

solar orbiter

→ FACE AU SOLEIL

MISSIONS SCIENTIFIQUES SPATIALES DE L'ESA

système solaire

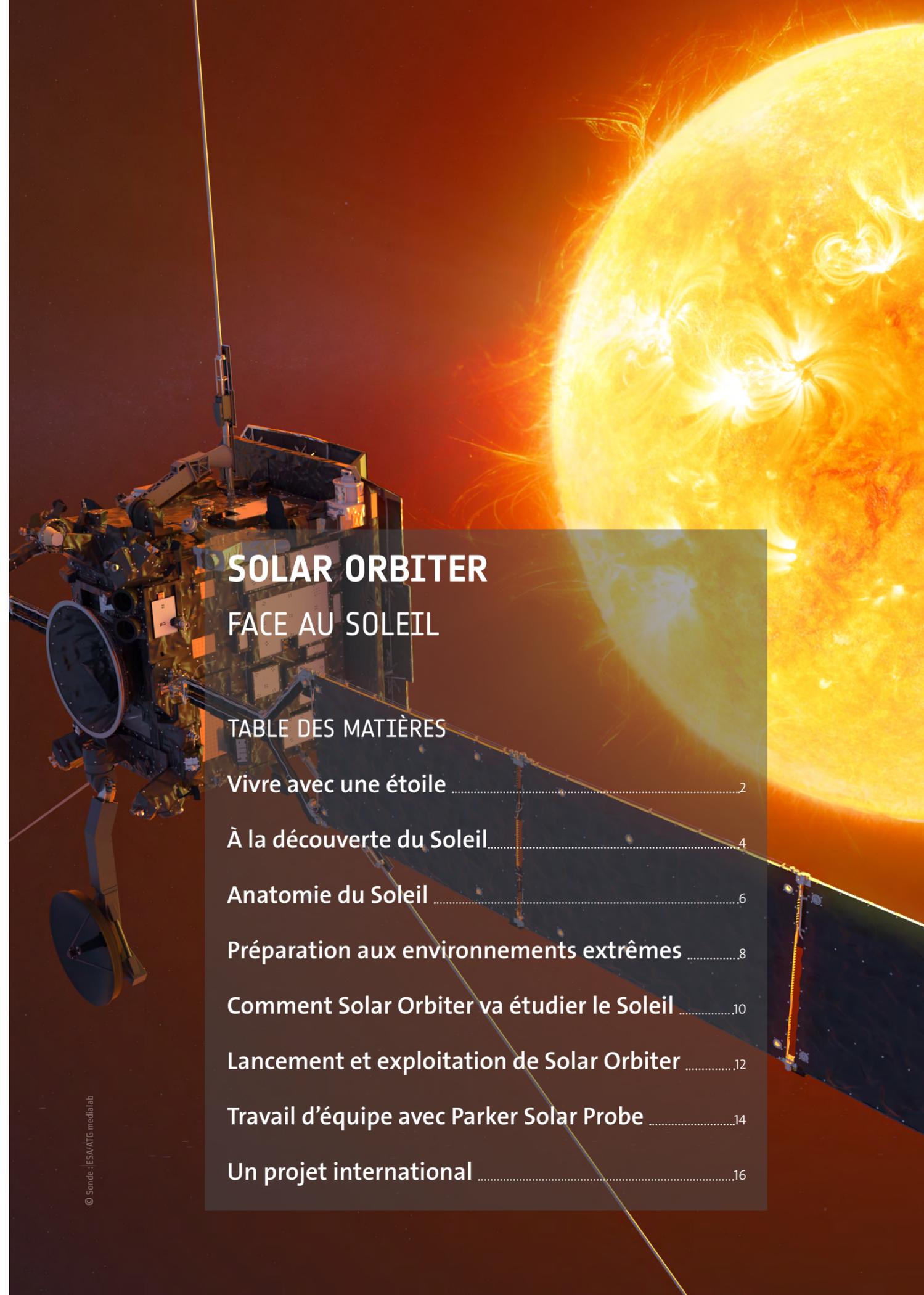
-  **bepicolombo**
Première mission européenne à destination de Mercure pour étudier la structure interne, la surface, l'atmosphère et la magnétosphère de cette planète peu connue afin d'en dévoiler les origines.
-  **cassini-huygens**
Étudier le système de Saturne grâce à la sonde Huygens de l'ESA larguée à la surface de Titan, le plus important satellite de Saturne.
-  **cluster**
Une mission de quatre satellites pour étudier les interactions entre le Soleil et la magnétosphère terrestre avec un niveau de détail inégalé.
-  **juice**
Explorer les lunes glacées de Jupiter, procéder à des observations détaillées de la géante gazeuse et évaluer le potentiel d'habitabilité de ses principaux satellites glacés.
-  **mars express**
Première mission européenne à destination de Mars, fournissant une vue globale sans précédent de l'atmosphère, de la surface et du sous-sol de la planète rouge.
-  **rosetta**
Première mission à survoler et à poser une sonde sur une comète pour étudier les éléments constitutifs du Système solaire.
-  **soho**
Fournir de nouvelles vues sur l'atmosphère et la structure interne du Soleil, et sur les origines du vent solaire.
-  **solar orbiter**
Une mission visant à étudier le Soleil au plus près, en recueillant des données et des images à haute résolution de notre étoile et de son héliosphère.
-  **venus express**
Le premier engin spatial à effectuer une étude globale de l'atmosphère dynamique de Vénus.

astronomie

-  **cheops**
Caractériser les exoplanètes connues, en orbite autour d'étoiles proches et brillantes.
-  **euclid**
Explorer la nature de la matière noire et de l'énergie sombre pour tenter de comprendre pourquoi l'expansion de l'Univers s'accélère et la croissance de la structure cosmique.
-  **gaia**
Recenser une partie des objets célestes afin de trouver des indices sur l'origine, la structure et l'évolution de la Voie lactée.
-  **herschel**
Réaliser des observations dans l'infrarouge pour percer les secrets de la formation et de l'évolution des étoiles et des galaxies.
-  **hubble space telescope**
Repousser les frontières de l'Univers visible, en observant les horizons lointains grâce à des caméras qui peuvent voir dans les domaines visible, infrarouge et ultraviolet.
-  **integral**
Le premier observatoire spatial à observer simultanément des objets célestes dans les rayonnements gamma, X et en lumière visible.
-  **jist**
Observatoire spatial dédié à l'observation des premières galaxies, révélant la naissance d'étoiles et de planètes, et à la recherche de planètes pouvant supporter la vie.
-  **lisa pathfinder**
Tester les technologies nécessaires pour détecter les ondes gravitationnelles, afin de comprendre la physique fondamentale qui sous-tend le tissu de « l'espace-temps ».
-  **planck**
Détecter la lumière originelle de l'Univers en regardant vers l'origine du temps.
-  **plato**
Étude de planètes de type terrestre en orbite dans la zone habitable d'une étoile semblable au Soleil, et caractérisation de ces étoiles.
-  **xmm-newton**
Résoudre les mystères de l'Univers dans le rayonnement X, des énigmatiques trous noirs à la formation de galaxies.

exploration

-  **exoMars**
Deux missions comprenant un orbiteur pour étudier l'atmosphère martienne, une plate-forme scientifique de surface et un rover pour rechercher des traces de vie dans le sous-sol.



SOLAR ORBITER FACE AU SOLEIL

TABLE DES MATIÈRES

- Vivre avec une étoile2
- À la découverte du Soleil4
- Anatomie du Soleil6
- Préparation aux environnements extrêmes8
- Comment Solar Orbiter va étudier le Soleil10
- Lancement et exploitation de Solar Orbiter12
- Travail d'équipe avec Parker Solar Probe14
- Un projet international16

Une production ESA

BR-345/FR janvier 2020

Auteur Stuart Clark
 Conception ReMedia IT
 ISBN 978-92-9221-116-5
 ISSN 0250-1589
 Copyright © 2020 European Space Agency

→ VIVRE AVEC UNE ÉTOILE

SOHO observe un orage solaire (image composite)

SOHO (ESA & NASA), SDO (NASA), JHelioviewer (ESA)

Les hommes connaissent depuis toujours l'importance du Soleil pour la vie sur Terre, et différentes missions ont déjà été organisées pour en savoir plus. Tirant parti de ces expériences, Solar Orbiter offrira à l'Europe, à partir de 2020, un poste d'observation plus proche que jamais du Soleil.

Des hommes de l'Âge de pierre qui alignaient des menhirs pour observer le Soleil se lever à différents moments-clés de l'année, en passant par les astronomes du 19^e siècle qui ont commencé à en dévoiler les secrets scientifiques, notre fascination pour le Soleil ne date pas d'hier. Nous savons désormais qu'en plus d'apporter la chaleur et la lumière nécessaires à la vie sur notre planète, le Soleil interagit aussi avec nous de façon électromagnétique. Bien que tous ces effets soient imperceptibles pour la plupart des êtres vivants, ils sont importants car ils peuvent influencer sur le fonctionnement de la technologie.

Comprendre en détail comment le Soleil fonctionne est essentiel pour savoir comment il génère son énergie indispensable à la vie et pour protéger notre technologie ainsi que notre mode de vie.

Les taches sombres visibles sur la surface du Soleil, ou « taches solaires », sont connues depuis l'antiquité. Au début du 17^e siècle, l'astronome italien Galilée et l'astronome allemand Christoph Scheiner ont utilisé les premiers télescopes pour étudier de plus près ces taches et ont découvert que le Soleil tournait sur lui-même en 27 jours.

Ce n'est qu'en 1843, cependant, que le cycle des taches solaires a été découvert par un autre astronome allemand : Samuel Heinrich Schwabe. Après avoir observé le Soleil pendant 17 ans, il a réalisé que le nombre des taches solaires variait suivant un cycle qui dure environ 11 ans. Au début de ce cycle, les taches sont moins nombreuses et apparaissent à des latitudes plus hautes sur la surface solaire. Cette période est le minimum solaire. Dans les cinq à six ans qui suivent, le nombre des taches augmente progressivement et leurs latitudes se rapprochent de l'équateur solaire. Lorsque le nombre maximum de taches apparaît, au plus près de l'équateur, on parle de maximum solaire. Dès lors, le nombre des taches diminue en revenant au minimum solaire, puis le cycle recommence avec une polarité magnétique inversée, le tout constituant un cycle complet de 22 ans.

Solar Orbiter fera face au Soleil depuis l'intérieur de l'orbite de Mercure

Le 19^e siècle a été particulièrement fécond pour la recherche solaire. La reconnaissance du cycle solaire a coïncidé avec la prise de conscience que le Soleil était un corps magnétique qui influait sur le comportement de la technologie sur Terre. C'est à cette époque que l'on a remarqué, par exemple, que les boussoles magnétiques étaient perturbées par la présence de taches solaires et que cet effet augmentait avec le nombre de ces taches. Nous savons maintenant que c'est dû à l'influence de l'activité solaire sur l'ionosphère terrestre.

En 1859, l'astronome anglais Richard Carrington a observé une éruption solaire intense. Celle-ci fut accompagnée d'un orage magnétique record sur Terre, durant lequel les boussoles se sont affolées et les télécommunications par télégraphe électrique ont été gravement perturbées. Ces observations ont montré que le magnétisme du Soleil atteignait la Terre.

Plusieurs astronomes avaient déjà remarqué que la queue des comètes était toujours orientée à l'opposé du Soleil, ce qui a donné naissance à l'hypothèse de l'existence d'un « vent » s'éloignant du Soleil. Cependant, ce n'est qu'en 1958 que l'astrophysicien américain Eugene Parker a donné une véritable assise scientifique à ce phénomène en réalisant qu'il était lié à l'atmosphère solaire, connue sous le nom de couronne. La haute température de la couronne à de grandes distances du Soleil signifiait que les particules qui la constituent ont suffisamment d'énergie pour s'échapper à la gravité du Soleil et traverser l'espace. Il a appelé cet écoulement le vent solaire.

Sa théorie a été confirmée un an plus tard par la sonde spatiale russe Luna 1. Cette sonde - qui a effectué les premières mesures directes du vent solaire - a découvert qu'il était composé de plasma, un gaz conducteur électrique qui représente le quatrième état de la matière après les états

solide, liquide et gazeux, mais aussi qu'il y avait des centaines de particules dans chaque centimètre cube d'espace.

Le vent solaire crée une bulle tout autour du système solaire. Baptisée héliosphère et limitée par l'héliopause, celle-ci est gonflée par le plasma provenant du Soleil et est le domaine du « climat spatial ». Ce terme désigne les perturbations du vent solaire, qui véhiculent l'influence magnétique du Soleil jusqu'à la Terre. Le climat spatial est déterminé par l'activité du Soleil, notamment par les éruptions solaires et les éjections de matière coronale. Les aurores terrestres sont produites par une série complexe d'interactions magnétiques qui, au final, résultent en la collision des particules de plasma du vent solaire avec les molécules de l'atmosphère de notre planète.

À une époque où notre technologie dépend des systèmes électriques sensibles, nous devons nous protéger des phénomènes météorologiques spatiaux intenses que sont les « orages magnétiques d'origine solaires ». En essayant de comprendre le mécanisme d'accélération du vent solaire, Solar Orbiter apporte des éléments essentiels qui pourraient déboucher un jour sur un service de prévisions météorologiques qui nous permettra de mieux protéger nos technologies essentielles sur Terre.

Poursuivant ces objectifs, la mission Solar Orbiter de l'ESA est une collaboration scientifique mondiale avec une forte participation de la NASA. Elle repousse les limites de la technologie spatiale et prépare l'exploration spatiale de demain dans des environnements extrêmes. En plus de requérir le développement de nouveaux équipements, elle élargit l'expérience de l'ESA dans le domaine des opérations spatiales sous des conditions hostiles. En résumé, Solar Orbiter nous permettra d'enquêter comme jamais auparavant sur l'influence du Soleil sur l'héliosphère et la place de la Terre au sein de celle-ci.

© ESA/ATG medialab

Une aurore est la manifestation de l'interaction de particules chargées en provenance du Soleil avec le champ magnétique terrestre.

→ À LA DÉCOUVERTE DU SOLEIL

Solar Orbiter répondra aux grandes questions scientifiques concernant le système solaire afin de nous aider à comprendre comment notre étoile crée et contrôle la gigantesque bulle de plasma qui entoure l'ensemble du système solaire et en influence les planètes. Il se concentrera sur quatre domaines d'études principaux.

Le vent solaire et le champ magnétique de la couronne

Le vent solaire est un flux constant de particules chargées que le Soleil éjecte dans toutes les directions de l'espace. Les particules acquièrent des vitesses comprises entre 300 et 800 km/s, mais le mécanisme de leur accélération reste inconnu. Le fait qu'il soit clairement lié au champ magnétique qui existe dans la couronne ne fait qu'épaissir le mystère, puisque personne ne sait vraiment comment ce champ magnétique est généré. Solar Orbiter étudiera le mécanisme d'accélération et de transport du vent solaire et l'origine du champ magnétique de la couronne.

Il se penchera sur les phénomènes physiques qui lient le plasma de la surface solaire au réchauffement et à l'accélération du vent solaire dans la couronne. Il mènera cette mission en se déplaçant relativement lentement par rapport à la surface solaire durant ses passages rapprochés. Cela lui permettra de mesurer les propriétés variables du vent solaire et de les mettre en relation avec les variations des propriétés de la région solaire sous-jacente.

Solar Orbiter effectuera aussi des mesures très détaillées de la composition du vent solaire à des distances plus proches que l'orbite terrestre. Cela nous permettra de mieux comprendre le vent à son point d'origine, avant les changements survenant durant son trajet à travers le système solaire. Ces données seront utilisées pour évaluer les diverses théories visant à expliquer la génération du vent solaire.

Les événements solaires soudains et leurs effets

Les événements soudains à la surface visible du Soleil s'appellent des transitoires. Ils se propagent dans la couronne et, parfois, vers l'extérieur dans le vent solaire. Ils incluent des phénomènes explosifs tels que les éruptions, les éjections de matière coronale, les protubérances éruptives et les ondes de choc. Ces événements déterminent le climat spatial en influant sur le comportement du vent solaire.

Étant si proche du Soleil, Solar Orbiter observera de plus près les transitoires solaires et leur influence sur les flots de plasma qui se déversent dans l'héliosphère. En observant ces événements se déployer et en mesurant les propriétés des champs magnétiques et du plasma qui passeront devant la sonde, Solar Orbiter sera en position d'évaluer les propriétés du vent solaire dirigé vers l'héliosphère et de mesurer les conséquences héliosphériques de ces événements transitoires souvent titanesques.

La couronne du Soleil n'est visible depuis la Terre que lors des éclipses solaires totales, quand la Lune bloque la lumière du Soleil, ce qui en révèle l'atmosphère extérieure qui s'étend dans l'espace. Cette image composite date de l'éclipse de juillet 2019.

Les éruptions solaires et les particules énergétiques qu'elles produisent

Le Soleil est le plus puissant accélérateur de particules du système solaire. Il projette régulièrement des « orages » de particules qui atteignent des vitesses proches de la vitesse de la lumière. Celles-ci peuvent pénétrer à travers les couches protectrices du champ magnétique et de l'atmosphère terrestre, voire être détectées à la surface de notre planète. Les événements à particules énergétiques solaires sont des manifestations extrêmes du climat spatial, qui peuvent impacter gravement les équipements spatiaux. Ils peuvent perturber les communications radio et obliger le trafic aérien commercial à s'éloigner des régions polaires, où les particules énergétiques pénètrent plus facilement dans notre atmosphère.

Tous les instruments de Solar Orbiter contribueront à identifier la cause des événements à particules énergétiques solaires. En examinant les particules et en prenant des mesures et des images à des longueurs d'onde différentes de l'environnement d'où elles proviennent, Solar Orbiter fournira la réalité de terrain nécessaire pour valider ou non les théories.

La génération du champ magnétique du Soleil

Le champ magnétique du Soleil est responsable de toute l'activité solaire que nous voyons. Il est à l'origine du cycle de 11 ans des taches solaires et détermine le comportement de l'atmosphère solaire. Des études nous ont apporté bien des informations sur la nature du champ magnétique solaire une fois qu'il sort de l'intérieur du Soleil. Mais les détails de sa génération dans le Soleil, ce que l'on appelle la « dynamo du Soleil » restent une énigme.

Selon certains théoriciens, le champ magnétique solaire est généré dans une région du Soleil appelée la tachocline. La tachocline forme la couche entre la zone radiative et la base de la zone convective, dans laquelle les propriétés de la rotation du Soleil changent considérablement, ce qui est à l'origine des forces de cisaillement importantes du plasma. Les modèles informatiques suggèrent qu'un flot de plasma solaire allant des régions équatoriales de la surface solaire aux pôles balaye les champs magnétiques décroissants, loin des taches solaires et des autres régions actives. Une fois les pôles atteints, ces champs magnétiques sont ravalés vers le Soleil et revigorés par le mouvement du plasma dans la tachocline. De là, ils remontent vers la surface et créent les taches solaires et les régions actives du cycle solaire suivant.

Solar Orbiter mesurera les divers flux qui transportent les champs magnétiques autour de la surface solaire, en fournissant des données d'une valeur inestimable pour contraindre les modèles.

Une éjection de masse coronale, colorée pour indiquer l'intensité de la matière éjectée par le Soleil : le blanc correspond à l'intensité la plus forte, le bleu à la moins forte. Le disque bleu est un masque qui fait disparaître la lumière solaire directe pour permettre l'étude de la couronne.

→ ANATOMIE DE NOTRE SOLEIL

Granulation

Elle est causée par les courants de convection qui se forment dans la photosphère. Chaque granule mesure environ 1 000 km de large et se compose de plasma chaud qui remonte en son centre. En relâchant son énergie dans l'espace, le plasma refroidit et s'écoule sur les côtés du granule avant de replonger dans la photosphère. Les granules individuels persistent pendant 20 minutes ; après quoi il s'en développe de nouveaux à des endroits légèrement différents.

Protubérances

Ce sont des structures importantes, qui s'étendent souvent sur des milliers de kilomètres. Elles sont composées de lignes de champ magnétiques enchevêtrées qui maintiennent en suspension des concentrations denses de plasma au-dessus de la surface du Soleil, et prennent souvent la forme de boucles déployées en arches depuis la chromosphère. Elles peuvent persister pendant plusieurs semaines, voire des mois.

Photosphère

C'est la « surface » visible du Soleil. Pratiquement tout le rayonnement solaire est émis depuis cette fine couche de plusieurs centaines de kilomètres d'épaisseur, qui se trouve à la limite supérieure de la zone convective. C'est là que l'énergie générée dans le noyau peut enfin se libérer dans l'espace. La température de la photosphère varie d'un endroit à l'autre, mais reste comprise entre 4 500 et 6 000 °C.

Chromosphère

C'est la couche située au-dessus de la photosphère, où la densité du plasma chute brutalement. En général, la chromosphère a une épaisseur de 1 000 à 2 000 km et une température qui s'élève de 4 000 à près de 25 000 °C. Les spires de gaz chromosphérique, les spicules, peuvent atteindre 10 000 km de haut.

Zone de transition

C'est une couche fine et irrégulière qui sépare la chromosphère relativement froide de la couronne bien plus chaude. À travers la zone de transition, la température du plasma solaire monte à près d'un million de degrés Celsius. Alors que la zone de convection et (partie de) la photosphère solaire sont dominées par des courants en mesure de déplacer des régions de flux magnétique fort, la zone de transition et la couronne sont dominées par le champ magnétique, qui oblige le plasma à se déplacer principalement le long des lignes du champ.

Taches solaires

Ce sont des structures temporaires sur la photosphère. Elles prennent la forme de zones sombres sur la région plus brillante de la photosphère, car elles sont plus froides d'environ 1 000 degrés et émettent donc moins de lumière. Elles sont causées par les champs magnétiques qui pénètrent dans la photosphère du Soleil et en refroidissent les gaz. Les taches solaires peuvent mesurer de quelques dizaines à plus de 150 000 km.

Taches solaires
Granulation
Protubérances

Chromosphère
Zone de transition
Photosphère

Éruption

Éruption

Une éruption solaire est une libération soudaine d'énergie. Elle se produit lorsque les lignes du champ magnétique qui composent les taches solaires se transforment elles-mêmes rapidement en configurations plus stables, un peu comme un élastique étiré qui casse et relâche toute l'énergie stockée en reprenant sa position. L'énergie libérée par les éruptions solaires influence fortement le comportement du vent solaire.

Région convective

Elle se trouve entre la région radiative et la photosphère, et est profonde de 200 000 km. Alors que sa couche supérieure possède la même température que la photosphère (entre 4 500 et 6 000 °C), la base de la zone convective atteint deux millions de degrés Celsius. Le plasma à la base de cette zone chauffe rapidement. Il devient ascendant et s'élève alors rapidement en créant un transport convectif turbulent analogue à celui observé dans une casserole d'eau bouillonnante, sauf qu'il est profond de 200 000 km et entoure tout le Soleil.

Tachocline

C'est la frontière entre les zones convective et radiative. En dessous de la tachocline, le Soleil tourne comme un corps solide. Au-dessus, il tourne à des vitesses différentes en fonction de sa latitude. Le changement de vitesse de rotation à travers la tachocline est très brusque, résultant en des forces de cisaillement que l'on pense être importantes dans la création des champs magnétiques qui sont à l'origine des taches solaires.

Zone radiative

C'est la couche au-dessus du noyau. Bien qu'elle ne soit pas aussi dense que le noyau, le plasma y est encore tellement dense que la convection y est impossible. À la place, l'énergie créée dans le noyau se diffuse lentement à travers le plasma. Les photons mettent près de 170 000 ans pour traverser la zone radiative : un photon voyage à la vitesse de la lumière, mais ne peut se déplacer que de quelques millimètres à la fois avant d'être absorbé par un atome, puis réémis dans une direction aléatoire. En haut de cette zone, la température est d'environ deux millions de degrés Celsius. À sa base, près du cœur du Soleil, elle est de l'ordre de sept millions de degrés Celsius.

Noyau

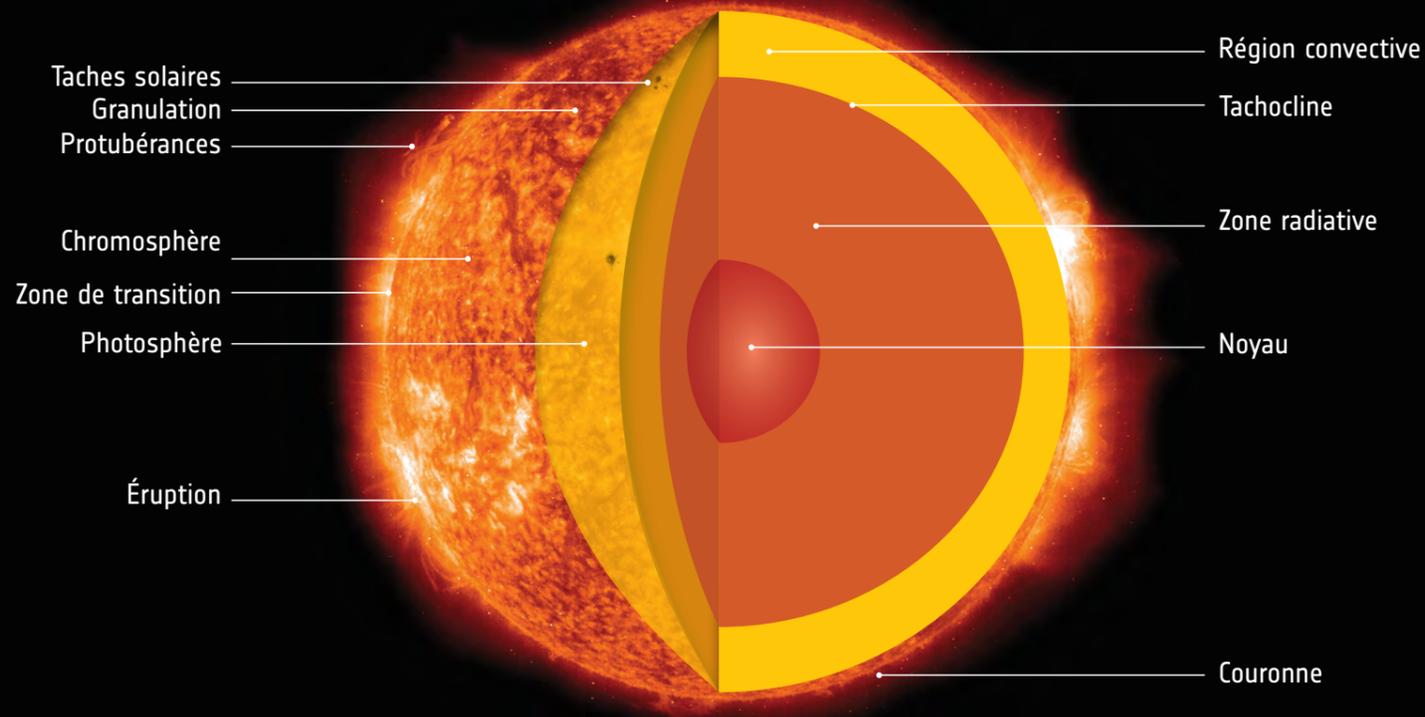
C'est là que le Soleil génère son énergie. Au centre, la température est d'environ 15,7 millions de degrés Celsius. Ceci, combiné à la pression et densité immenses du plasma, force les noyaux d'hydrogène à fusionner, en créant de l'hélium et en relâchant de grandes quantités d'énergie. Chaque seconde, le Soleil convertit quatre millions de tonnes de matière en énergie, qui commence une lente ascension vers la surface.

Couronne

C'est la couche la plus externe de l'atmosphère du Soleil, qui s'étend sur des millions de kilomètres dans l'espace. Elle est facilement observable pendant les éclipses totales du Soleil. Extrêmement chaud, le plasma coronal atteint une température de l'ordre de plus d'un million de degrés Celsius, mais est très raréfié. Sa densité s'élève en général à un millième de milliardième de celle de la photosphère. Le vent solaire provient de la couronne.

Éjections de matière coronale

Ce sont des vastes éruptions de milliards de tonnes de plasma qui accompagnent les champs magnétiques de la couronne du Soleil. Elles sont éjectées hors du Soleil à des vitesses de quelques centaines à des milliers de kilomètres par seconde et, si elles sont envoyées dans la trajectoire de la Terre, peuvent créer des orages géomagnétiques (cf. image page précédente).



→ PRÉPARATION AUX ENVIRONNEMENTS EXTRÊMES

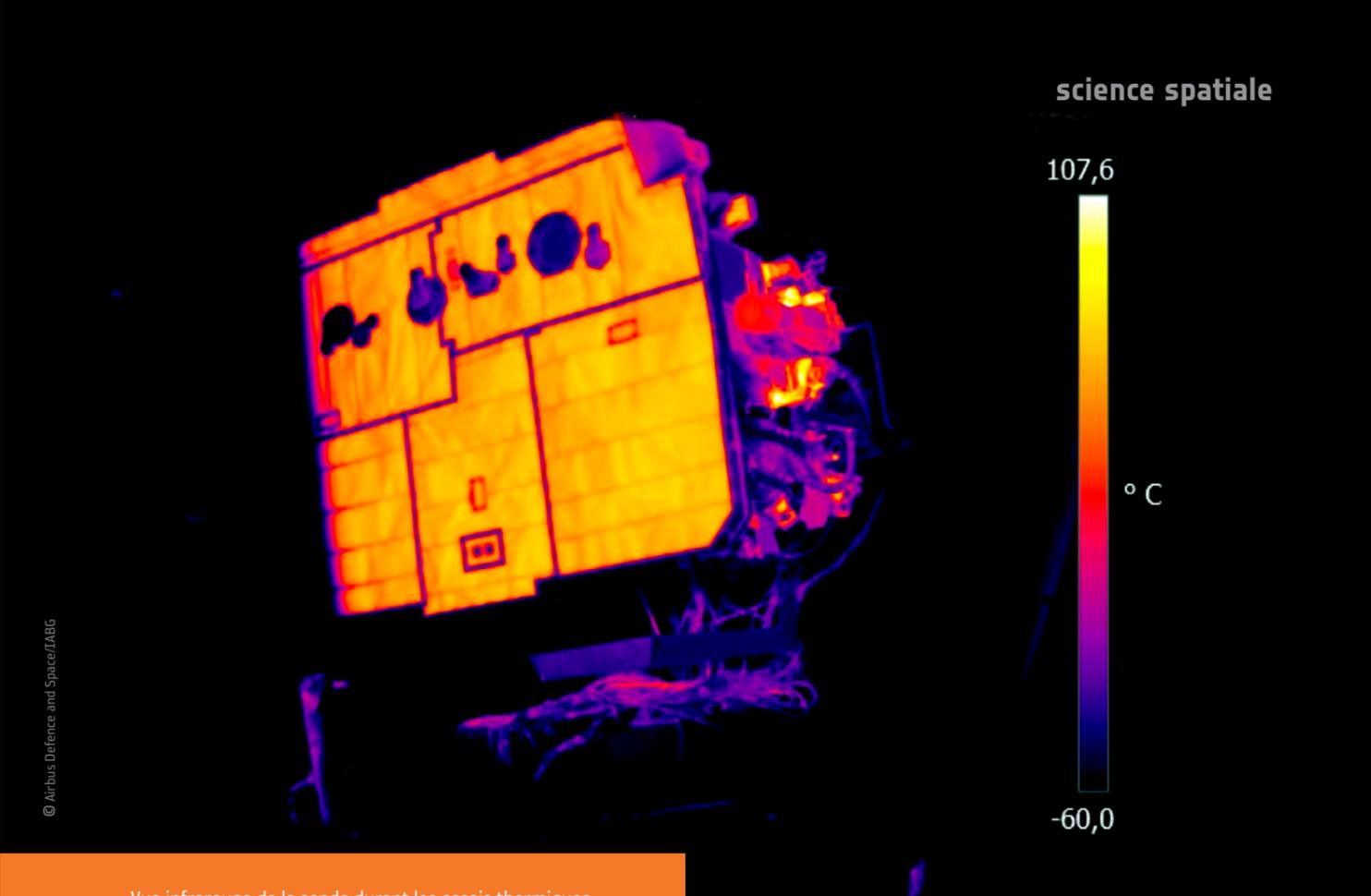
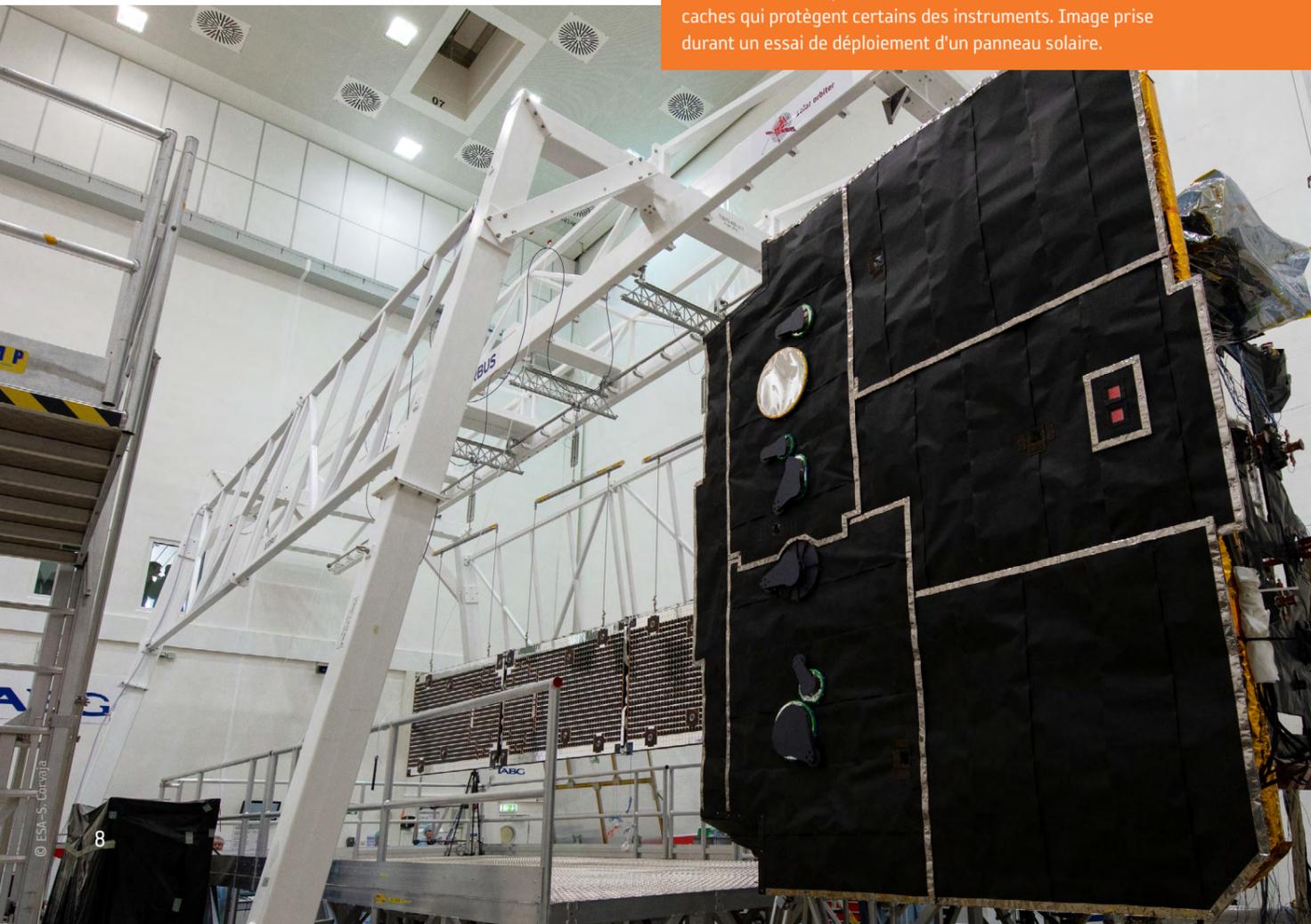
Solar Orbiter va devoir fonctionner pendant des années dans l'une des régions les plus hostiles du système solaire. Au moment où il sera le plus près du Soleil, il n'en sera qu'à environ 42 millions de kilomètres, soit à peine plus du quart de la distance qui sépare cette étoile de notre planète. Pas même Mercure, qui en est la planète la plus proche, n'arrive aussi près du Soleil. Mercure s'en approche au maximum à près de 46 millions de kilomètres, ce qui est quand même suffisant pour en chauffer la surface à environ 430 °C et plus que suffisant pour faire fondre du plomb.

Pour protéger la sonde de 1,8 tonnes de ces températures extrêmement élevées, l'ESA et le premier responsable industriel du programme, Airbus Defence and Space, ont

développé un bouclier thermique unique avec d'autres partenaires industriels. La société irlandaise Enbio a plus particulièrement mis au point un nouveau produit : le SolarBlack.

Le SolarBlack est un type de phosphate de calcium qui a été appliqué sur la couche externe du bouclier thermique de Solar Orbiter. Ce composé se caractérise par une excellente absorption de chaleur et ne se détériore pas en s'effeuillant ou en se transformant progressivement en gaz, et ce quelle que soit la quantité de rayonnement infrarouge et ultraviolet qu'il absorbera. Derrière la fine couche de SolarBlack, l'extérieur du bouclier thermique se compose de vingt couches très minces de titane, qui peuvent résister à des températures atteignant 500 °C. Derrière, un espace vide

Le bouclier thermique SolarBlack de Solar Orbiter avec les caches qui protègent certains des instruments. Image prise durant un essai de déploiement d'un panneau solaire.



Vue infrarouge de la sonde durant les essais thermiques

permet la dissipation de la chaleur sur les côtés, loin de la sonde. Les seuls éléments matériels qui traversent ce vide sont dix brides en forme d'étoile qui fixent la couche supérieure du bouclier à la base.

Cette dernière est une structure alvéolaire en nid d'abeille et en aluminium de 5 cm d'épaisseur qui est recouverte de 30 couches d'isolation. Elle peut supporter des températures atteignant 300 °C. L'ensemble du bouclier est fixé à la sonde par dix « lames » en titane de 1,5 mm d'épaisseur pour minimiser le transfert de chaleur à travers la superstructure de la sonde.

Le bouclier thermique est essentiel pour la mission, car Solar Orbiter recevra environ treize fois plus de chaleur solaire que les satellites en orbite autour de la Terre.

Solar Orbiter utilise l'énergie solaire pour générer son électricité. Ses panneaux solaires pivotent : quand la sonde est proche du Soleil, il est possible de les incliner pour les empêcher de devenir trop chauds. Et quand Solar Orbiter se trouve dans les parties externes de son orbite, ils peuvent être orientés face au Soleil, de manière à fournir suffisamment d'électricité.

Les instruments

Solar Orbiter emporte une batterie complète de dix instruments scientifiques (voir page suivante). Tant qu'ils se trouvent derrière le bouclier thermique, ces instruments sont protégés, mais ils doivent aussi pouvoir voir le Soleil ou, au moins, les zones spatiales proches du Soleil pour l'étude desquelles ils ont été conçus.

Ces instruments sont divisés en deux types : *in situ* et « de télédétection ». Les instruments *in situ* mesurent les propriétés autour de la sonde proprement dite. Certains peuvent rester dans l'ombre du bouclier thermique, mais d'autres doivent faire face au Soleil et sont donc équipés de leurs propres mini boucliers thermiques ou protections. Les instruments de télédétection mesurent ce qui se passe, à de grandes distances, sur le Soleil. Dans le bouclier thermique, des petites portes coulissent pour laisser la lumière solaire arriver jusqu'aux instruments de télédétection montés à l'intérieur. Sur ceux-ci, des fenêtres bloquent la plus grande partie de la chaleur pour les protéger, sauf sur deux d'entre eux : SPICE laisse entrer toute la lumière et élimine celle dont il ne veut pas, et la caméra grand champ SoloHI épie le pourtour du bouclier thermique mais ne regarde pas le Soleil directement.

Les deux jeux de données peuvent être utilisés ensemble pour dresser un tableau plus détaillé de ce qui se passe dans la couronne du Soleil et le vent solaire.

→ COMMENT SOLAR ORBITER VA ÉTUDIER LE SOLEIL

LES INSTRUMENTS *IN SITU*

EPD : Energetic Particle Detector

Ce détecteur mesurera les particules énergétiques solaires qui passeront par la sonde. Il en observera la composition et la variation dans le temps. Les données recueillies aideront les scientifiques à étudier les sources, les mécanismes d'accélération et les processus de transport de ces particules.
Investigateur principal (IP) : Javier Rodríguez-Pacheco, Université d'Alcalá (ES)

MAG : Magnetometer

MAG possède deux capteurs qui mesureront le champ magnétique autour de la sonde avec une grande précision. Il nous aidera à déterminer comment le champ magnétique du Soleil est lié au reste du système solaire et change avec le temps, pour comprendre comment chauffe la couronne et comment l'énergie est transportée dans le vent solaire.
IP : Tim Horbury, Imperial College Londres (GB)

RPW : Radio and Plasma Waves

RPW mesurera la variation des champs magnétique et électrique, avec plusieurs capteurs et antennes. Il nous aidera à déterminer les caractéristiques des ondes et champs électromagnétiques dans le vent solaire. C'est le seul instrument de Solar Orbiter qui effectuera à la fois des mesures *in situ* et de télédétection.
IP : Milan Maksimovic, LESIA, Observatoire de Paris (FR)

SWA : Solar Wind Plasma Analyser

L'analyseur de vent solaire SWA est constitué d'une série de capteurs qui mesureront des propriétés du vent solaire telles que la densité, la vitesse et la température. Il mesurera aussi la composition du vent solaire.
IP : Christopher Owen, Laboratoire de science spatiale Mullard (GB)

LES INSTRUMENTS DE TÉLÉDÉTECTION

EUI : Extreme Ultraviolet Imager

EUI produira des images de la chromosphère solaire, de la zone de transition et de la couronne. Il permettra aux scientifiques d'enquêter sur les processus de réchauffement mystérieux qui ont lieu dans cette région et de mettre en relation les mesures *in situ* du vent solaire avec leurs zones d'origine sur le Soleil.
IP : Pierre Rochus, Centre Spatial de Liège (BE)

Metis : Coronagraph

Metis fournira des images en ultraviolet et lumière visible de la couronne solaire. Celles-ci montreront la structure et la dynamique de l'atmosphère solaire avec un niveau de détail sans précédent, allant de 1,7 à 4,1 rayons solaires. Les scientifiques pourront ainsi rechercher le lien entre le comportement de ces régions et le climat spatial dans le système solaire interne.
IP : Marco Romoli, INAF – Université de Florence (IT)

PHI : Polarimetric and Helioseismic Imager

PHI fournira des mesures en haute résolution du champ magnétique à travers la photosphère et cartographiera la luminosité aux longueurs d'onde visibles. Il produira aussi des cartes de vitesse du mouvement de la photosphère qui permettront des études héliosismiques de l'intérieur du Soleil, en particulier de la zone convective.
IP : Sami Solanki, Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung (DE)

SoloHI : Heliospheric Imager

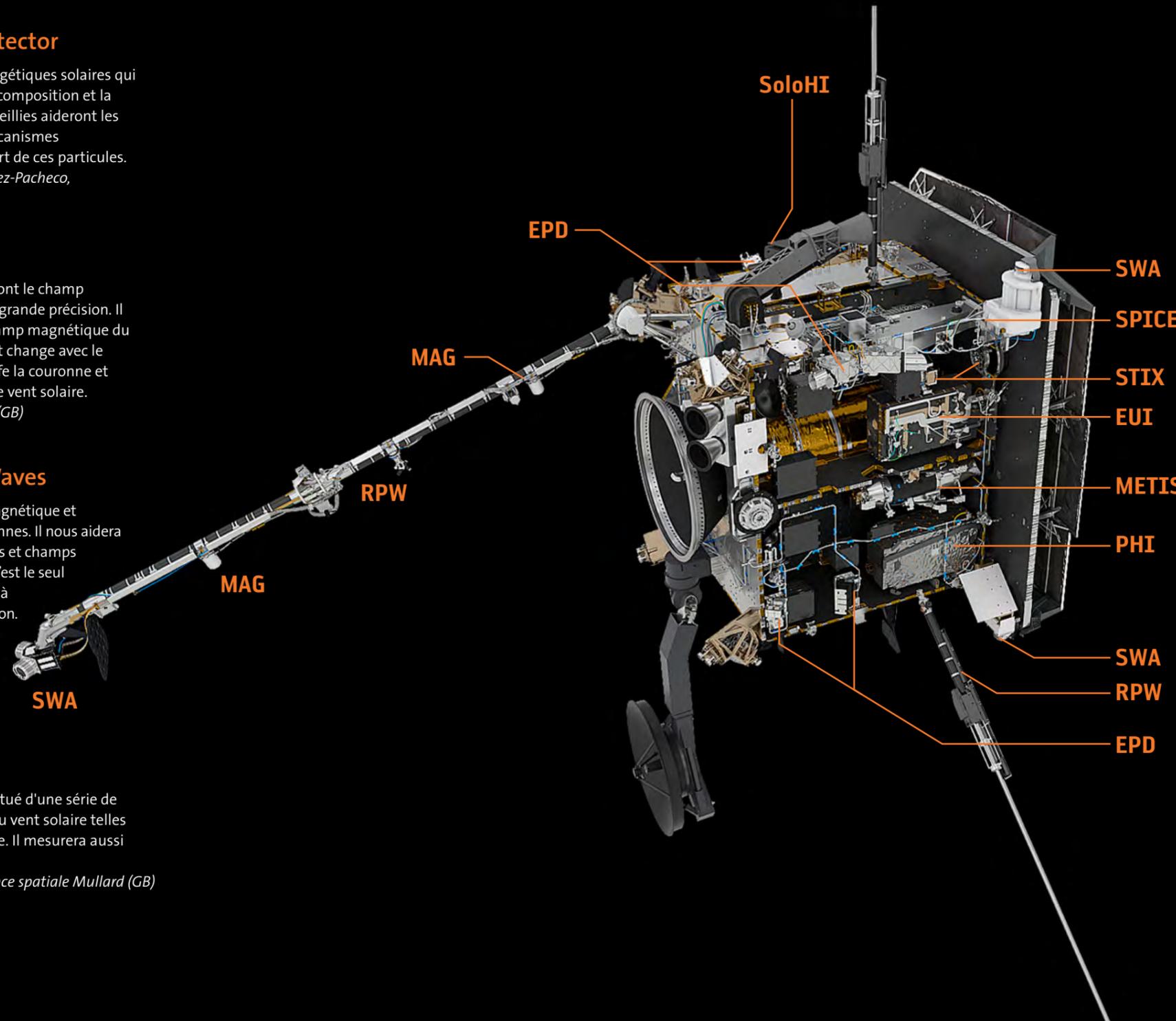
SoloHI prendra des images du vent solaire en capturant la lumière diffusée par les électrons dans le vent. Cela permettra l'identification des perturbations transitoires dans le vent solaire, comme ceux déclenchés par une éjection de matière coronale, au cours de laquelle un milliard de tonnes de gaz coronal peut être éjecté dans l'espace.
IP : Russell A. Howard, US Naval Research Laboratory, Washington, DC (US)

SPICE : Spectral Imaging of the Coronal Environment

SPICE révélera les propriétés de la zone de transition solaire et de la couronne en mesurant les longueurs d'onde ultraviolettes extrêmes émanant du plasma. Ces données seront mises en relation avec les propriétés du vent solaire qui seront détectées successivement par les instruments *in situ* de la sonde. Les opérations de l'instrument sont sous responsabilité européenne. *IP pour la phase des opérations : Frédéric Auchère, IAS, Orsay (FR)*

STIX : X-ray Spectrometer/Telescope

STIX détectera les émissions de rayons X solaires. Celles-ci peuvent provenir du plasma chaud le plus souvent en relation les éruptions solaires. STIX fournira des données de synchronisation, de localisation, d'intensité et d'énergie qui permettront de mieux comprendre les effets de ces événements sur le vent solaire.
IP : Säm Krucker, FHNW, Windisch (CH)



→ LANCEMENT ET EXPLOITATION DE SOLAR ORBITER

Solar Orbiter suivra une série d'orbites complexes, modifiées par des manœuvres d'assistance gravitationnelle.

Solar Orbiter sera lancé de Cap Canaveral, en Floride, sur une fusée Atlas V 411 de la NASA en février 2020. Après la mise en service initiale de ses systèmes et instruments, son premier passage près du Soleil aura lieu en juin lorsque la sonde sera à une distance d'environ la moitié de la distance de l'orbite terrestre par rapport au Soleil.

Durant le reste de la phase de croisière, qui durera jusqu'en novembre 2021, Solar Orbiter effectuera deux manœuvres d'assistance gravitationnelle autour de Vénus et une autour de la Terre pour modifier sa trajectoire afin de la diriger vers les zones les plus internes du système solaire. Simultanément, Solar Orbiter acquerra des données *in situ* et caractérisera et étalonnera ses instruments de télédétection. Son premier passage près du Soleil aura lieu fin mars 2022, à environ un tiers de la distance de la Terre au Soleil.

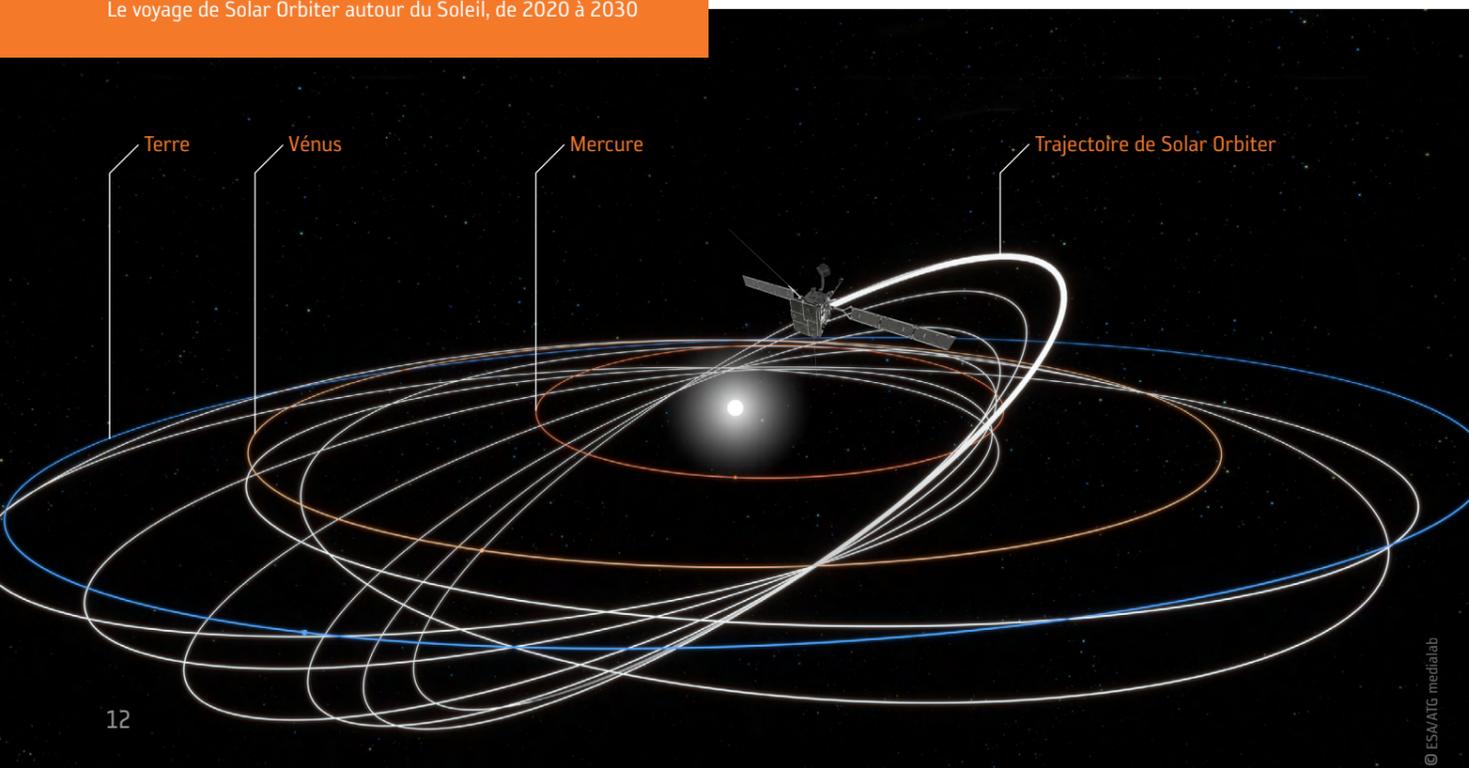
Arrivée au proche voisinage du Soleil, la sonde suivra une orbite elliptique d'une période de 180 jours. Elle passera donc

au plus près du Soleil tous les six mois. Durant ces passages rapprochés, Solar Orbiter sera aussi près que 42 millions de kilomètres de la surface du Soleil, soit près de 60 rayons solaires.

L'orbite de la sonde a été choisie pour être « en résonance » avec Vénus, ce qui signifie qu'elle reviendra dans son voisinage à intervalles de quelques orbites et pourra utiliser la gravité de Vénus pour modifier ou incliner son orbite. Au départ, Solar Orbiter sera confiné dans le même plan que les planètes, mais son inclinaison orbitale augmentera à chaque survol de Vénus. Cela signifie qu'à chaque fois qu'il rencontrera le Soleil, Solar Orbiter l'observera sous une perspective différente.

Il est prévu que la mission scientifique nominale de Solar Orbiter dure quatre ans. Pendant ce temps, l'inclinaison orbitale devrait atteindre 17°. Cela permettra à la sonde d'imager pour la première fois les régions plus proches des pôles du Soleil (les régions polaires solaires ne sont pas visibles depuis la Terre). Durant sa phase de mission étendue proposée, Solar Orbiter relèvera encore son inclinaison, qui atteindra 33°, pour observer les régions polaires encore plus directement.

Le voyage de Solar Orbiter autour du Soleil, de 2020 à 2030



Antenne radio de 35 m de l'ESA à la station sol de Malargüe (Argentine)

L'assistance au sol

Solar Orbiter communiquera avec la Terre via le réseau de l'espace profond de l'ESA : ESTRACK.

La sonde ne communiquera pas avec la Terre en temps réel pendant les survols. À la place, les demandes d'opérations de la charge utile seront transmises à la sonde par le Centre d'opérations de la mission situé à l'ESOC à Darmstadt (Allemagne). Les données scientifiques résultantes seront collectées et stockées sur la sonde, puis téléchargées durant des fenêtres de communication de huit heures définies avec la station sol de 35 mètres de l'ESA à Malargüe (Argentine). D'autres stations ESTRACK comme celles de New Norcia en

Australie et Cebreros en Espagne pourront être utilisées en secours.

Le Centre des opérations scientifiques (SOC), situé à l'ESAC à Villanueva de la Cañada (Espagne), sera responsable de toute la planification de la mission. Vu que les caractéristiques orbitales de la mission changent considérablement d'une orbite à l'autre, la Science Working Team et le SOC devront procéder à des planifications détaillées à chaque fois. Le SOC sera également chargé d'archiver toutes les données de Solar Orbiter de manière à assurer un accès aisé pour tout le monde. Cela assurera la pérennité de la mission qui deviendra une ressource pour tous les scientifiques qui voudront en utiliser les données, même longtemps après la fin de la phase opérationnelle.

→ TRAVAIL D'ÉQUIPE AVEC PARKER SOLAR PROBE

La sonde Solar Orbiter de l'ESA ne sera pas la seule à étudier le Soleil de très près : elle rejoindra la sonde Parker Solar Probe (PSP) de la NASA, qui a déjà commencé sa mission. Lancée depuis Cap Canaveral sur une fusée Delta IV version lourde le 12 août 2018, PSP a été nommée ainsi en hommage à Eugene Parker, qui a développé la théorie du vent solaire en 1958.

PSP transporte une charge utile plus petite que Solar Orbiter, mais ira plus près du Soleil. Comme Solar Orbiter, PSP utilisera aussi les manœuvres d'assistance gravitationnelle pour plonger toujours plus près du Soleil. Cette sonde détient déjà le record du passage au plus près du Soleil. Le 4 avril 2019, elle a survolé la surface solaire à une distance d'environ 24 millions de kilomètres, et s'en rapprochera toujours plus à l'occasion des 24 survols rapprochés programmés. Au cours des trois orbites finales de sa mission, PSP passera à 6,2 millions de kilomètres de la surface du Soleil et devra résister à une chaleur et un rayonnement jamais expérimentés auparavant par une sonde.

PSP, qui transporte des instruments pour échantillonner la couronne du Soleil, vise la région de l'espace où le plasma

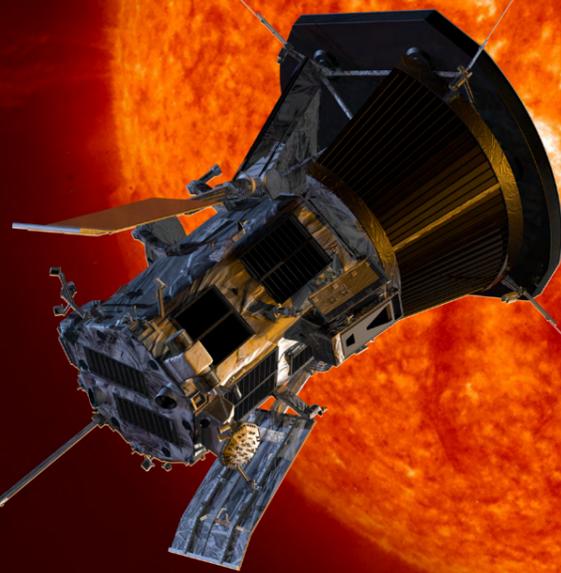
coronal se détache pour devenir le vent solaire. Cela donnera aux scientifiques une « vision de terrain » des conditions du plasma dans cette région et aidera à mieux comprendre comment il est accéléré durant son expansion vers les planètes. PSP n'embarque cependant pas de caméra pouvant observer directement le Soleil. Aucune des technologies actuelles ne peut observer le Soleil à une distance aussi rapprochée sans être détruite. C'est là qu'intervient la mission Solar Orbiter.

En plus de réaliser ses propres objectifs scientifiques, Solar Orbiter fournira des informations contextuelles qui permettront de mieux comprendre les mesures *in situ* de PSP. En travaillant ensemble de cette façon, les deux sondes collecteront des jeux de données complémentaires qui permettront une meilleure exploitation scientifique que les deux missions séparément.

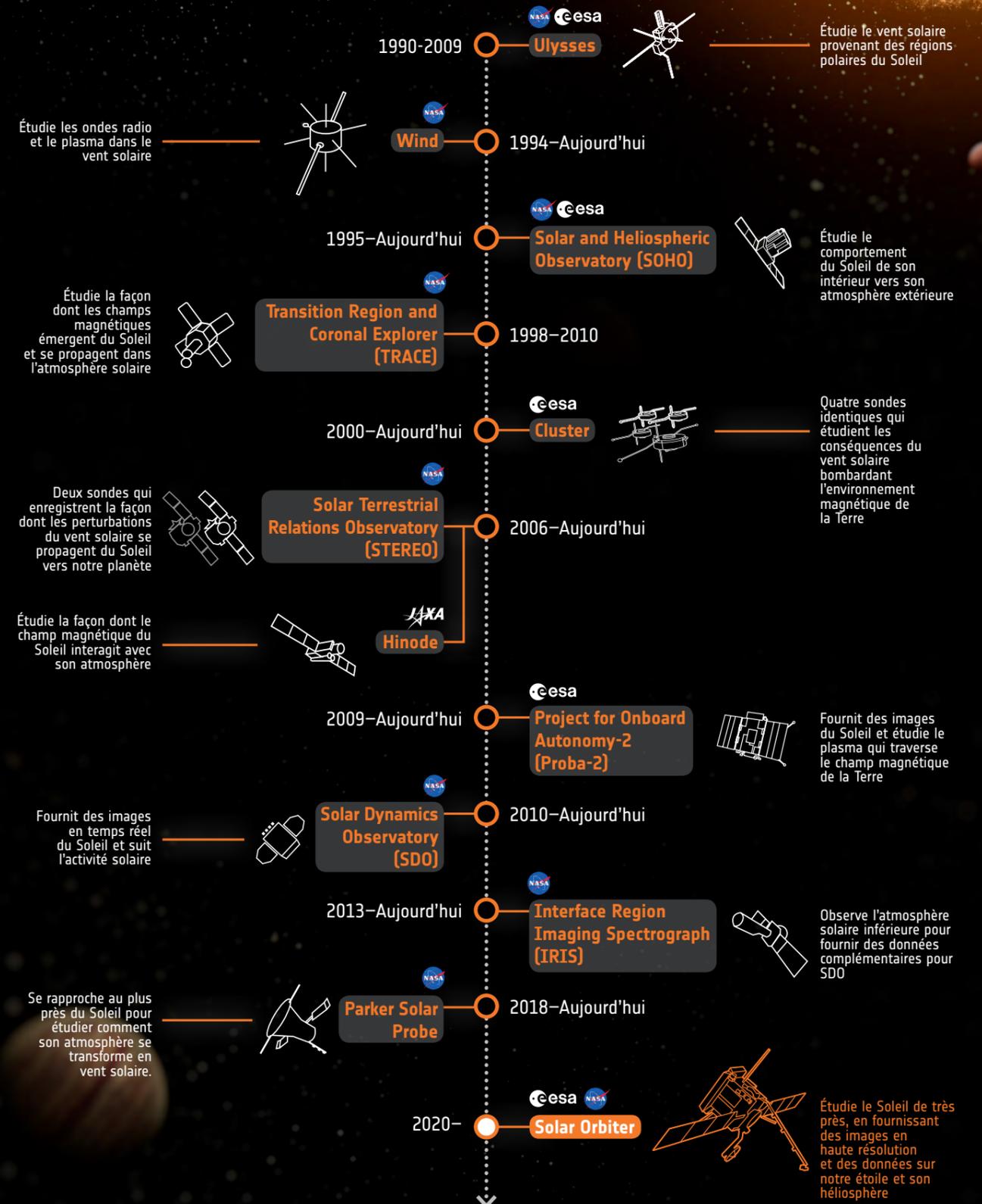
Le Soleil est, bien sûr, essentiel à la vie sur Terre. C'est à la fois le moteur central du système solaire et sa principale énigme. D'ici la fin de la mission Solar Orbiter de l'ESA, nous en saurons plus que jamais sur le Soleil et sur comment réduire les risques de ses perturbations sur nos technologies terrestres.

Vue d'artiste de Parker Solar Probe, qui effectuera des mesures complémentaires de celles de Solar Orbiter

© NASA/Johns Hopkins APL/Steve Gribben



Les missions vers le Soleil



→ UN PROJET INTERNATIONAL

Pays ayant contribué au développement de Solar Orbiter

Cette carte indique les États membres et les États coopérants européens de l'ESA qui ont contribué à Solar Orbiter. Les pays participants ne se trouvant pas en Europe sont indiqués en haut à gauche.

États-Unis 
 Naval Research Laboratory
 Southwest Research Institute
 Université du Michigan
 Université du New Hampshire
 GSF, JPL, APL

Norvège
 KDA
 ITA, Université d'Oslo

Royaume-Uni
 ABSL, Airbus, ESTL, Tessella
 Imperial College London
 Laboratoire de science spatiale Mullard, University College London
 Laboratoire Rutherford Appleton

Irlande
 CAPTEC, ENBIO

Pays-Bas
 Airbus, Tessella, TNO

Belgique
 TAS, RHEA
 Centre Spatial de Liège, Observatoire royal de Belgique

France
 Airbus, CNES
 Institut d'Astrophysique Spatiale, Institut d'Optique, IRAP Toulouse
 LESIA, Observatoire de Paris, LPP, LPC2E, CEA

Portugal
 Active Space, Critical Software

Espagne
 Airbus, Sener, TAS
 Space Research Group, Université d'Alcalá
 Instituto de Astrofísica de Andalucía, INTA
 Université de Valence, Université de Barcelone
 UPM, IAC

Finlande
 RUAG

Suède
 RUAG, OHB
 IRF Uppsala

Danemark
 TERMA

Allemagne
 Airbus, IABG, RCD, MTA
 CAU Kiel, MPS Göttingen, AIP, KIS Fribourg
 IDA TU Braunschweig, PTB Berlin

Pologne
 CBK PAN

République tchèque
 MaxMechanica

Institut astronomique
 Institut de physique atmosphérique
 Académie des sciences tchèque, Université Charles

Autriche
 RUAG, Siemens

Institut de recherche spatiale, Université de Graz

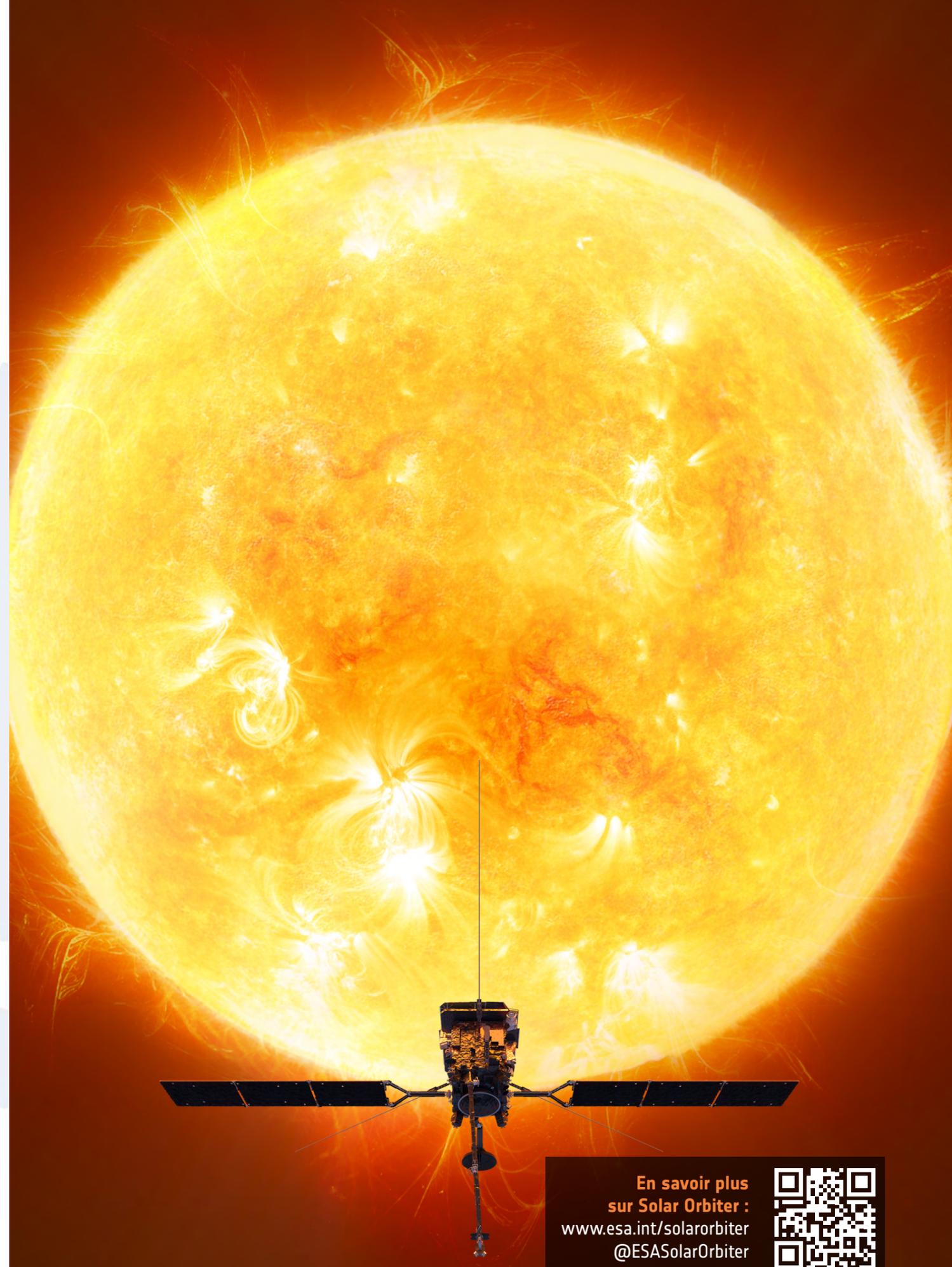
Suisse
 RUAG, Almatech

Fachhochschule Nordwestschweiz FHNW, PMOD, PSI

Italie
 Leonardo, TAS, OHB

INAF Rome,
 Université de Florence, Université de Gênes,
 Université de Padoue, Université d'Urbino,
 CNR-IFN, Polytechnique de Turin

Partenaires industriels
 Des instituts scientifiques ou universités principaux
 ayant contribué à la charge utile scientifique.



En savoir plus sur Solar Orbiter :
www.esa.int/solarorbiter
 @ESASolarOrbiter



