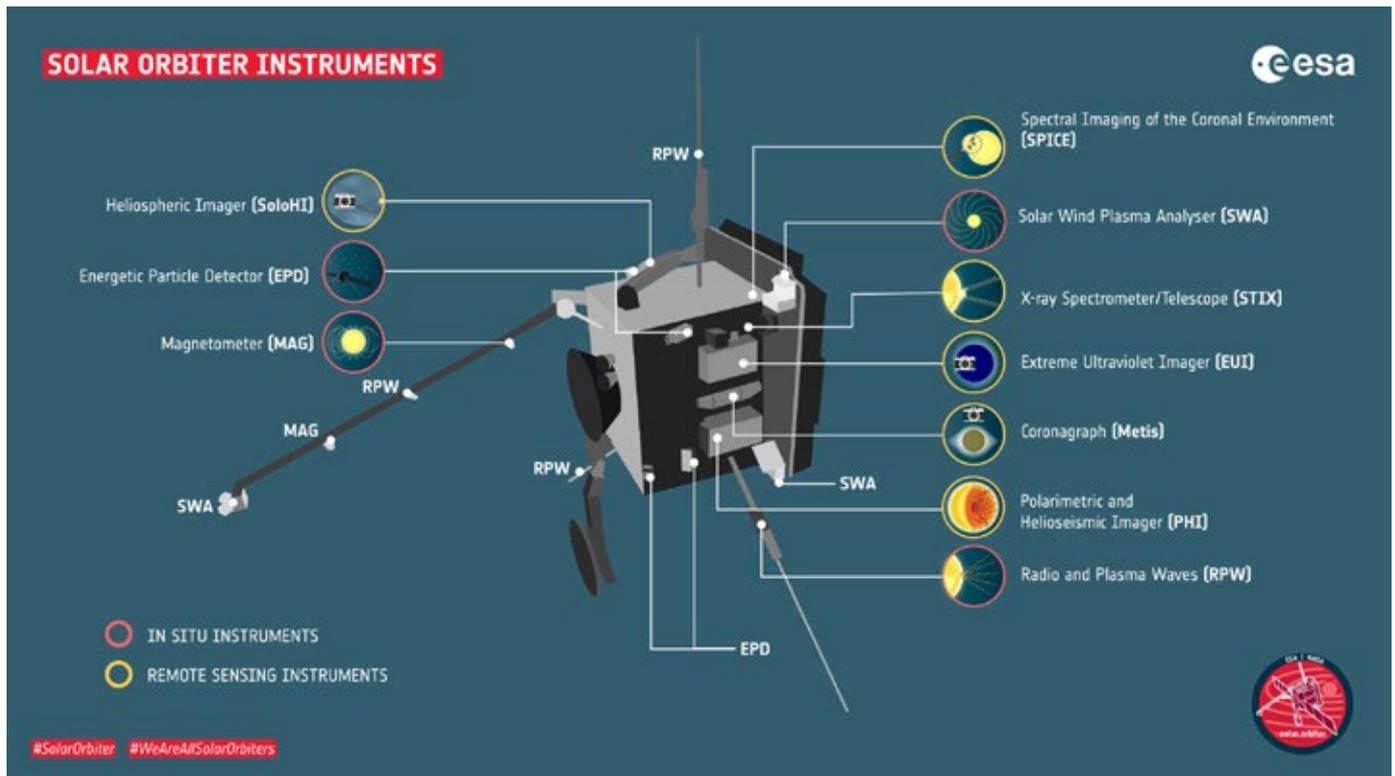


Fig.1. Les instruments de Solar Orbiter.

que leur genèse et leurs parcours programmatiques soient indépendants, elles sont fortement complémentaires. En fin de mission, vers 2025, PSP s'approchera bien plus près que Solar Orbiter du Soleil, à dix rayons solaires, soit environ 6 millions de kilomètres seulement de sa surface.

À cette distance, il n'est pas question de faire d'image du Soleil car le flux de photons est bien trop important. PSP effectuera essentiellement des mesures et, lorsque les deux sondes seront alignées, PSP analysera le plasma des éjections coronales de masse entre le Soleil et Solar Orbiter. Une dizaine d'alignements de ce type sont prévus d'ici à 2025. Ces configurations sont très intéressantes car elles permettent de mesurer la même perturbation solaire en trois endroits de l'espace : dans la couronne par imagerie obtenue par Solar Orbiter, puis in situ par PSP et enfin à nouveau in situ par Solar Orbiter.

Premiers résultats de la mission

Des micro-éruptions dans la couronne solaire

Les premières images obtenues de la couronne de notre étoile le 30 mai 2020, pour la première fois à une distance de 0,5 UA par Solar Orbiter, révèlent l'existence probable d'une grande quantité de toutes petites éruptions solaires, de faible intensité. Ces *micro-éruptions* pourraient jouer un rôle important dans les processus de chauffage de la couronne.

La figure 2 montre une image de la couronne solaire obtenue par l'imageur ultraviolet extrême (EUI) à des longueurs d'onde de 17 nanomètres, correspondant à un plasma dont la température avoisine le million de degrés, et à très haute résolution spatiale. La couleur sur cette image est artificielle car la longueur d'onde originale de l'instrument est invisible à l'œil humain. Cette image révèle une multitude de petites structures

comme celles indiquées par les flèches. Il s'agit de boucles flamboyantes, de points lumineux en éruption et de fibrilles sombres qui sont mobiles lorsqu'on accumule les images pour en faire un film. Ces structures coronales ont été dénommées *feux de camp* (*campfire* en anglais) à l'occasion de cette première observation par Solar Orbiter. Il s'agit de minuscules éruptions solaires qui sont omniprésentes et qui ont des tailles caractéristiques comprises entre 400 et 4 000 km. À noter le cercle dans le coin inférieur gauche de l'image, qui indique la taille de la Terre par comparaison.

Selon certaines théories, ces éruptions miniatures pourraient être considérées comme le *graal* de la

physique solaire, en expliquant le fameux réchauffement de la couronne solaire mentionné précédemment. En effet si chacune de ces micro-éruption libère une énergie insignifiante dans l'atmosphère de notre étoile, l'effet additionné d'un très grand nombre de ces objets pourrait constituer la principale contribution à son réchauffement global. Une analogie qui permet d'illustrer ce mécanisme de chauffage est la suivante. Si on fait brûler une allumette dans le salon d'une maison l'hiver, le réchauffement de la pièce sera imperceptible. Par contre si on fait brûler toutes les dix secondes plusieurs milliers d'allumettes dans le salon, on aura un chauffage qui sera efficace.

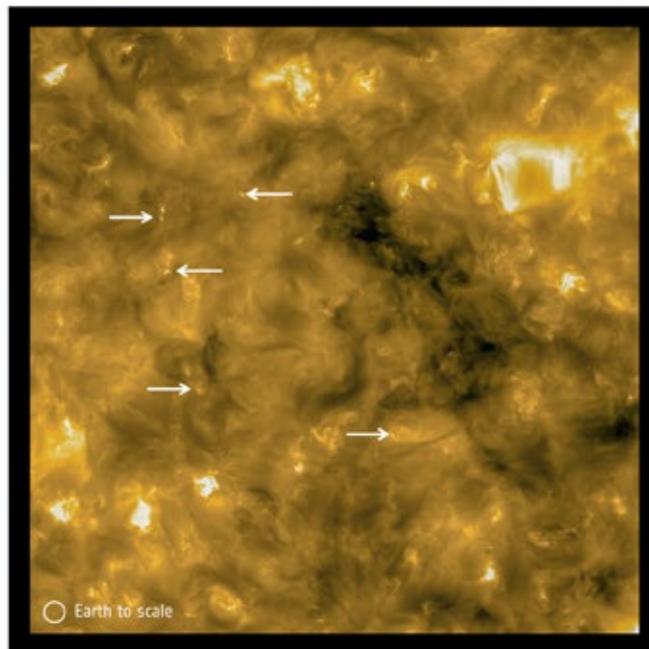


Fig.2. Les « feux de camp » découverts par Solar Orbiter d'après Berghmans et al., A&A 656 (2021), DOI 10.1051/0004-6361/202140380.

Émissions radio solaires

L'instrument RPW, dont j'ai la responsabilité scientifique depuis le début du projet, permet à la fois des observations in situ (ondes plasma locales) et des mesures de télédétection par le biais des émissions radio solaires que RPW permet de détecter dans la gamme de 4 kHz à 16 MHz. Cette gamme de fréquences, en dessous de la coupure radio ionosphérique, permet d'observer les émissions radio solaires interplanétaires dites de *type III* (sous classe d'émissions radio solaires). Ces sursauts radio sont produits par des faisceaux d'électrons sub-relativistes (dont les vitesses typiques sont comprises entre 0,03 et 0,3 fois la vitesse de la lumière), accélérés lors d'éruptions solaires au voisinage des régions actives à la surface du Soleil, et se propageant dans la couronne solaire puis dans le milieu interplanétaire le long de lignes de champ magnétique ouvertes. Le passage de ces

faisceaux génère localement des ondes électrostatiques, dites ondes de Langmuir, qui résultent de l'oscillation naturelle des électrons ambiants à la fréquence de plasma caractéristique F_p , qui ne dépend que de la densité électronique du milieu ambiant. C'est la relaxation des ondes électrostatiques qui entraîne la production d'ondes électromagnétiques à la fréquence F_p (dite émission fondamentale) et/ou $2 F_p$ (dite émission harmonique) par un mécanisme de conversion électrostatique vers électromagnétique non encore parfaitement compris. Ainsi comme la densité du plasma du vent solaire ambiant décroît avec la distance, la fréquence des ondes radio de type III décroît rapidement des hautes aux basses fréquences, en même temps que le faisceau d'électrons énergétiques s'éloigne du Soleil. Cette décroissance crée *une virgule* typique sur les spectrogrammes radio de l'instrument RPW comme celle que l'on peut voir sur la figure 3.

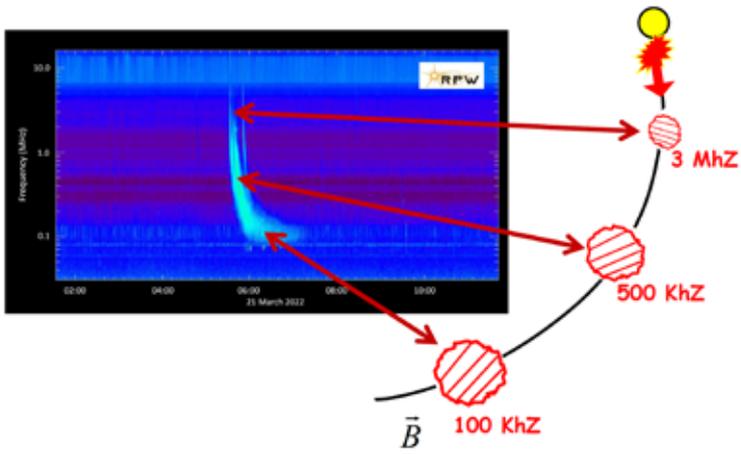


Fig.3. Décroissance des fréquences des ondes radio de type III.

L'étude des émissions solaires de type III est intéressante en soi, pour ce qui concerne la physique des plasmas astrophysiques. Cependant ce phénomène est très utile pour repérer les faisceaux d'électrons énergétiques injectés dans le milieu interplanétaire par le Soleil. En effet ces derniers ne peuvent être observés directement et caractérisés par l'instrument EPD que lorsqu'une sonde spatiale se trouve sur le chemin du faisceau et l'intercepte. Cela n'est bien sûr pas le cas de tous les faisceaux injectés par le Soleil dans les 4π stéradians de l'espace. Les émissions radio de type III permettent, par contre, de repérer les faisceaux, quelles que soient leurs directions d'injection. Ainsi il est très fréquent qu'une sonde puisse voir les émissions radio de type III d'un faisceau émis à l'opposé diamétral de l'endroit où elle se trouve.

C'est ainsi que l'instrument RPW sur Solar Orbiter a contribué aux premières observations et *hélio-localisation* d'une émission radio solaire de type III avec quatre sondes différentes. Cette première est illustrée par la figure 4. Le panneau de gauche de cette figure représente les spectres dynamiques des flux radio observés par les quatre sondes utilisées pour cette étude (de haut en bas : Solar Orbiter, Parker Solar Probe, Stereo-A et WIND) qui concerne une éruption solaire ayant eu lieu le 11 juillet 2020 vers 2 h 30. Le panneau en haut à droite montre les positions respectives des quatre sondes ainsi que le résultat de l'*hélio-localisation* du faisceau d'électrons (croix et lignes tiretées violettes). Le panneau en bas à droite présente les courbes de lumière mesurées à 634 kHz par les quatre sondes, dont l'analyse a permis cette localisation.

Pour une mission qui a débuté il y a tout juste un an sa phase scientifique principale, Solar Orbiter a déjà produit beaucoup de résultats remarquables. Paru le 14 décembre 2021, un numéro spécial d'*Astronomy and Astrophysics* rassemble une multitude d'études et d'observations obtenues lors de la phase de croisière de la mission (à noter que sur les 56 articles publiés, 25 se basent sur des données de RPW). Un nouveau numéro est en préparation pour le début de 2023. Solar Orbiter n'en est qu'à ses débuts prometteurs. Cette mission permettra, dans les années qui viennent, d'améliorer grandement nos connaissances sur le Soleil et son fonctionnement.

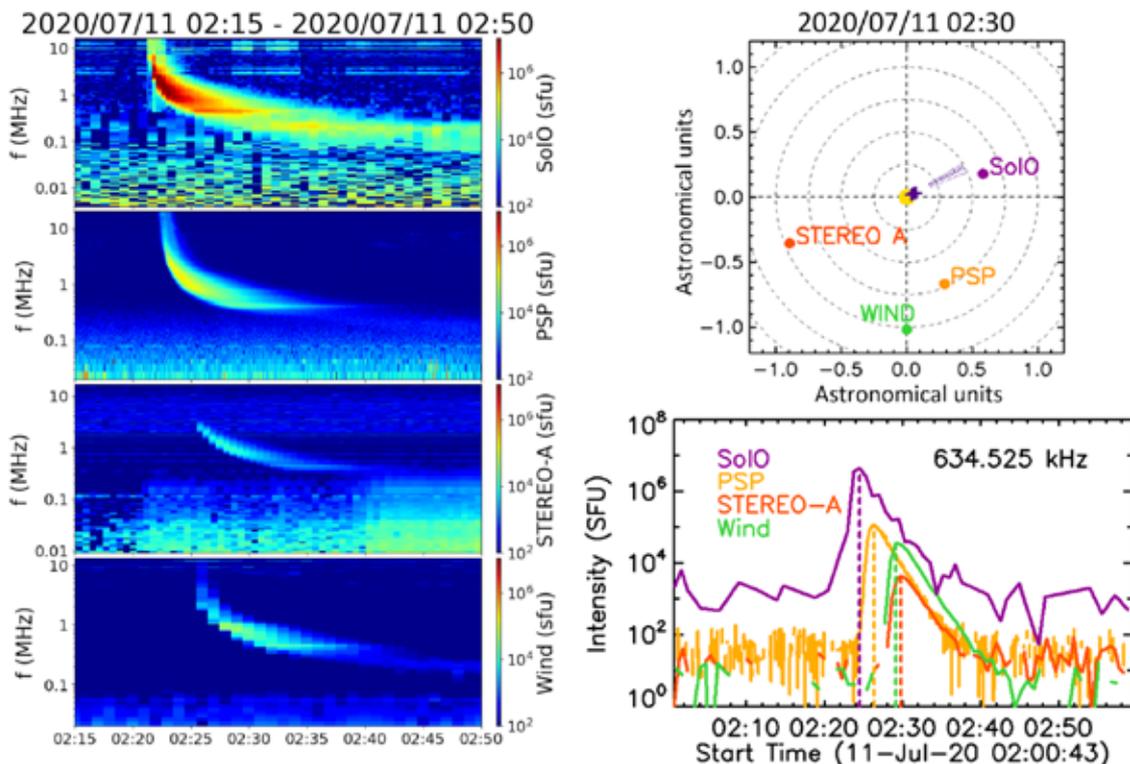


Fig.4. Spectres dynamiques des flux radio, position des sondes et courbes de lumière d'après Musset S. et al., A&A 656 (2021), DOI : 10.1051/0004-6361/202140998.