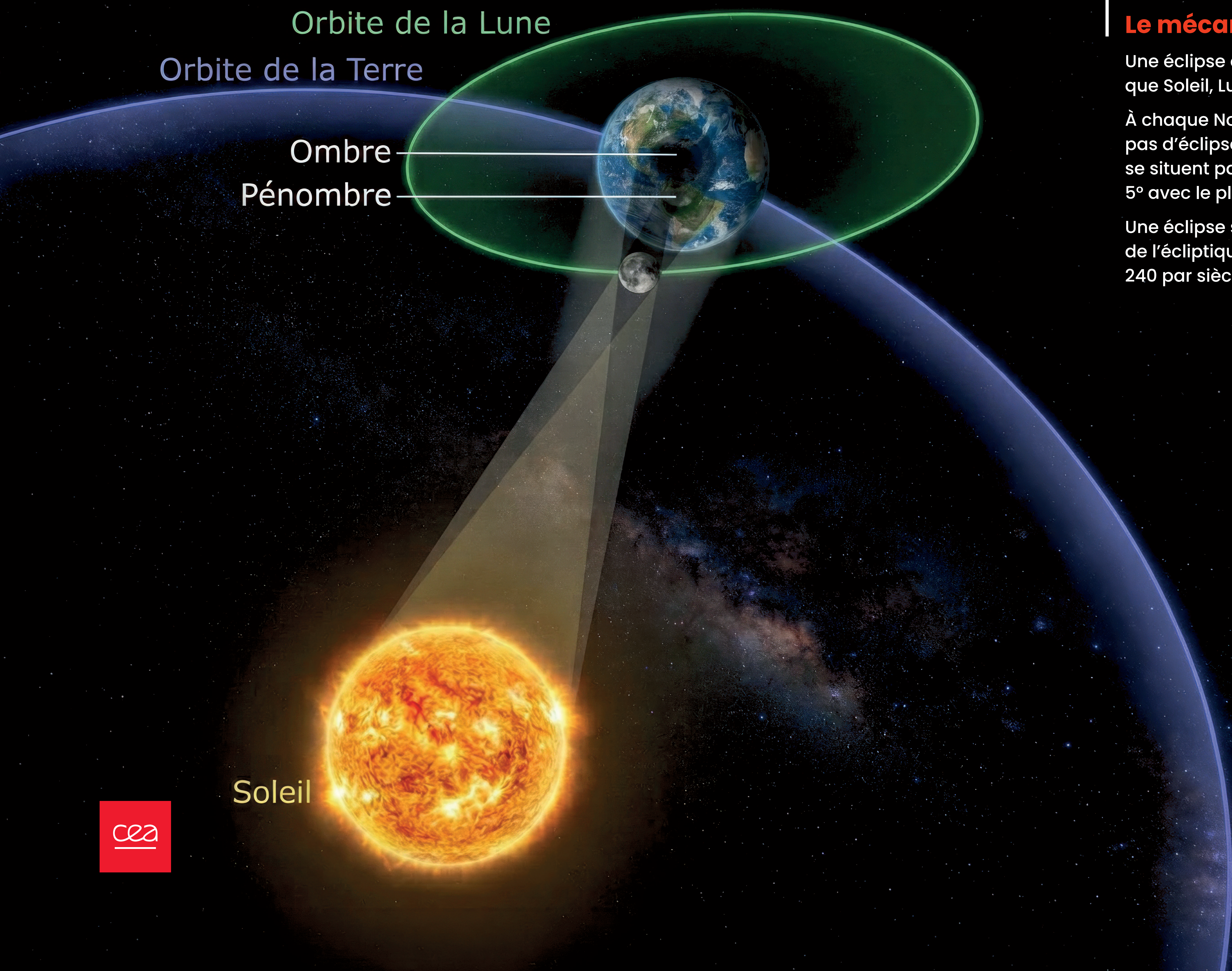
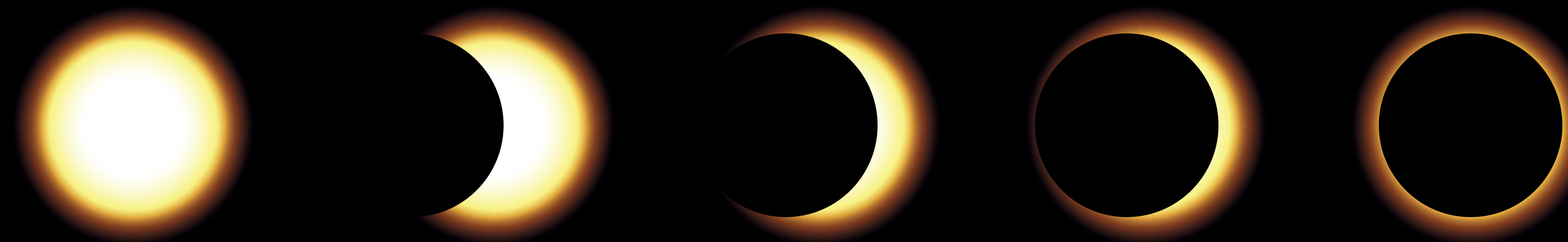
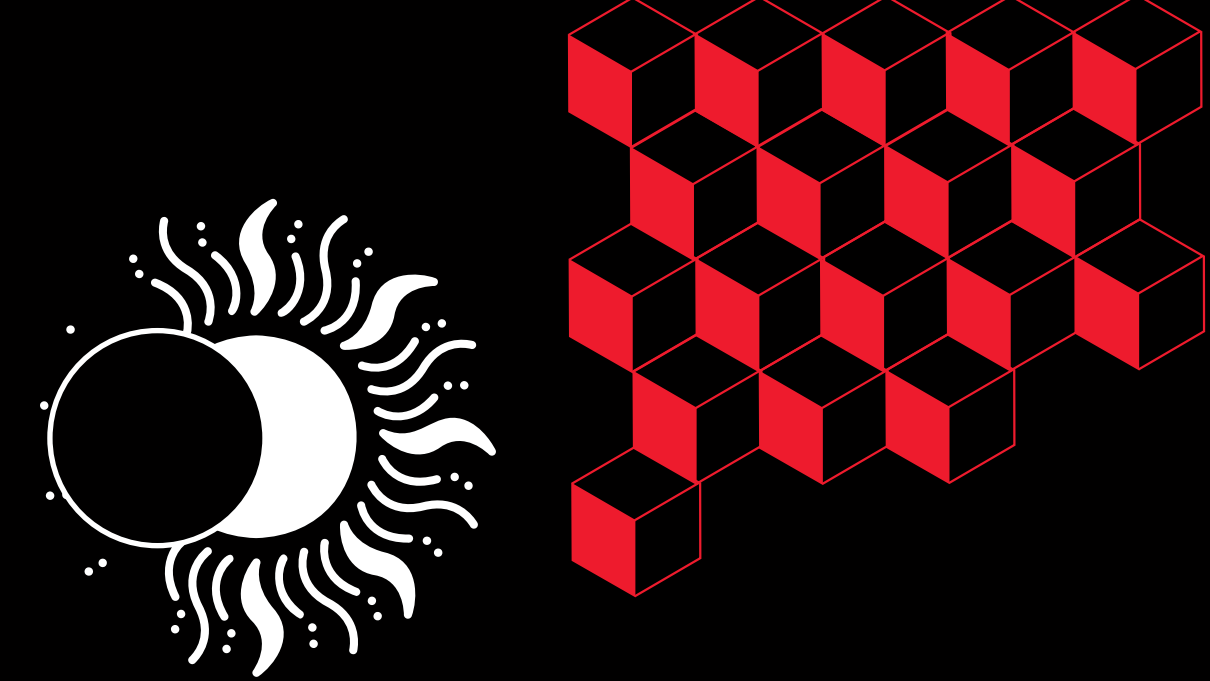


# SYZYGIE :

quand, vus de la Terre,  
la Lune et le Soleil s'alignent

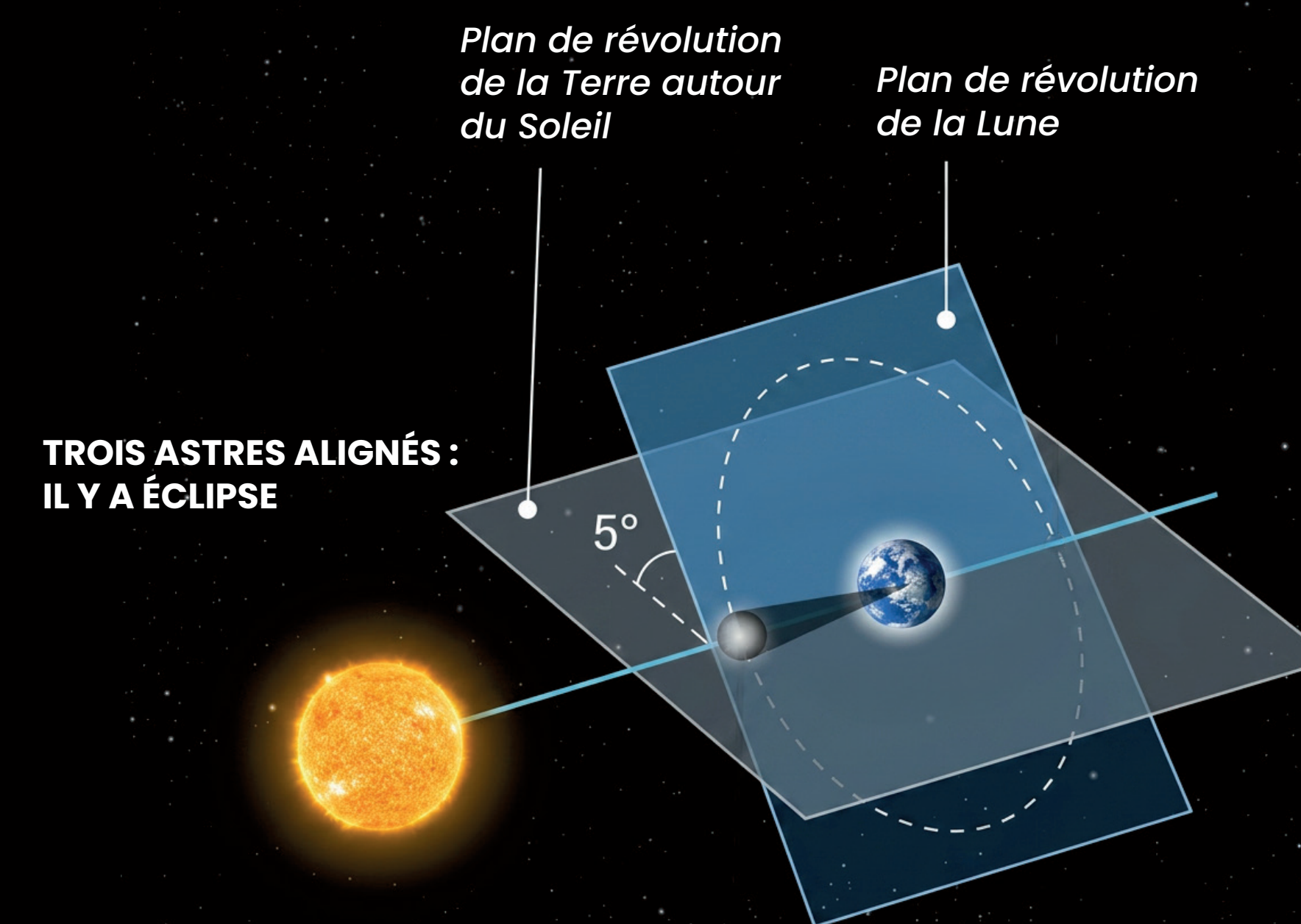


## Le mécanisme :

Une éclipse de Soleil se produit si l'ombre de la Lune touche la Terre. Pour cela, il faut que Soleil, Lune et Terre soient presque alignés dans cet ordre : c'est la Nouvelle Lune.

À chaque Nouvelle Lune, notre satellite se place entre la Terre et le Soleil. Mais il n'y a pas d'éclipse tous les mois. La raison est que l'orbite de la Terre et celle de la Lune ne se situent pas dans le même plan. Le plan de l'orbite lunaire fait un angle d'environ  $5^\circ$  avec le plan orbital de la Terre (appelé écliptique).

Une éclipse se produit si la Lune passe, lors de la Nouvelle Lune, dans le plan de l'écliptique. Une éclipse est donc un événement rare ! Il s'en produit en moyenne 240 par siècle, dont une partie seulement sont totales !

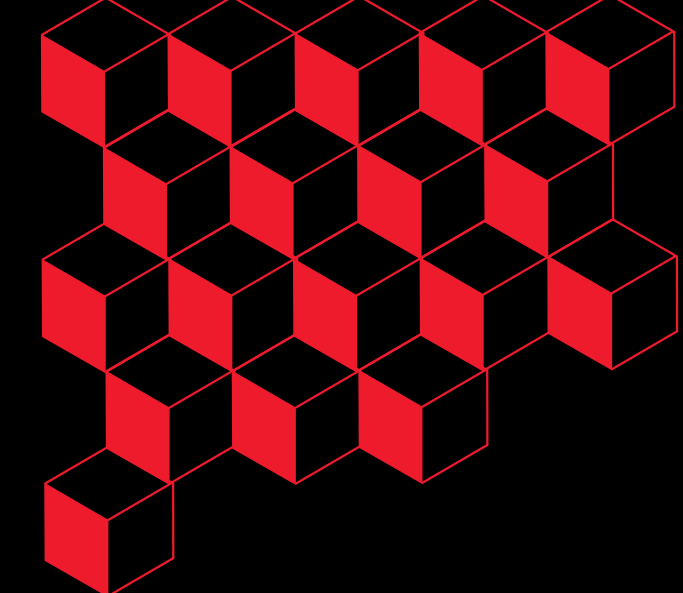
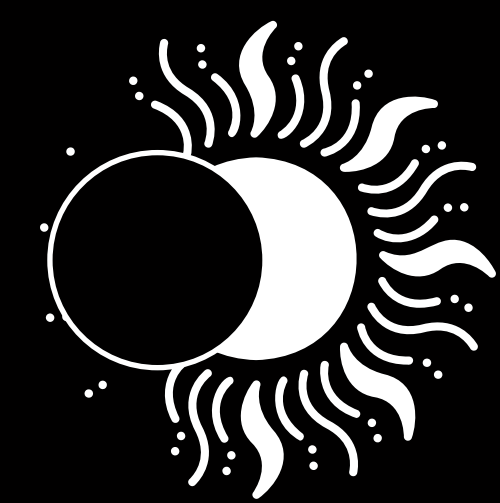


**x400**

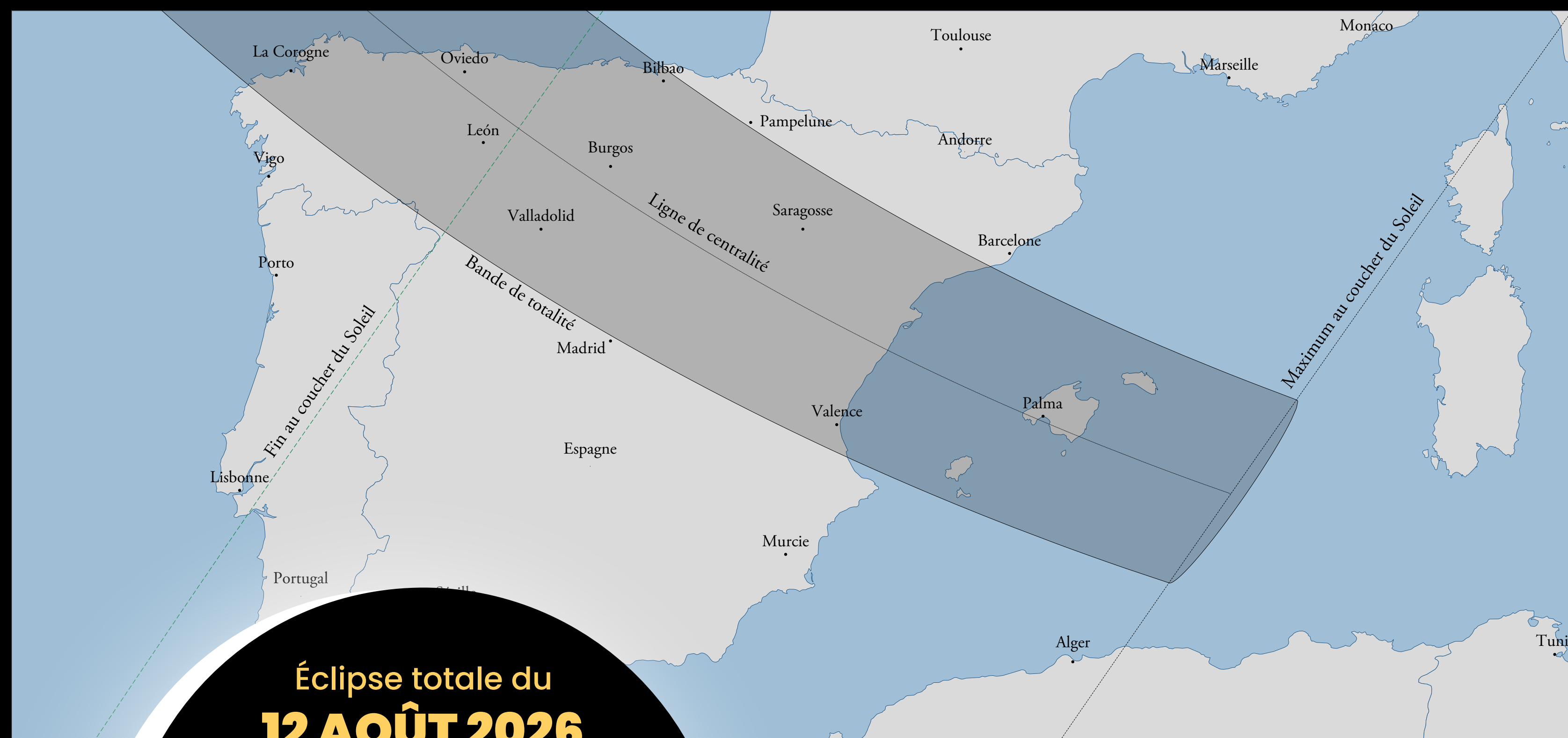
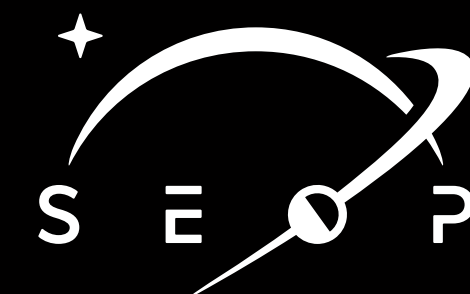
LA LUNE EST 400 FOIS PLUS PETITE QUE LE SOLEIL MAIS AUSSI 400 PLUS PROCHE : LES DEUX ASTRES ONT LA MÊME TAILLE APPARENTE ( $0,5^\circ$ ).

DE TOUTES LES PLANÈTES DU SYSTÈME SOLAIRE, IL N'Y A QUE SUR TERRE QU'ON PEUT AVOIR DES ÉCLIPSES TOTALES.

# EN 2026 ET 2027 : où voir les prochaines éclipse totales



L'ombre de la Lune balaye la surface de la Terre à environ 2 000 km/h formant la « bande de totalité ».  
Les prédictions des éclipses de Soleil ont été réalisées par le Service Espace (SE-OP) du Laboratoire Temps Espace  
de l'Observatoire de Paris : <https://ssp.imcce.fr>



## Éclipse totale du 12 AOÛT 2026

L'éclipse traversera le nord  
de l'Espagne un peu avant  
le coucher du soleil, vers 20h30.  
La Lune cache entièrement  
le Soleil pendant 1 min 50 s

La durée totale  
de l'éclipse est  
**~4H**

En France, l'éclipse du 12 août  
2026 sera partielle, mais  
le coucher de Soleil éclipsé  
offrira un spectacle rare.

L'éclipse ayant lieu pendant le  
coucher du Soleil, elle se déroulera  
bas sur l'horizon : pour bien  
en profiter, il est préférable de  
se trouver dans un environnement  
dégagé vers l'ouest.



## Éclipse totale du 2 AOÛT 2027

L'éclipse balayera tout le nord  
de l'Afrique de Gibraltar à l'Égypte.  
Avec une durée maximum  
de 6 minutes et 30 secondes  
à Louxor, ce sera l'une  
des plus longues du XXI<sup>e</sup> siècle.

La durée totale  
de l'éclipse est  
**~3H**

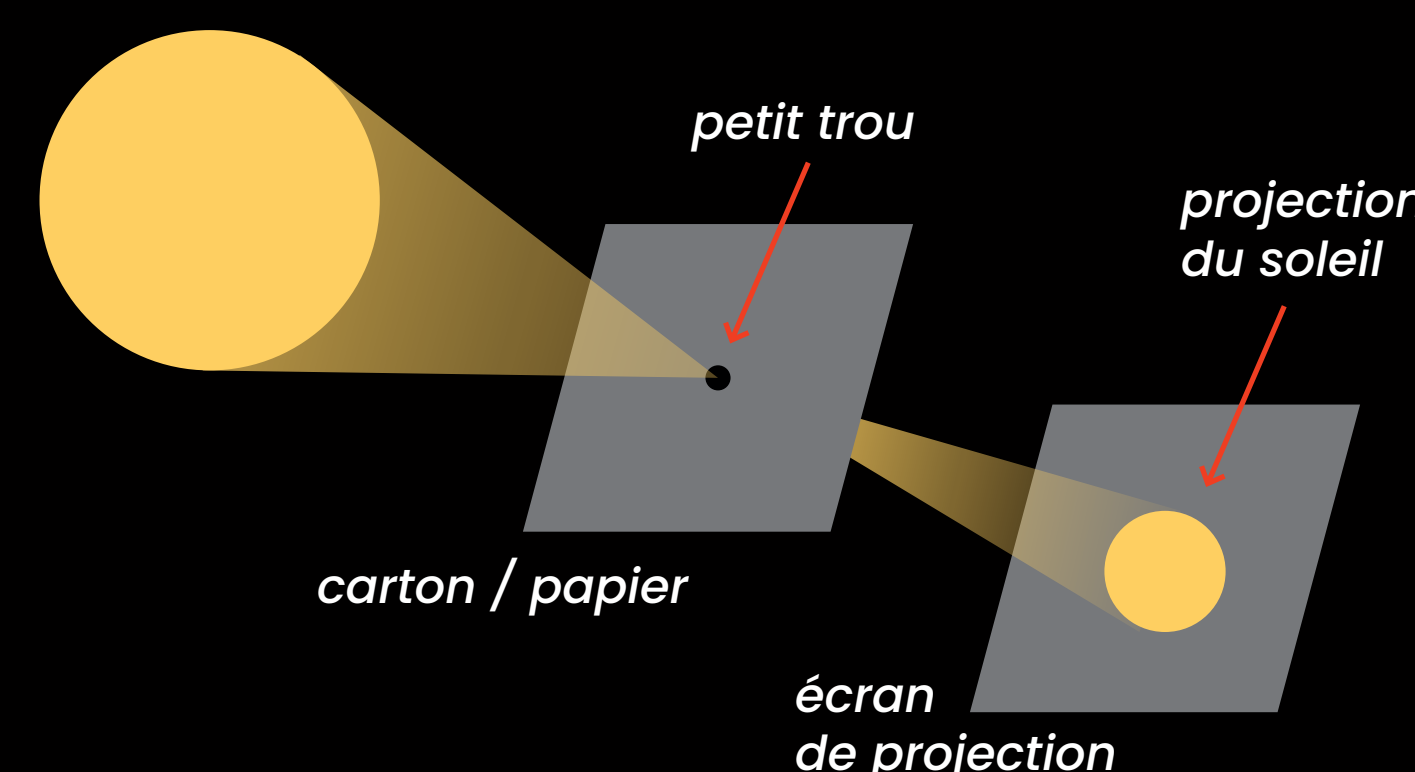
OBSERVER LE SOLEIL DIRECTEMENT EST TRÈS DANGEREUX POUR VOS YEUX !  
QUAND LE SOLEIL N'EST QUE PARTIELLEMENT OCCULTÉ, **IL FAUT :**

### 1. UTILISER DES LUNETTES AVEC UN FILTRE SPÉCIAL

(norme ISO 12312-2 : 2015)  
Avec leur filtre presque entièrement opaque,  
ces lunettes permettent d'observer le Soleil  
en tout temps. Il est crucial de bien  
vérifier que le filtre est parfaitement intact.



### 2. OU L'OBSERVATION INDIRECTE



DURANT LA PHASE TOTALE,  
L'OBSERVATION DIRECTE, SANS FILTRE, EST POSSIBLE !

**3/09/2081**

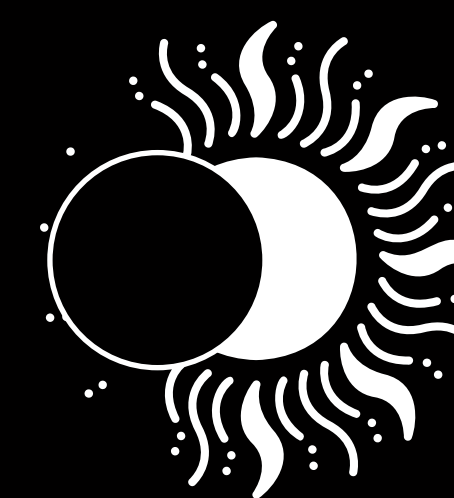
C'EST LA DATE  
DE LA PROCHAINE  
ÉCLIPSE TOTALE VISIBLE  
EN FRANCE.

**6m 30s**

À LOUXOR, LE 2 AOÛT 2027,  
CE SERA LA PLUS  
LONGUE ÉCLIPSE TOTALE  
DU XXI<sup>e</sup> SIECLE.

# 136 AVANT NOTRE ÈRE :

## l'éclipse qui confirme le ralentissement de la Terre



Des sources anciennes affirment qu'une éclipse totale de Soleil eu lieu à Babylone le 15 avril 136 avant notre ère.

1 Si l'on calcule, avec les théories modernes, les circonstances de cette éclipse, sa bande de totalité serait passée plutôt au Sud de la France et au Maroc...

2 Tout rentre dans l'ordre si l'on ajoute un ralentissement de la rotation de la Terre de 1,5 millisecondes par siècle !

🌑 **EN CONSÉQUENCE,** les calculs indiquent que la Lune s'éloigne de la Terre de 3,8 cm par an !

### QU'EN EST-IL DES MESURES ?

Il y a cinq réflecteurs laser sur la Lune, posés entre 1969 (Apollo) et 1973 (mission Lunokhod) qui permettent de mesurer avec une précision inférieure au centimètre la distance Terre-Lune (environ 384 400 km). Les mesures les plus récentes montrent un éloignement compris entre 3,7 et 3,8 cm par an.

🌊 Le ralentissement de la Terre est principalement dû aux frottements des marées océaniques sur les fonds marins.



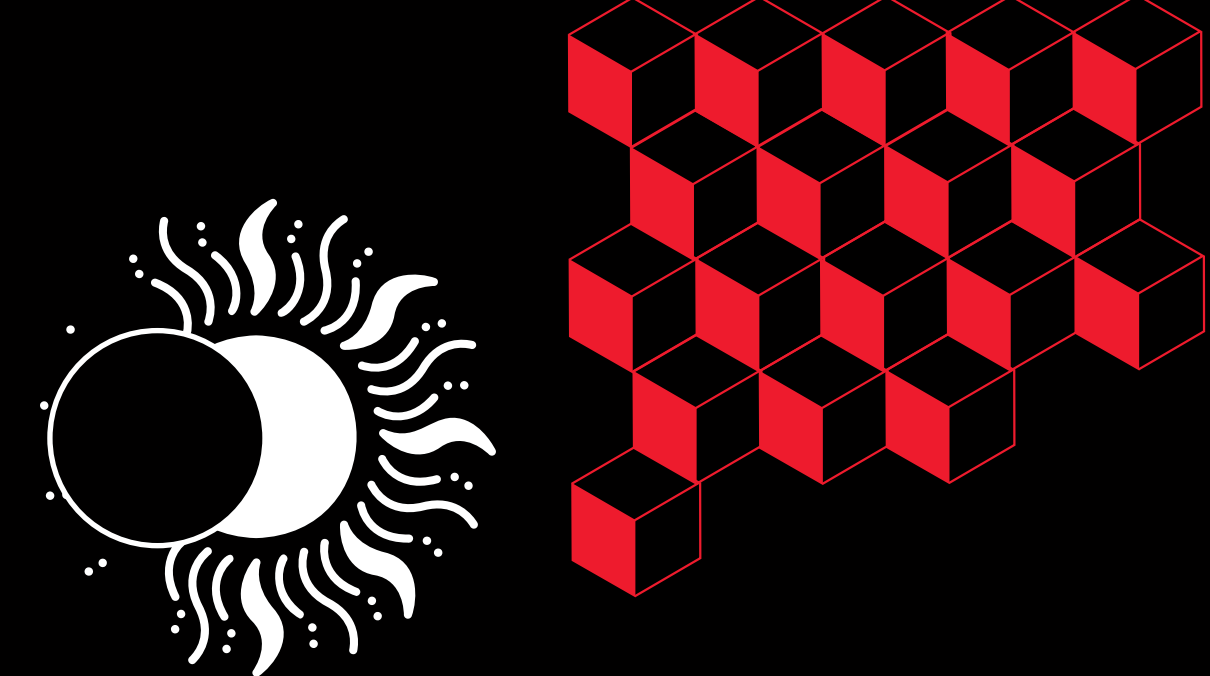
© IMCCE/Patrick Rocher (adaptation IA)

DANS

## 600 millions d'années,

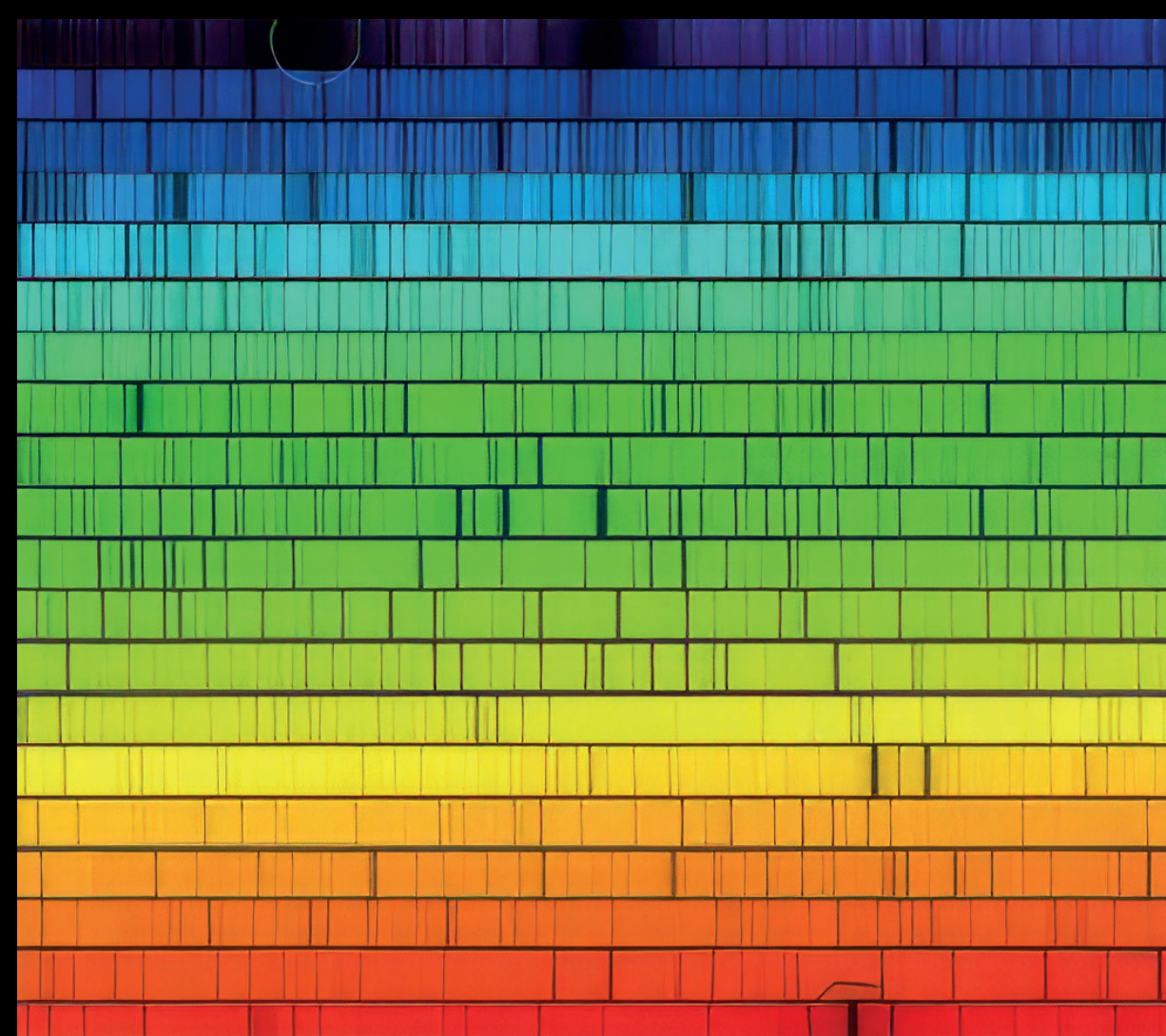
LA LUNE SERA ÉLOIGNÉE AU POINT DE NE PLUS POUVOIR COUVRIR COMPLÈTEMENT LE DISQUE SOLAIRE : IL N'Y AURA PLUS D'ÉCLIPSE TOTALE DE SOLEIL !

# 1868 : l'éclipse qui a révélé l'hélium



Lors de l'éclipse solaire du 18 août 1868 observée depuis Guntur (Inde), l'astronome français Jules Janssen observe une raie jaune brillante dans le spectre de la chromosphère du Soleil.

Cette raie était la signature d'un élément nouveau, qui fut nommé hélium !



## SPECTRE SOLAIRE

Ce spectre solaire montre les couleurs de la lumière visible du Soleil, et les trous sombres à chaque couleur de cet arc-en-ciel sont des indices pour identifier les éléments chimiques. L'une d'entre elles a permis la découverte de l'hélium en 1868.

Crédit : LIRA

## COMMENT FAIRE UNE ÉCLIPSE ARTIFICIELLE

Les coronographes recréent des conditions d'éclipses pour étudier la couronne solaire en simulant une éclipse artificielle.

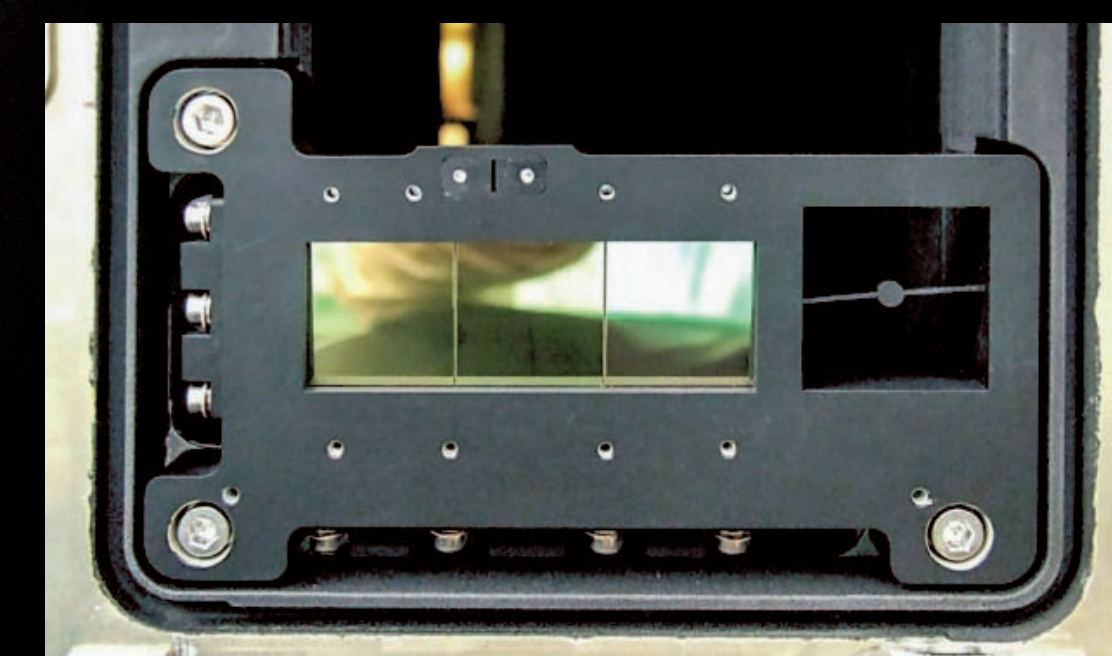
Ils bloquent la lumière aveuglante d'une étoile (comme le Soleil) pour révéler les détails de son environnement proche, normalement invisibles.

Les coronographes sont aujourd'hui embarqués sur des satellites et des télescopes terrestres. Ils sont aussi adaptés pour étudier les exoplanètes (en bloquant la lumière de leur étoile hôte).



Chromosphère du Soleil lors de l'éclipse du 11 août 1999.

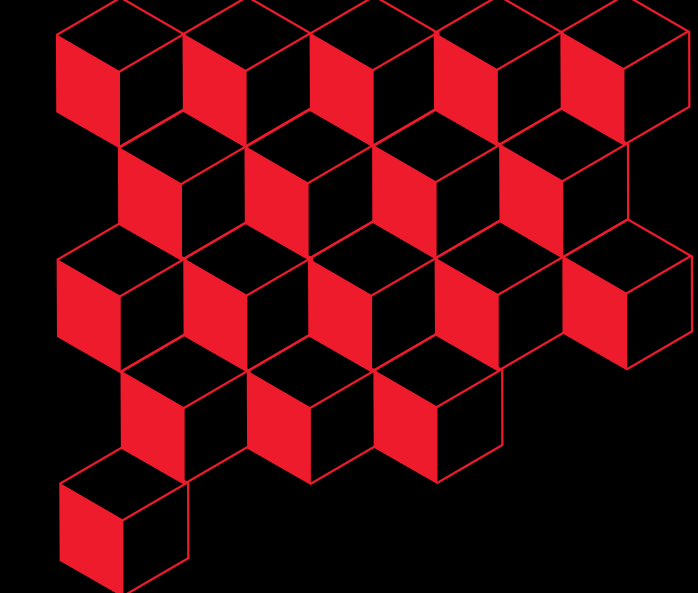
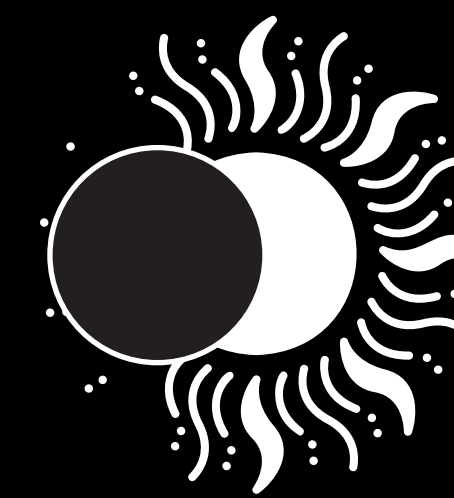
La chromosphère est une couche fine et dynamique de l'atmosphère du Soleil, située entre la photosphère (surface visible) et la couronne solaire. Elle n'est visible que lors d'une éclipse solaire totale ou à l'aide d'un coronographe équipé d'un filtre H $\alpha$ . Sa couleur rose-rougeâtre est due à l'émission de la raie H $\alpha$  de l'hydrogène.



Exemple de masque coronographique utilisés sur le télescope James Webb (JWST).

# 1919 :

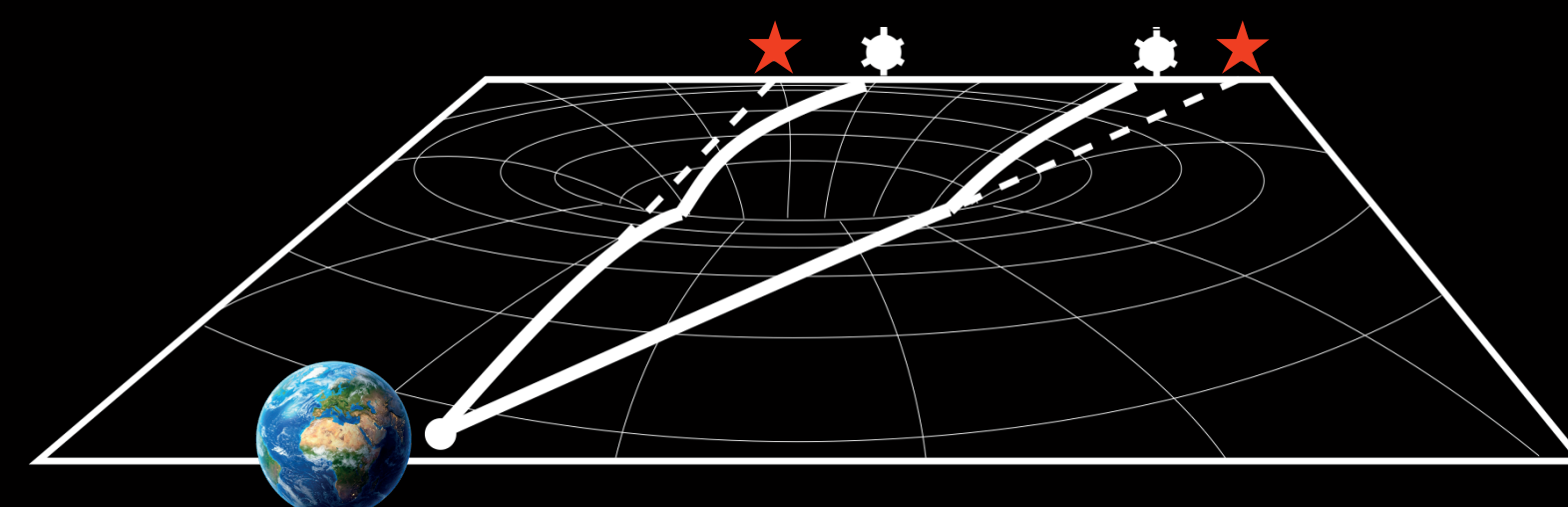
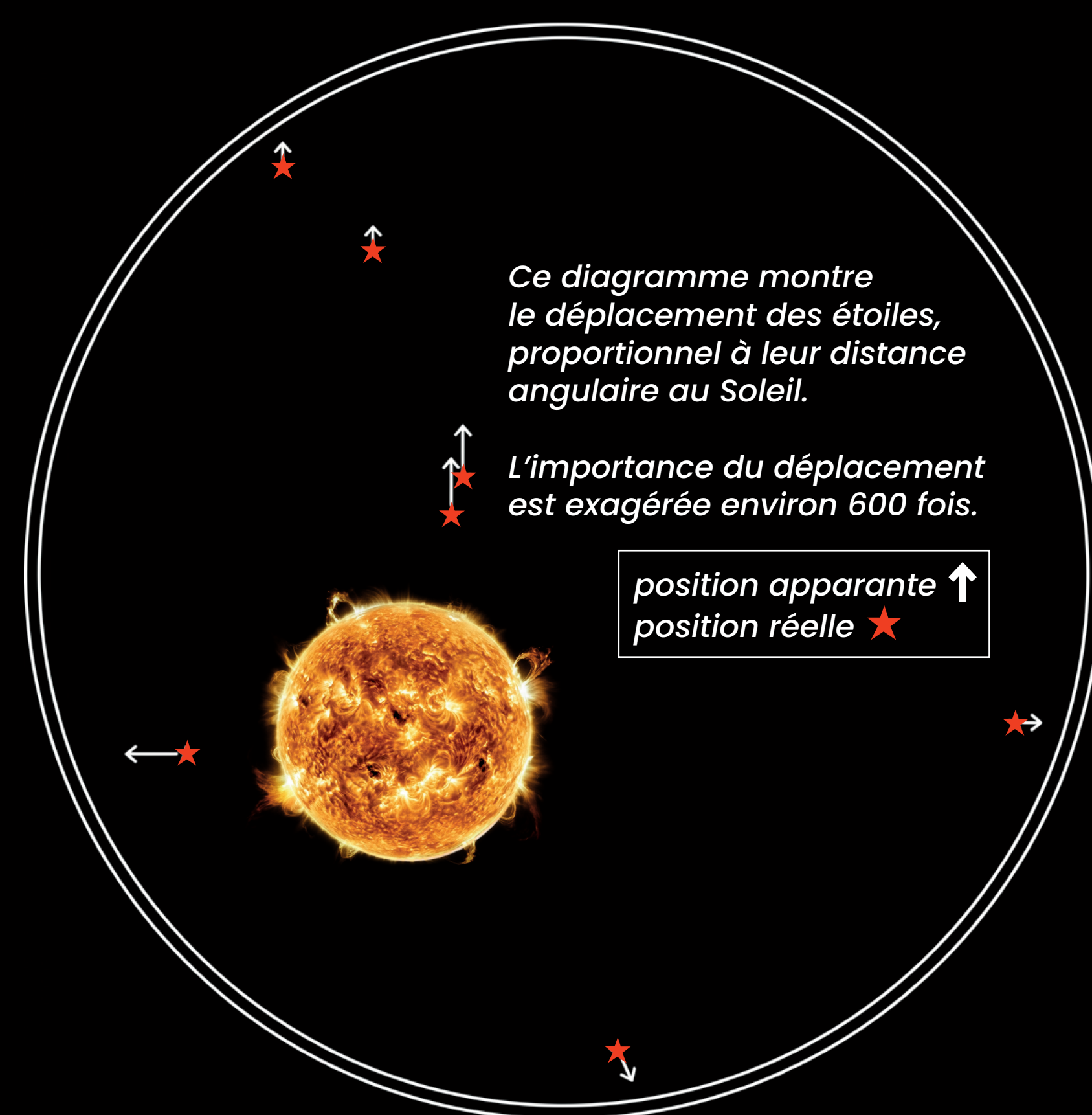
## l'éclipse qui a validé la théorie d'Einstein



### Éclipse du 29 mai 1919

Selon la théorie de gravitation d'Einstein, la relativité générale, la lumière peut être déviée en passant au voisinage d'un corps massif.

Dans un manuscrit daté du 18 novembre 1915, Einstein propose de tester sa théorie durant une éclipse totale de Soleil. Il prédit que la lumière d'une étoile frôlant le Soleil sera déviée de 1,75 secondes d'arc. La vérification expérimentale sera faite durant l'éclipse totale du 29 mai 1919, par l'astronome britannique Arthur Eddington !



Quelques mois avant l'éclipse totale prévue en mai 1919, Eddington mesure les positions de quelques étoiles, proches du Soleil et pendant la nuit.

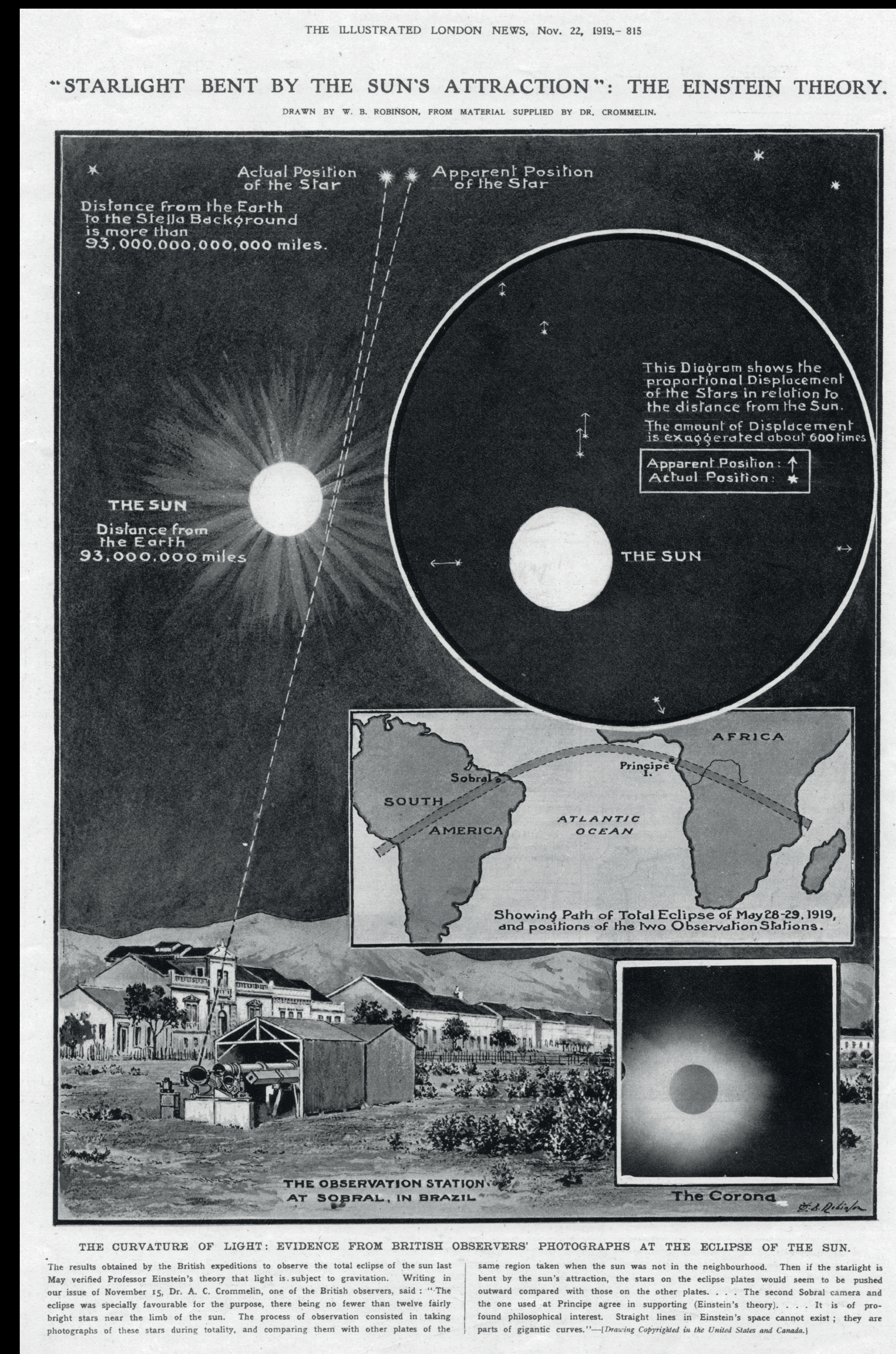
Pendant l'éclipse, il remesure les positions des mêmes étoiles. Il les trouve légèrement différentes pour chacune des étoiles : elles semblent s'être écartées un peu du Soleil.

Le Soleil, corps massif, a déformé l'espace, et la course de la lumière en est modifiée.

Ses résultats confirmèrent la prédiction d'Einstein et firent les gros titres de la presse.

LA DÉVIATION OBSERVÉE, ÉGALE À 1,75 SECONDE D'ARC, CORRESPOND À LA TAILLE APPARENTE DE

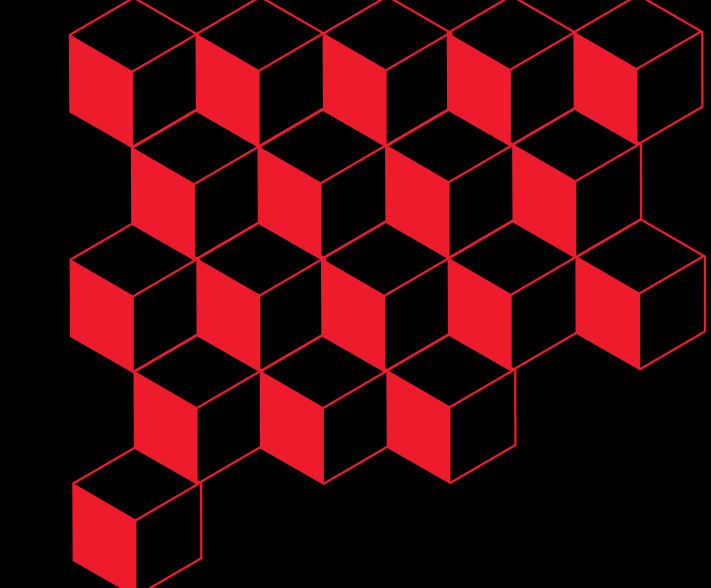
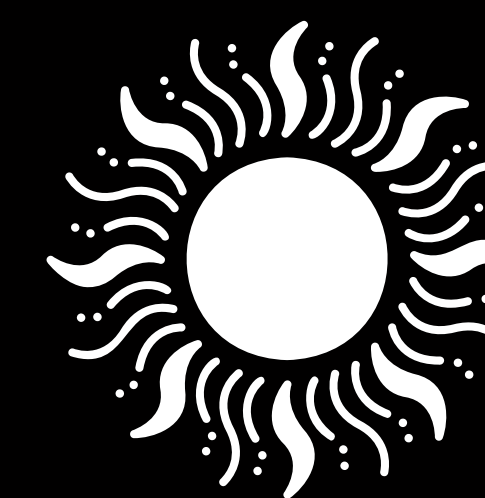
**1 pièce de 1€ vue à 3 km !**



Couverture du Illustrated London News du 22 novembre 1919.

# VOYAGE AU CENTRE DU SOLEIL

## un mystère brûlant



Le Soleil est notre étoile, faisant partie des centaines de milliards d'étoiles qui peuplent notre galaxie, la Voie Lactée. Une étoile se distingue des planètes comme la Terre ou Saturne car elle génère en son sein sa propre chaleur par fusion de l'hydrogène, élément le plus abondant de l'Univers.

Le Soleil est une gigantesque boule de gaz chaud (plasma) constitué de plusieurs couches de son cœur à son atmosphère :

### - Intérieur radiatif :

sphère de 500 000 km d'épaisseur, au centre réside le cœur nucléaire où la fusion transforme l'hydrogène en hélium, libérant une énergie colossale.

### - Enveloppe convective :

196 000 km d'épaisseur, où la matière bouillonne en cellules géantes, comme une soupe stellaire.

### - Atmosphère solaire avec trois couches :

- La photosphère (500 km, 5 800 K) ;
- la chromosphère (2 000-5 000 km, 4 500-20 000 K) ;
- et la couronne (plusieurs millions de km, 1-3 millions de K), chacune jouant un rôle clé dans l'activité de notre étoile.

### CHIFFRES VERTIGINEUX

#### - Volume :

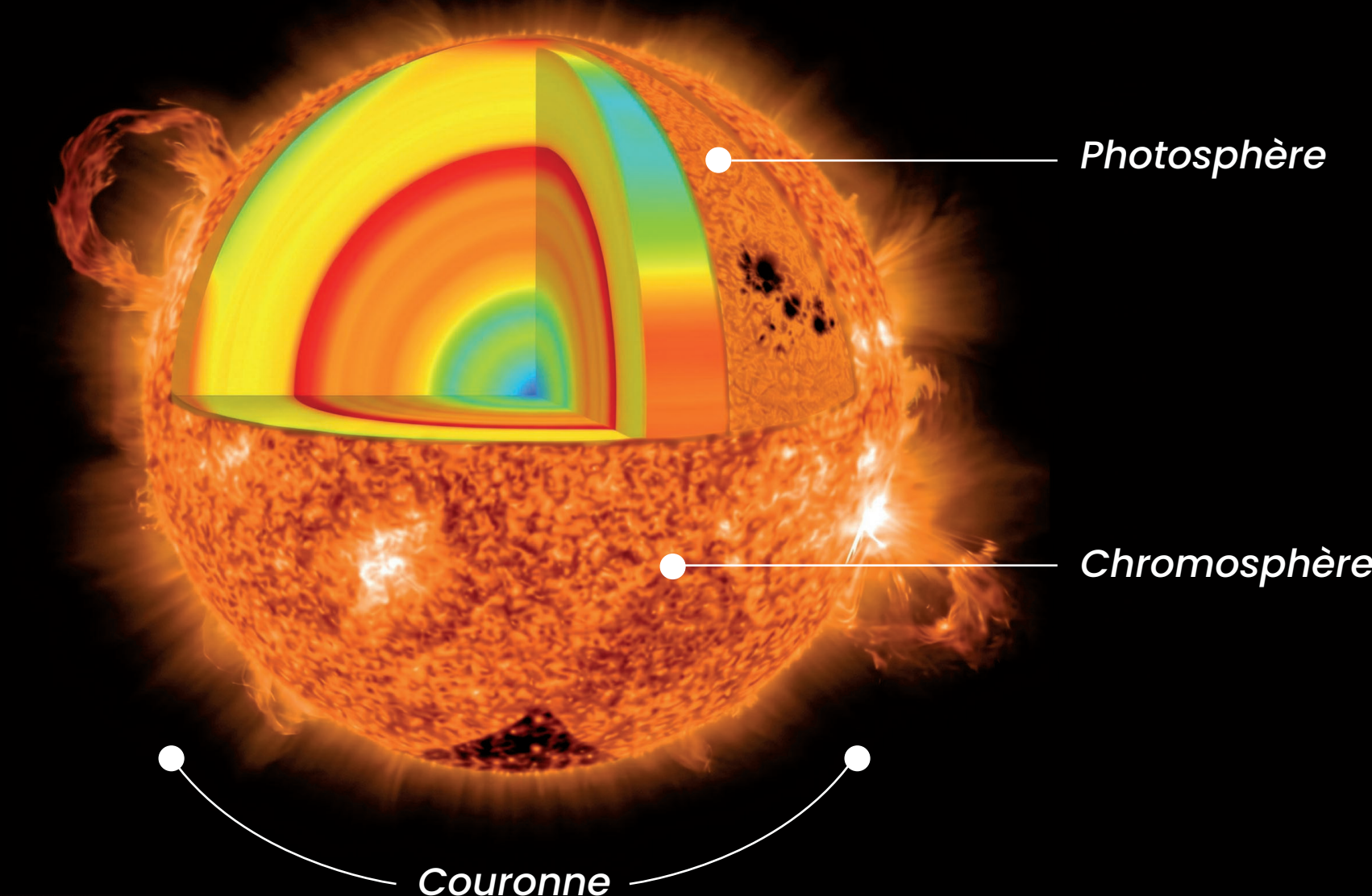
1 million de fois celui de la Terre.

#### - Rayon :

696 000 km (soit 109 fois celui de notre planète).

#### - Température du cœur :

15 millions de degrés.



Le Soleil, observé en lumière visible, ultraviolette et X, révèle ses secrets : chaque couleur dévoile un phénomène physique différent, de l'apparition de taches solaires et de régions actives brillantes associées, aux éruptions projetant particules chargées et champs magnétiques, tout en traçant les propriétés uniques de ses couches atmosphériques.

# 28 !

LA GRAVITÉ DU SOLEIL À SA SURFACE EST 28 FOIS SUPÉRIEURE À CELLE DE LA TERRE.

cea

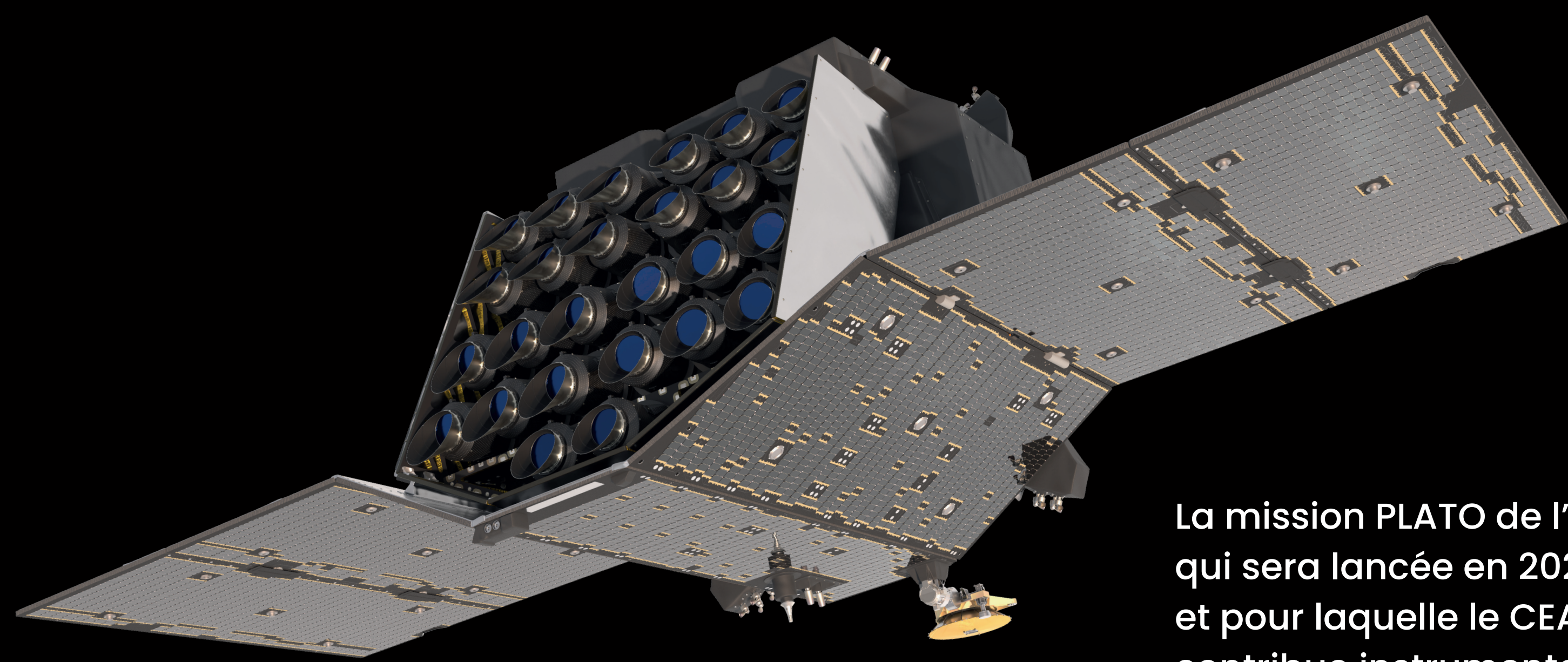
# ÉCOUTER LE SOLEIL : l'héliosismologie

Depuis la fin des années 1970 on sait que les étoiles comme le Soleil sont des grands tambours ! Elles vibrent en permanence avec des oscillations de deux types : acoustiques ou de gravité. Ces ondes ne se propagent pas de manière identique dans le Soleil et explorent ainsi différentes zones.

Les ondes acoustiques sondent surtout la surface, bien que certains modes puissent passer par le centre, tandis que les ondes de gravité sont principalement confinées dans la zone radiative.

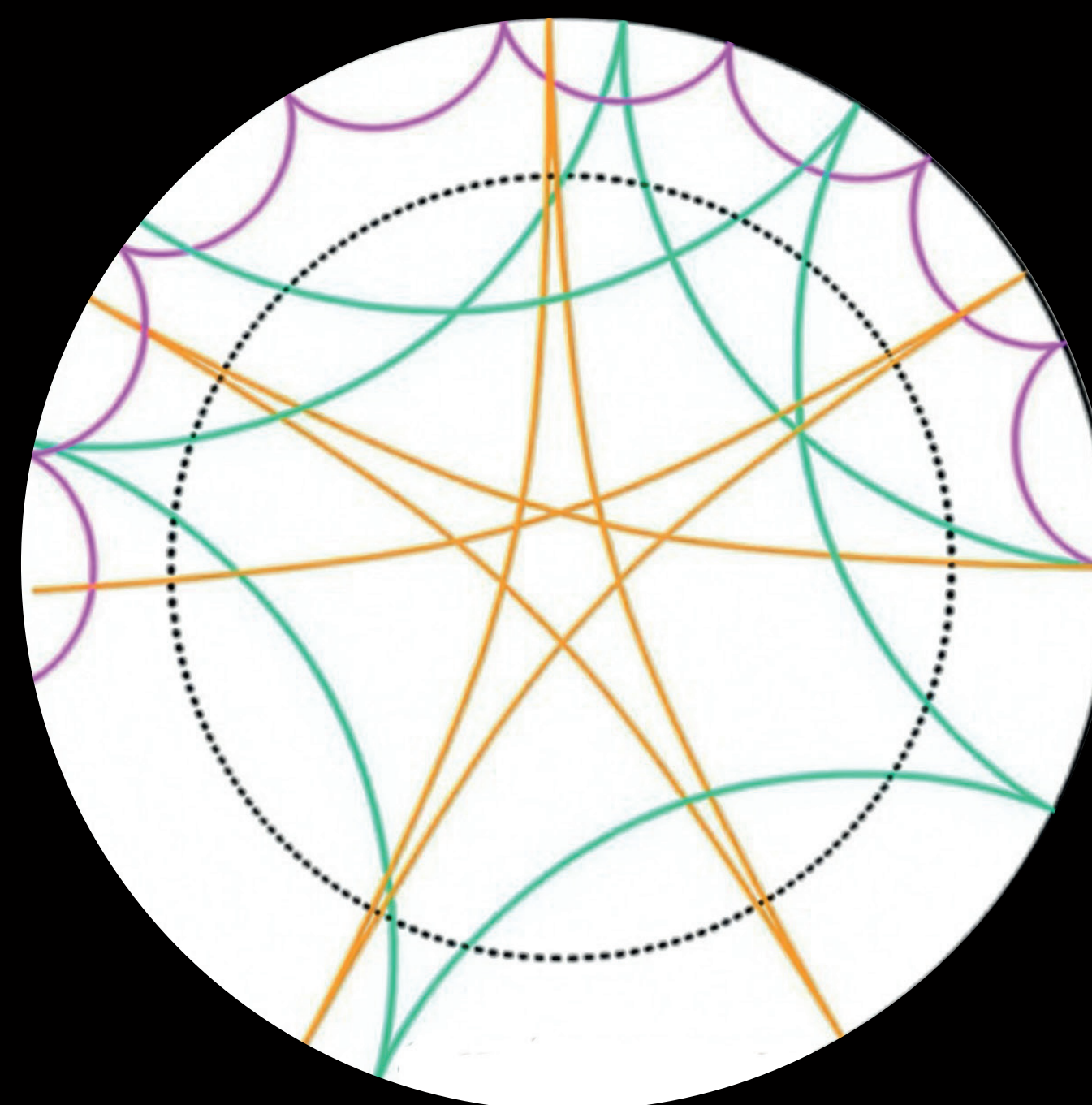
L'analyse de ces modes constitue le fondement de l'héliosismologie, discipline qui révèle les propriétés physiques des couches internes du Soleil.

À ce jour, seules les ondes acoustiques solaires ont été observées et la détection difficile des ondes de gravité fait l'objet d'une recherche active.

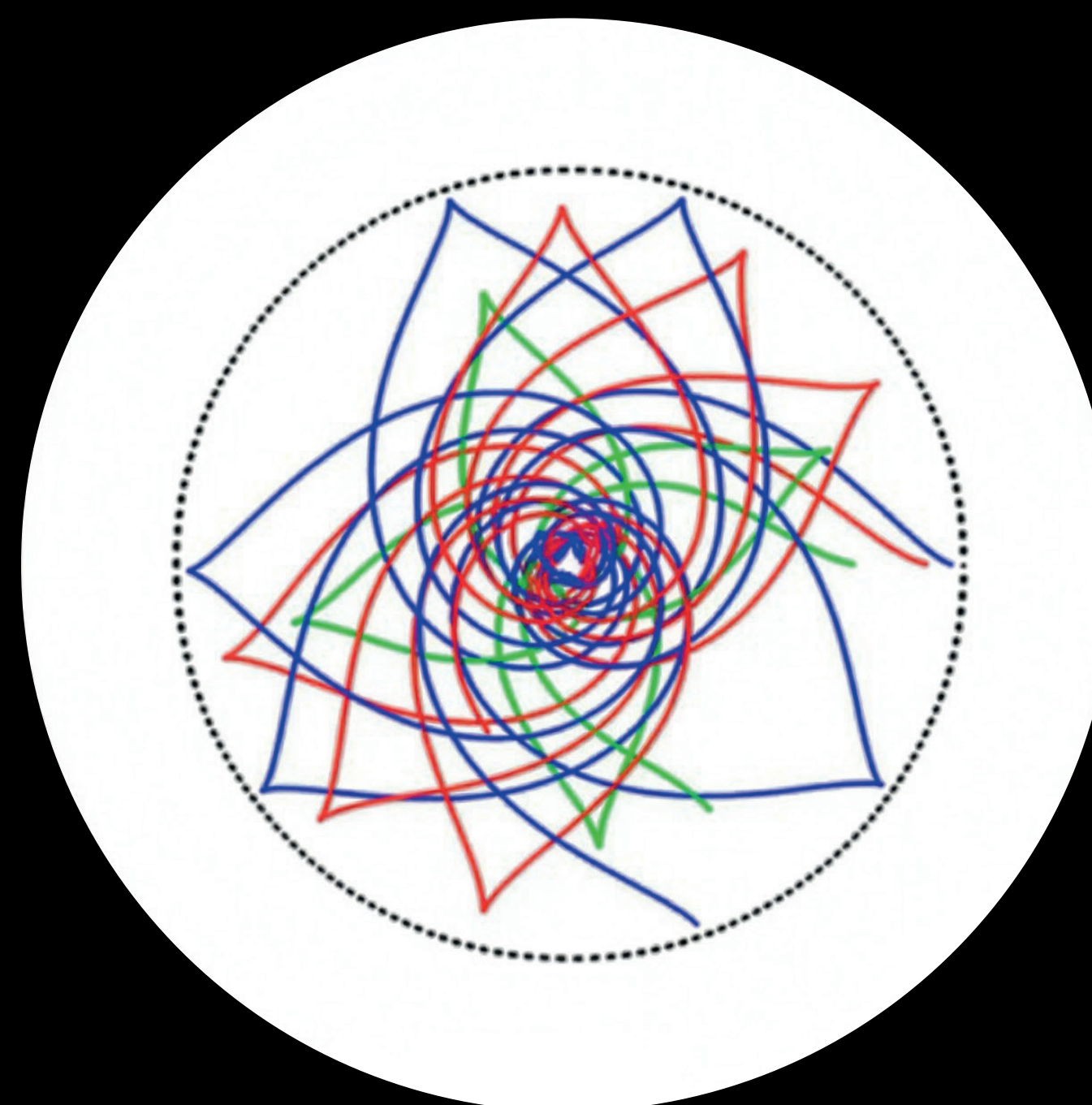


La mission PLATO de l'ESA qui sera lancée en 2027 et pour laquelle le CEA contribue instrumentalement et scientifiquement, va étudier les différents modes d'oscillations des étoiles.

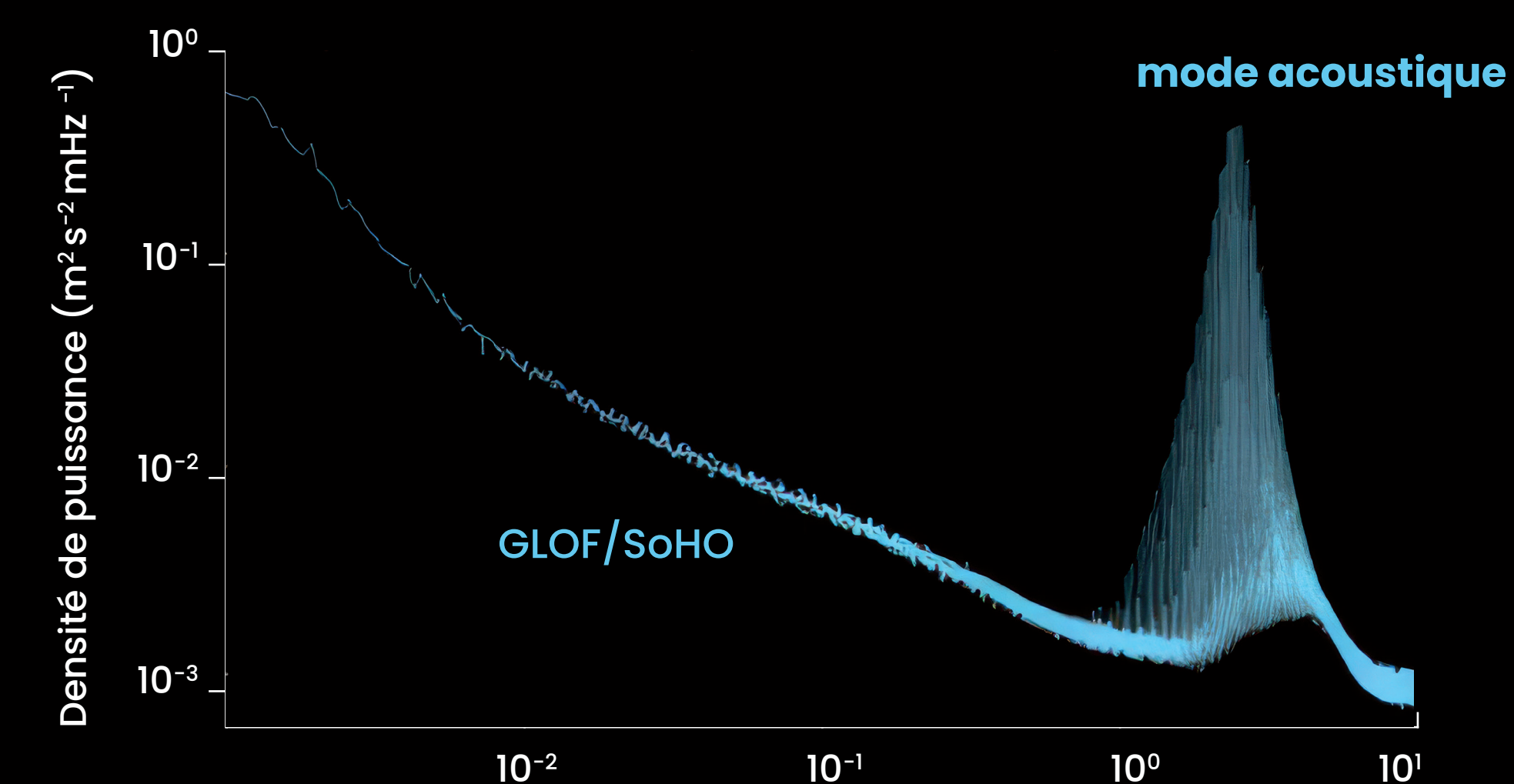
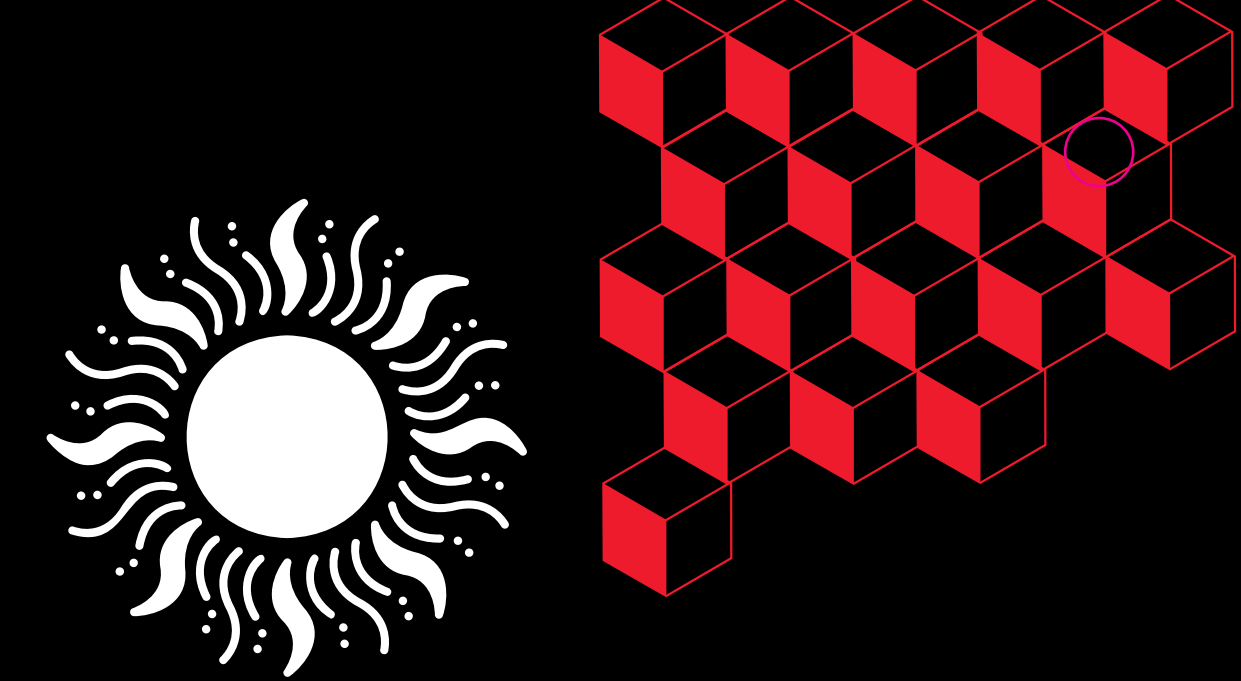
cea



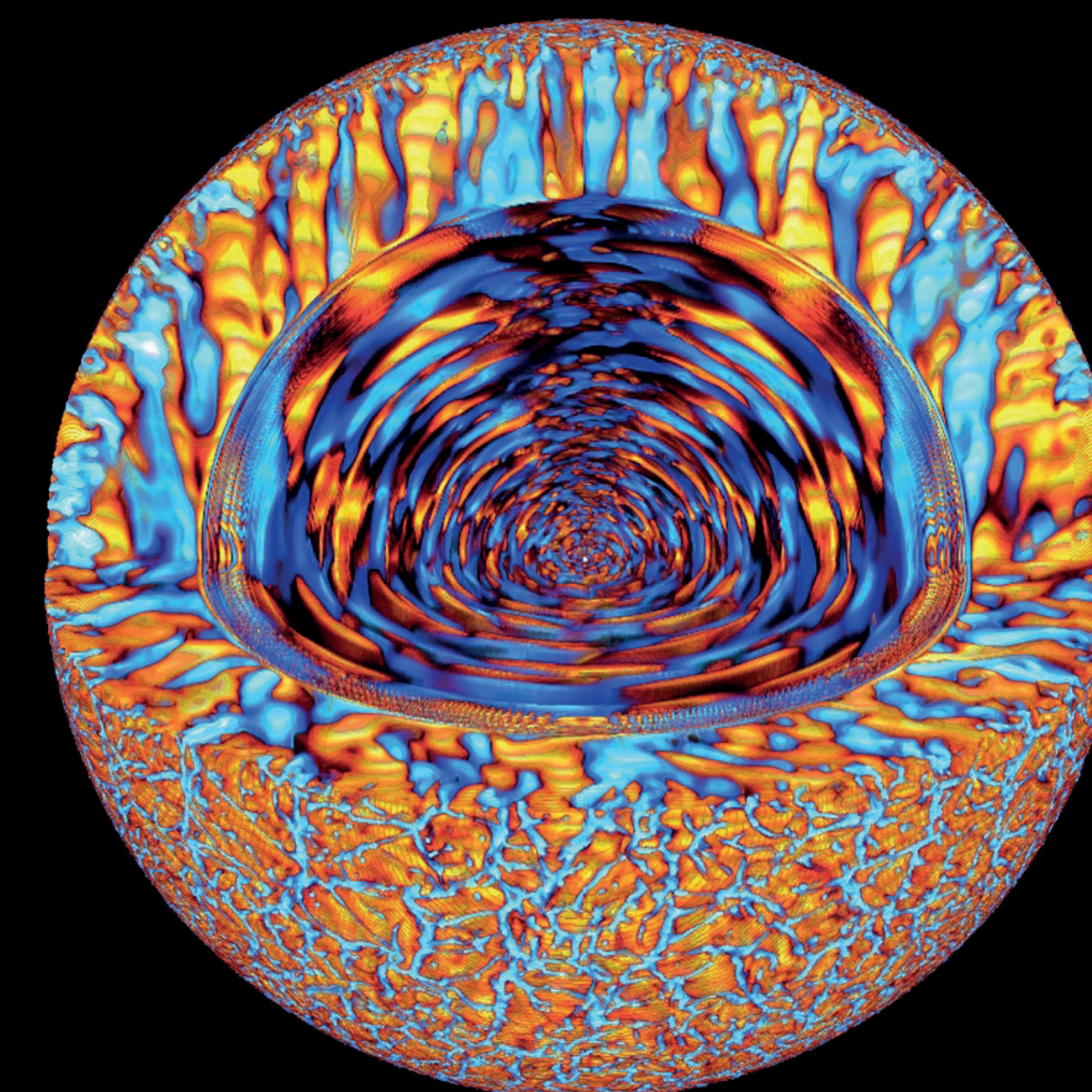
ondes acoustiques



ondes de gravité



SPECTRE D'OSCILLATION MESURÉ PAR  
L'INSTRUMENT GOLF DU SATELLITE SOHO



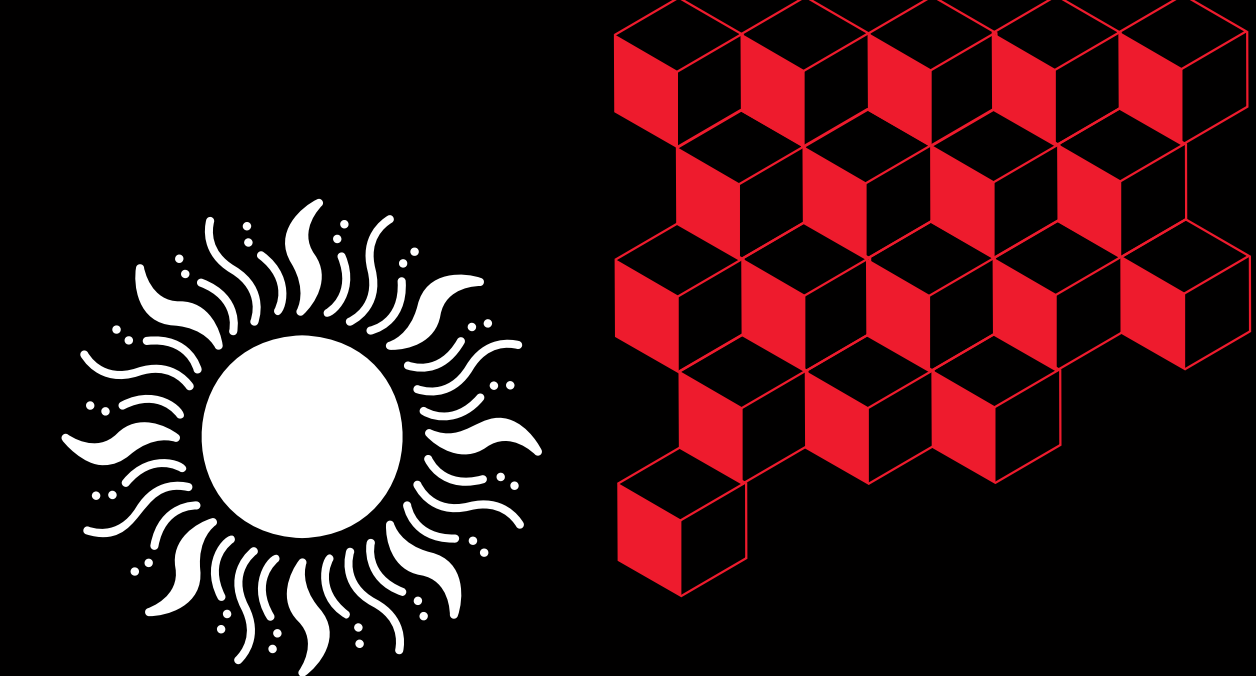
SIMULATION NUMÉRIQUE DU SOLEIL CALCULÉE  
AU TGCC (TRÈS GRAND CENTRE DE CALCUL)  
DU CEA INCLUANT LA CONVECTION ET LES MODES  
DE GRAVITÉ

**5 min**

C'EST LA PÉRIODE DE VIBRATION  
DES ONDES ACOUSTIQUES DU SOLEIL.

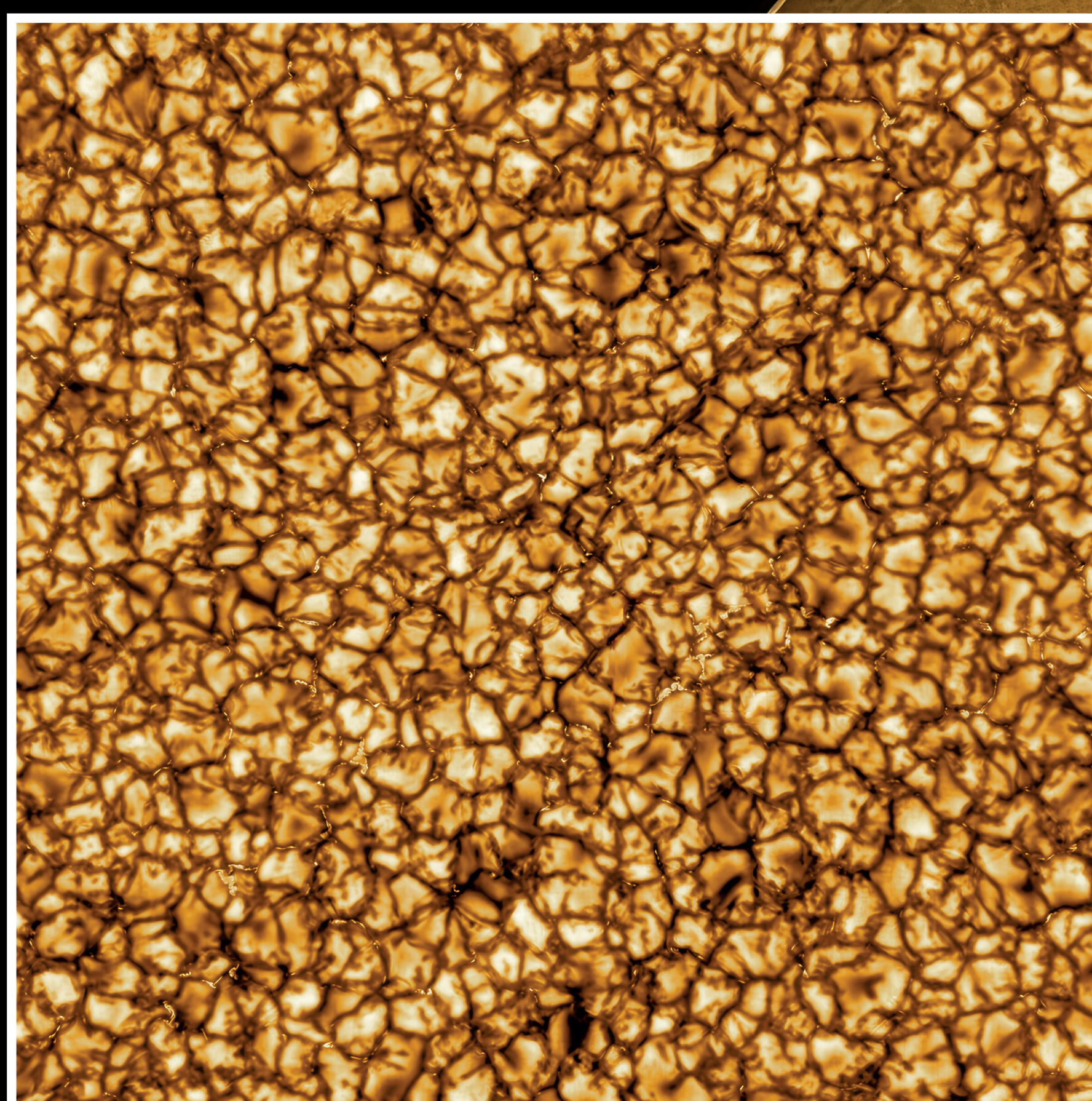
# LA PHOTOSPHÈRE :

## une mosaïque en mouvement

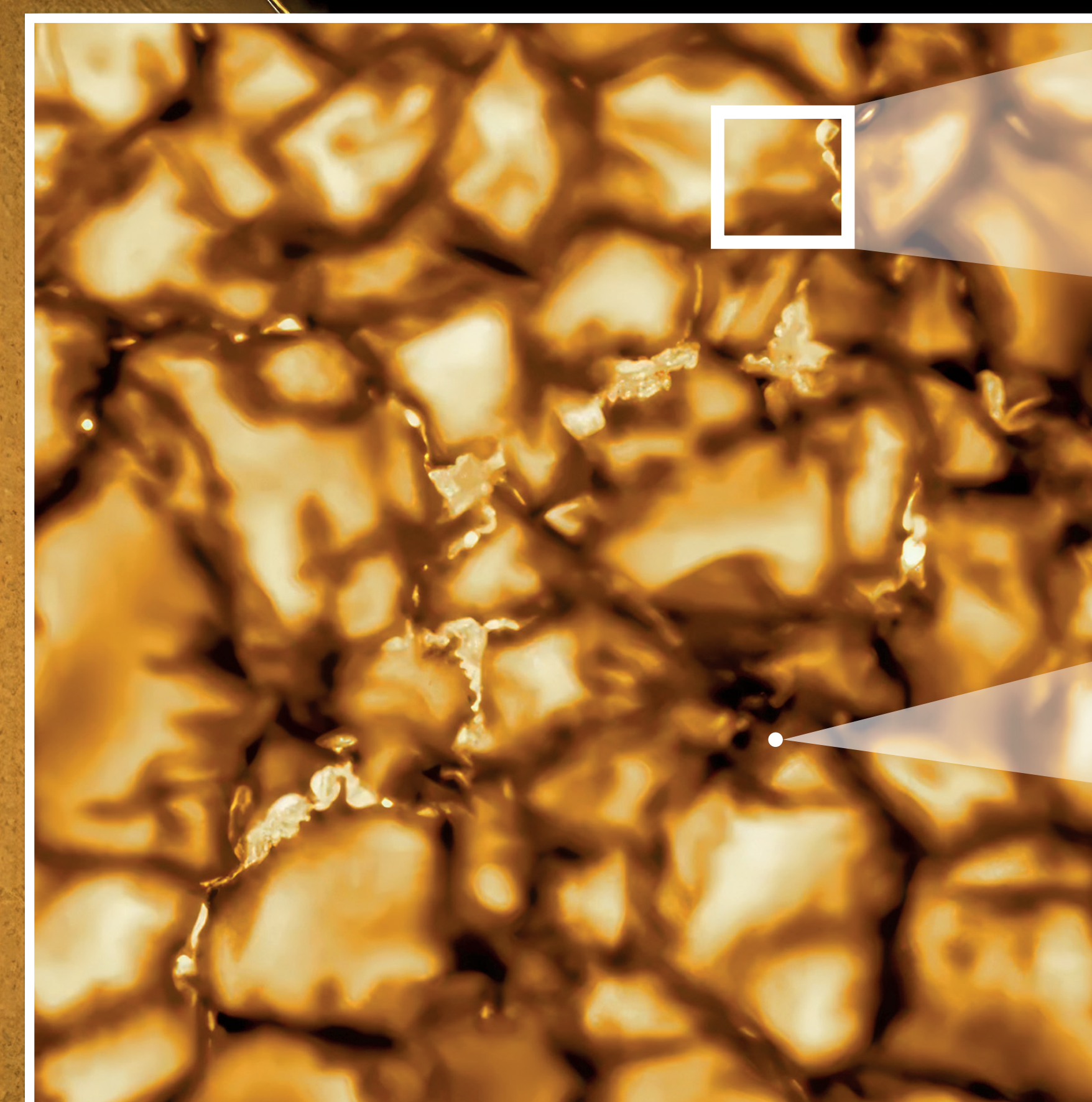


**La photosphère** est la « peau » visible du Soleil d'où s'échappe la lumière qui nous parvient. C'est la couche que nous voyons au quotidien.

Image du Télescope Solaire Inouye



Gros plan du Télescope Solaire Inouye 7 000 km<sup>2</sup>



### LA SUPERGRANULATION : des courants profonds

À « grande échelle », on découvre un réseau de courants géants : Des structures cohérentes, grandes comme plusieurs fois la Terre, avec des temps de vie de l'ordre de la journée.

Elles révèlent les mouvements profonds du Soleil, comme des vagues agitant un océan de plasma.

## 1000 km

C'EST LA TAILLE TYPIQUE  
DE LA GRANULATION  
À LA PHOTOSPHÈRE SOLAIRE.

### LA GRANULATION : des bulles géantes éphémères

À « petite échelle », la surface du Soleil ressemble à un pavage mouvant de cellules géantes de la taille de la France ! Elles montent et descendent en permanence.

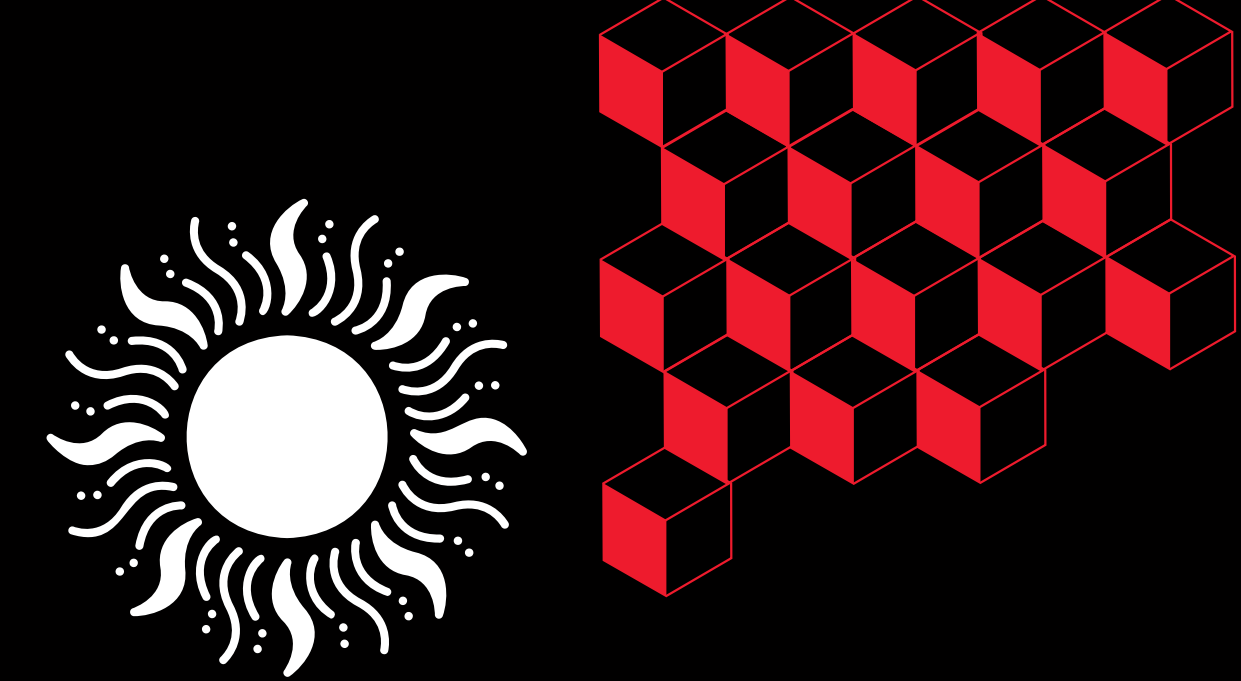
Au centre de la cellule, la matière est plus chaude et brille intensément.

Au bord, la matière refroidit, redescend et devient plus sombre.

Sa durée de vie est seulement de 5 à 10 minutes, comme des bulles qui se renouvellent sans cesse.

Les points ultra lumineux correspondent à des zones où le champ magnétique du Soleil est le plus puissant.

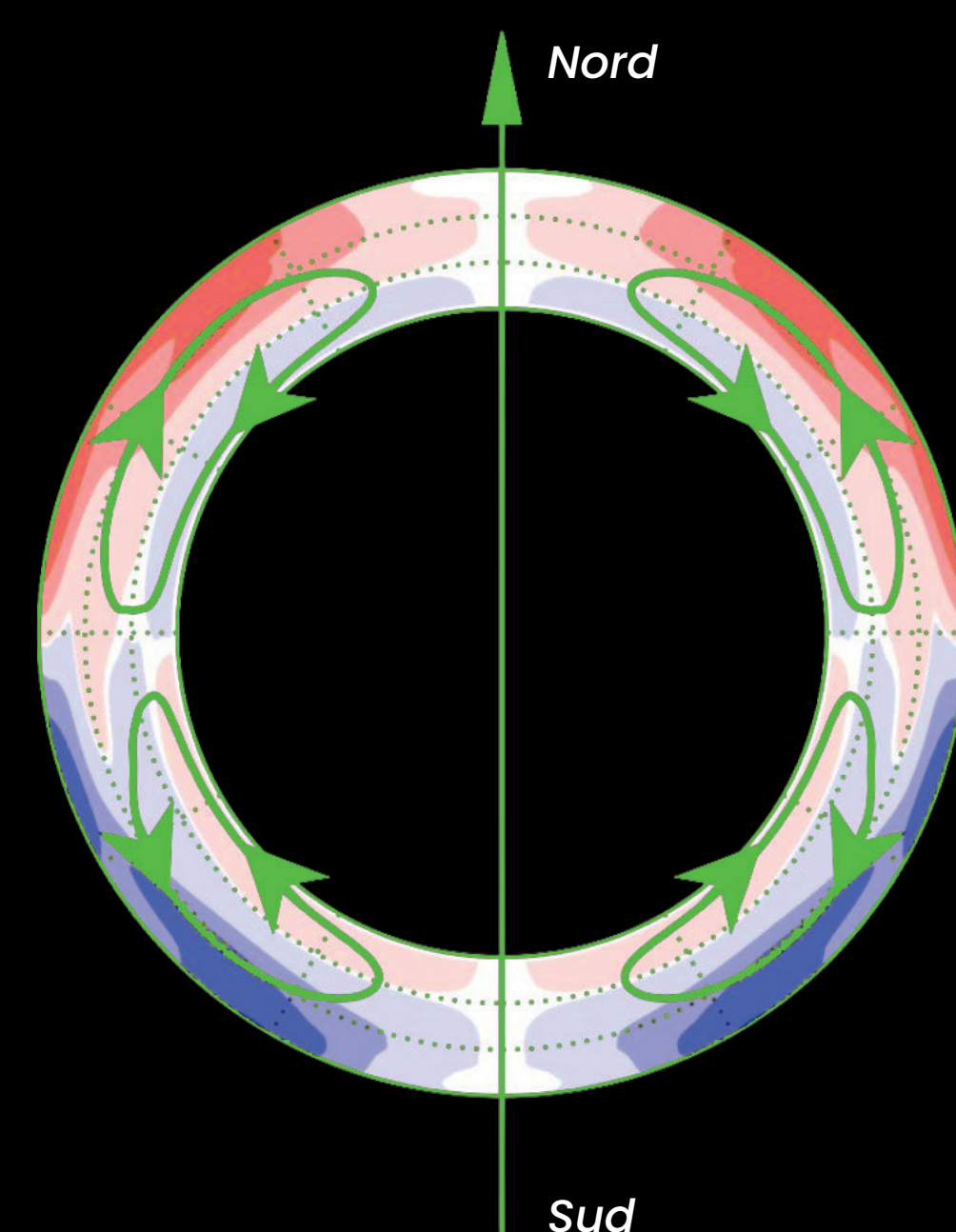
# LES GRANDS MOUVEMENTS au sein du Soleil



Le Soleil étant fluide, il ne tourne pas d'un seul bloc à sa surface. Les mouvements de surface sont mesurés depuis longtemps grâce aux taches solaires. C'est ainsi qu'a été découverte une forte variation de la vitesse de rotation, dite rotation différentielle.

À l'équateur, il fait un tour sur lui-même en 24,5 jours (à 7 200 km/h), tandis qu'aux pôles, il met 35 jours (30 % plus lent).

Résultat : si on place deux amis sur un manège-Soleil, celui à l'équateur doublera son copain aux pôles en seulement 4 tours !

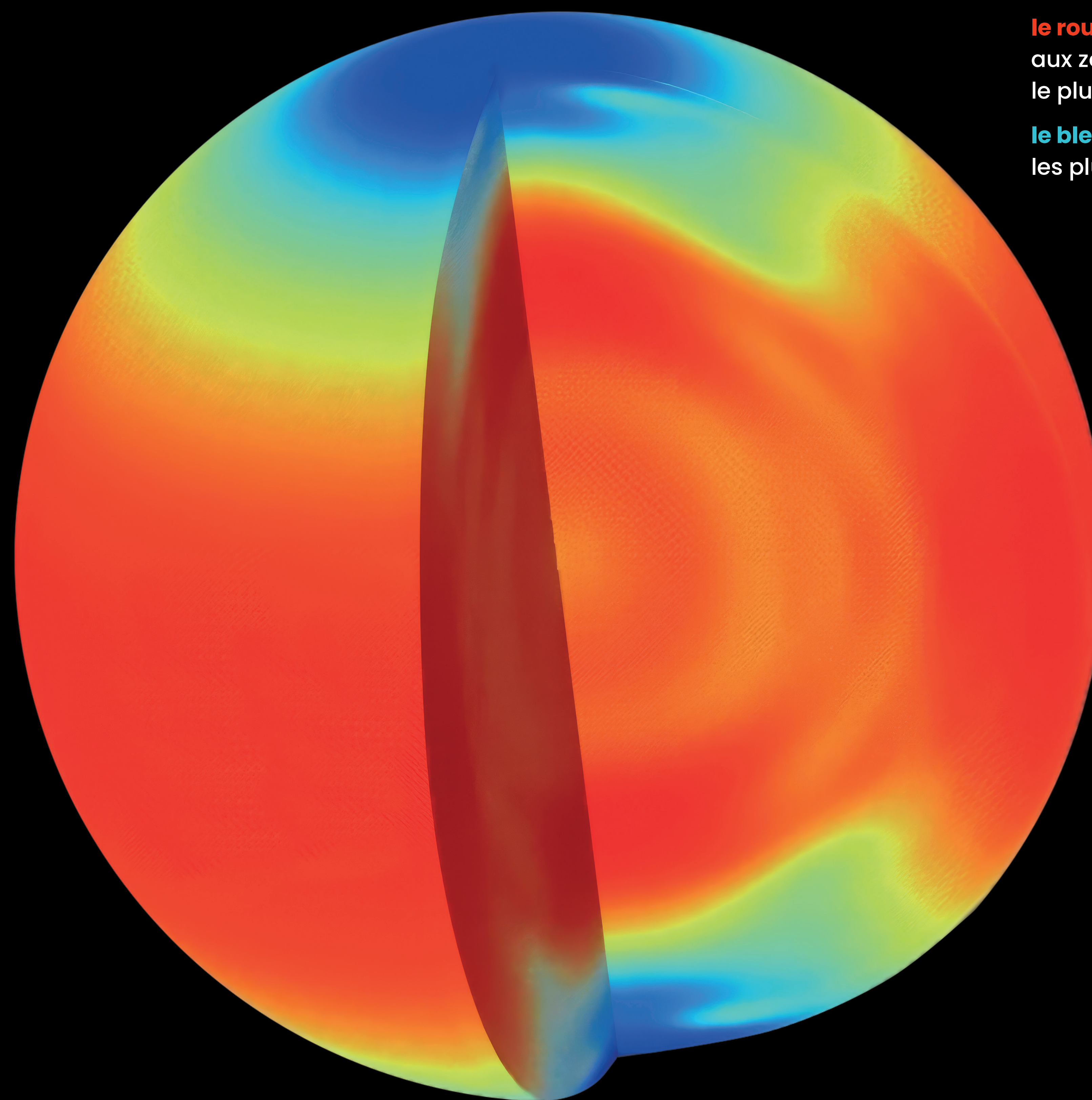


CIRCULATION MÉRIDIDIENNE

Et ce n'est pas tout :

Un autre mouvement joue un rôle clé dans la dynamique interne solaire : la circulation méridienne.

C'est un écoulement beaucoup plus lent, de l'ordre de 72 km/h à la surface et 10 km/h à 200 000 km de profondeur.



**le rouge** correspond aux zones tournant le plus vite,  
**le bleu** foncé aux zones les plus lentes.

Cette image, capturée par l'instrument (MDI) à bord de l'observatoire spatial SOHO (NASA/ESA), illustre les différences de vitesse de rotation de la matière à l'intérieur du Soleil.

Crédit photo : Université de Stanford



ROTATION =

**25 jours**

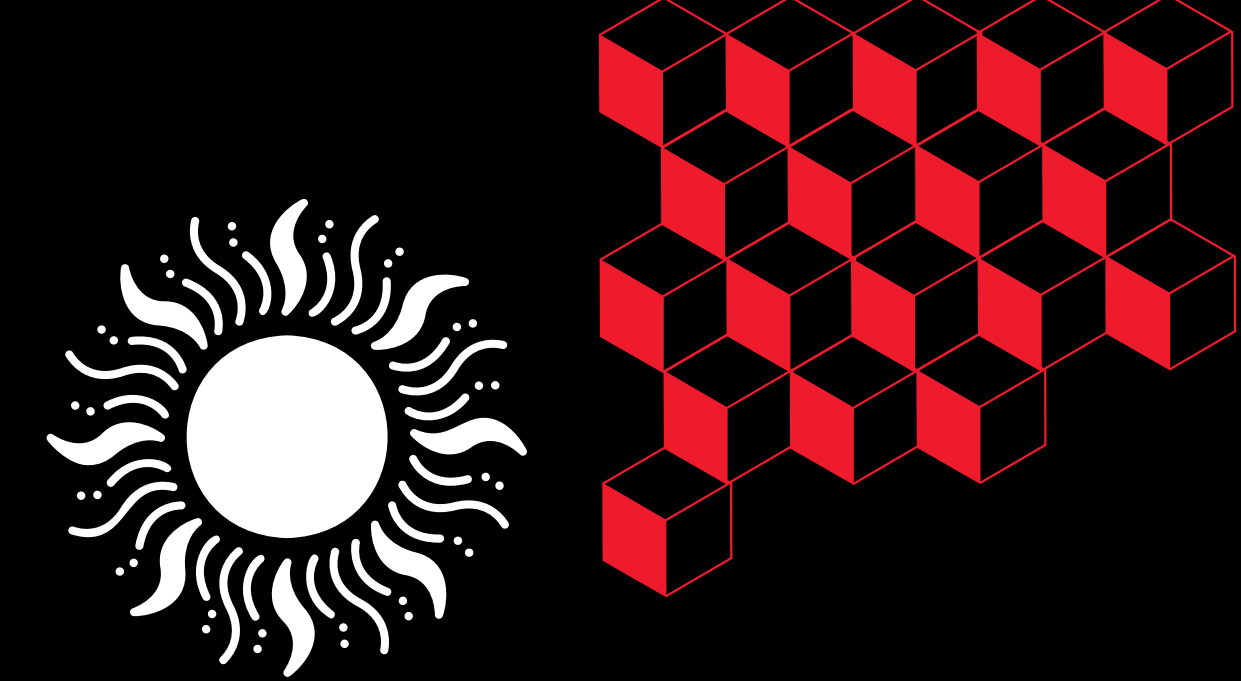
AUX PÔLES.

**34 jours**

AUX PÔLES.

# LES TACHES SOLAIRES :

## quand l'empreinte du champ magnétique est visible à l'œil nu



Les taches solaires sont des régions sombres à la surface du Soleil, plus froides que leur environnement. Ceci est dû à l'intensité des champs magnétiques qui les traversent et qui limitent les mouvements du plasma. Elles sont généralement composées d'une ombre (partie sombre centrale) et d'une pénombre (partie en pétales sur leur pourtour).

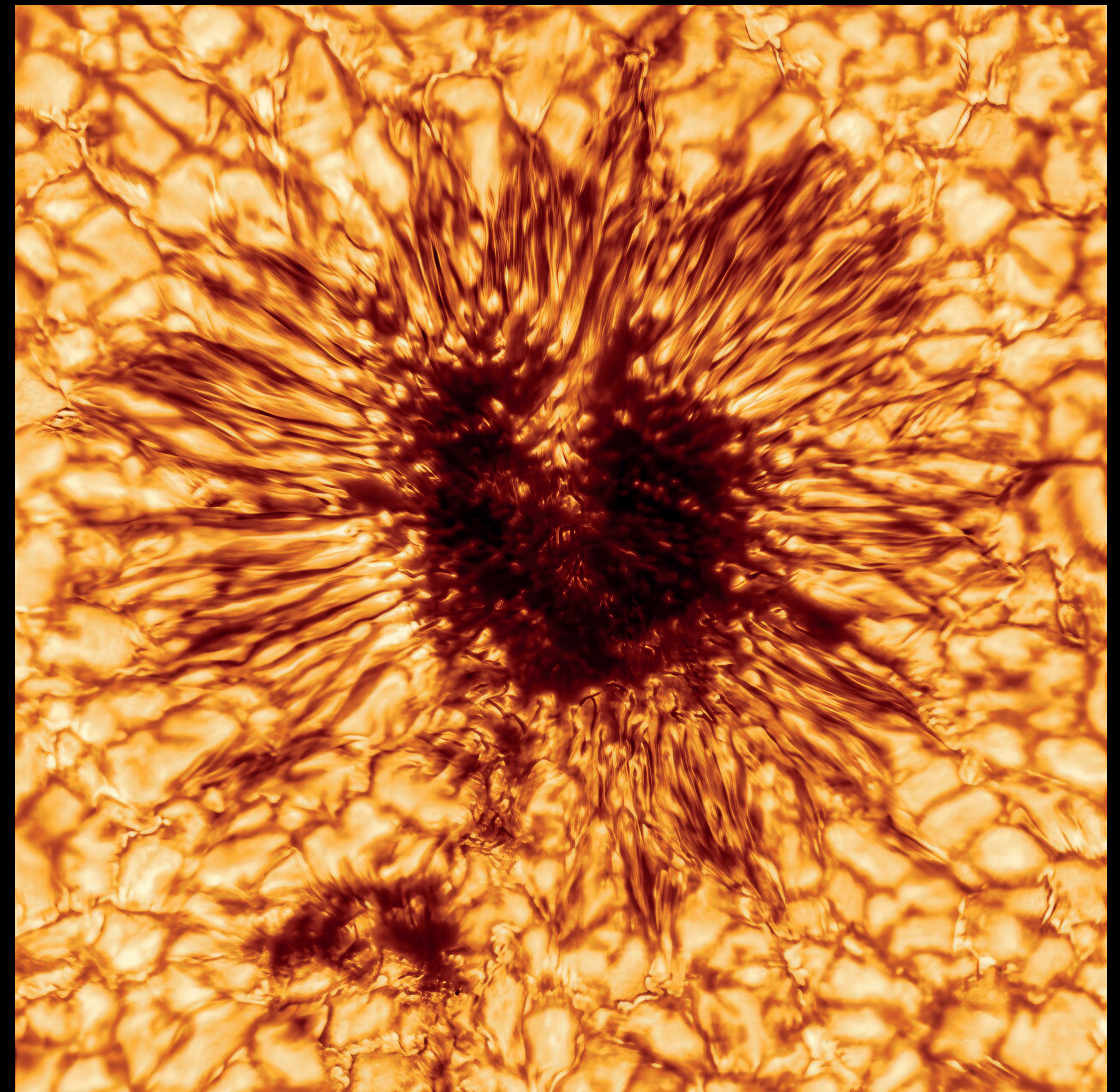
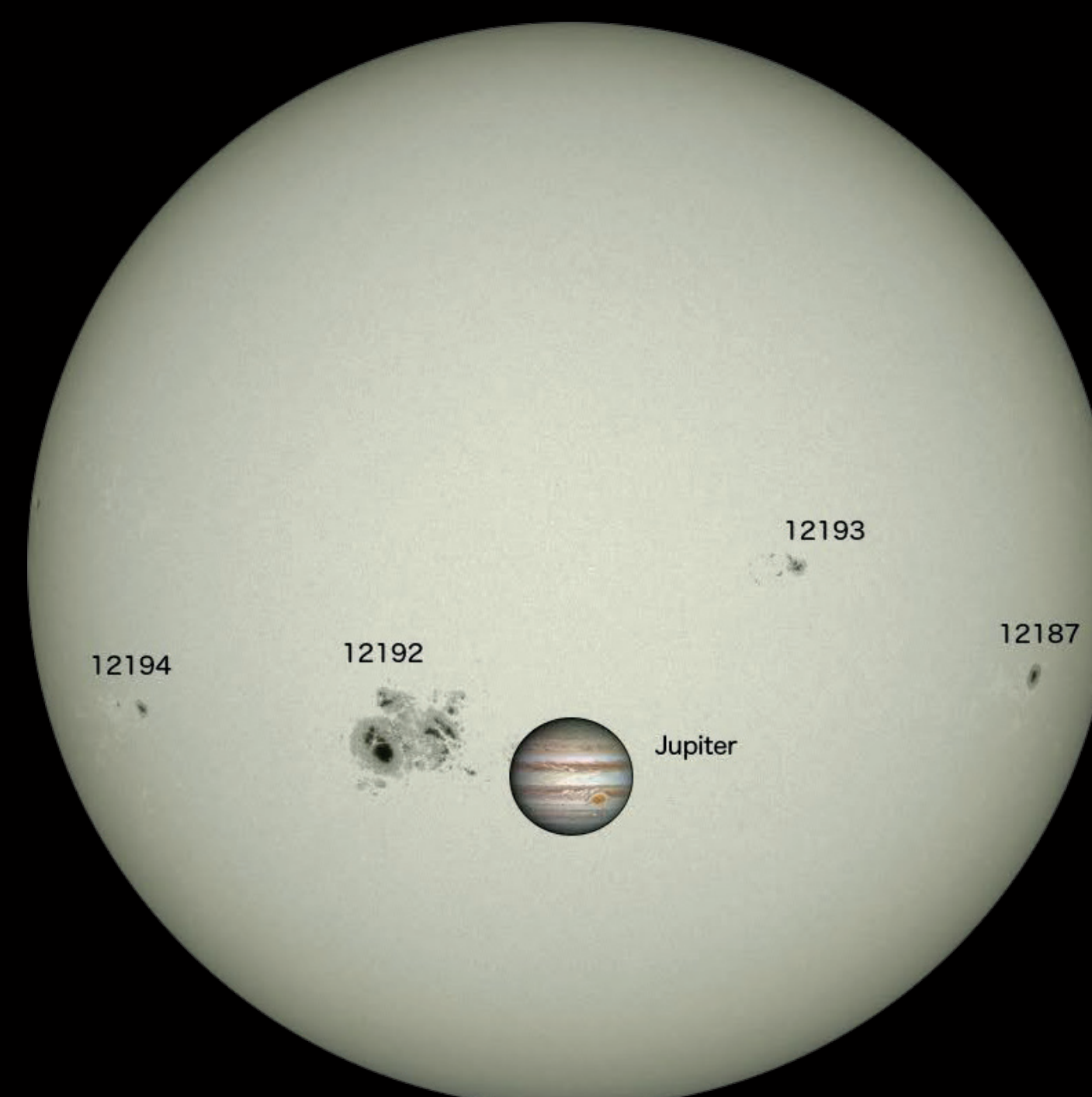
Leur taille est très variable : les plus petites (les pores) mesurent quelques centaines de kilomètres, tandis que les grandes taches peuvent dépasser 50 000 km de diamètre (soit plusieurs fois la taille de la Terre). Leur durée de vie varie de quelques jours pour les petites à plusieurs semaines, voire quelques mois pour les plus grandes. Les taches solaires apparaissent généralement par deux, chacune d'une polarité magnétique opposée.



©The Elisha Whittelsey Collection, 1951 by exchange

Les premières observations à l'œil nu remontent à l'Antiquité chinoise, vers le IV<sup>e</sup> siècle avant notre ère. En Europe, c'est Galilée et ses contemporains qui, en 1610-1611, les étudièrent grâce à la lunette astronomique. Elles sont comptées et caractérisées de façon quotidienne depuis le début du 19<sup>e</sup> siècle.

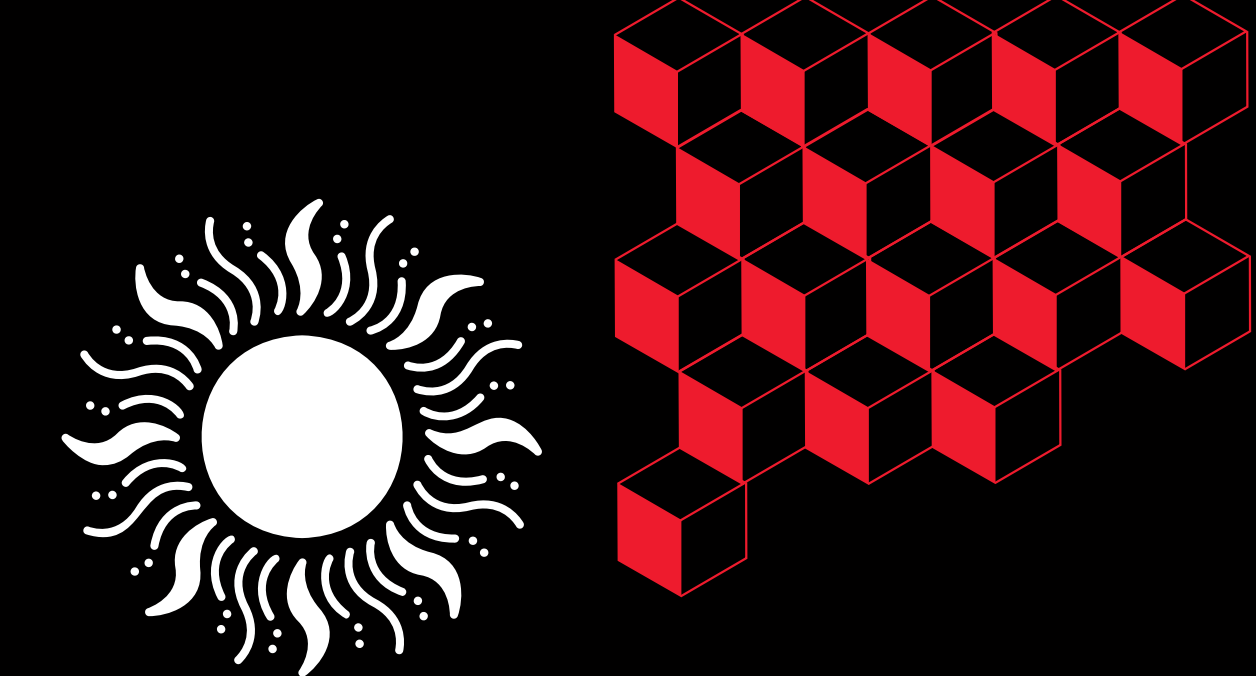
*Les taches solaires apparaissent en groupe à la photosphère, et sont généralement réparties autour de l'équateur. On leur donne un numéro à chaque fois qu'on les observe aux bords de la surface visible du Soleil. Jupiter est placé ici pour donner un ordre de grandeur de ces tâches.*



Ceci est une image d'une tache solaire prise par l'instrument WFC du télescope solaire Inouye de la NSF. L'image, capturée le 28 janvier 2020, est prise à la longueur d'onde de 530 nanomètres (dans la partie jaune-vertâtre du spectre visible).  
NSO-DKIST : © NSF/AURA/NSO

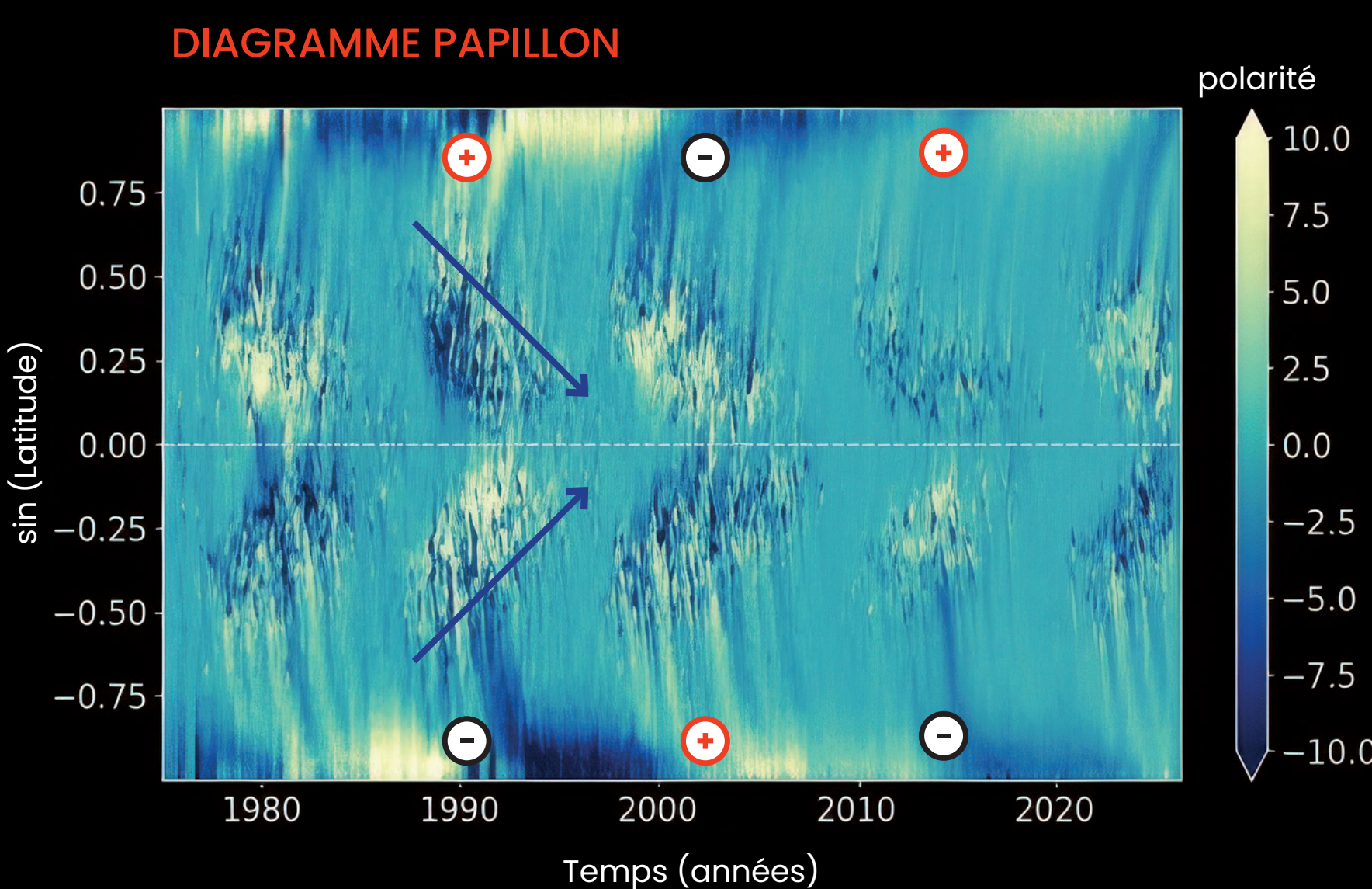
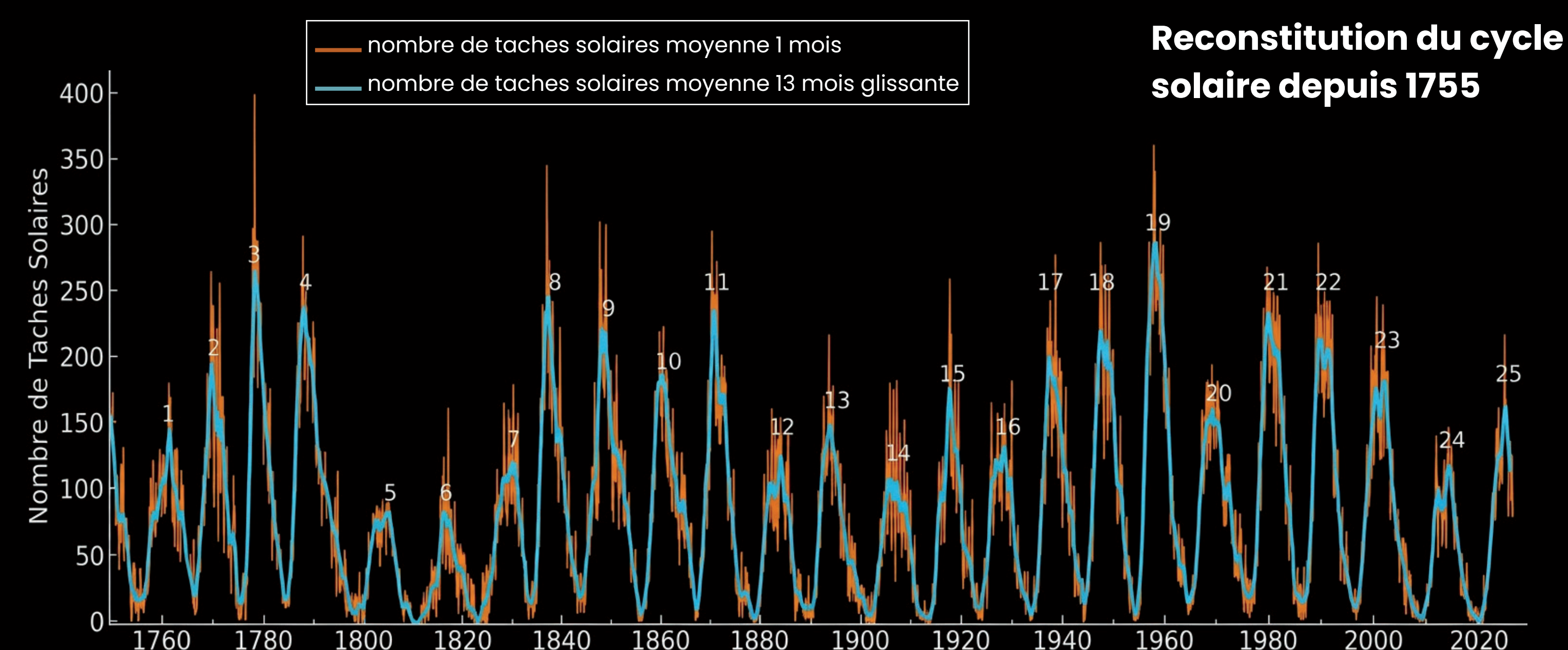
# LE CYCLE SOLAIRE :

## une valse magnétique de 11 ans



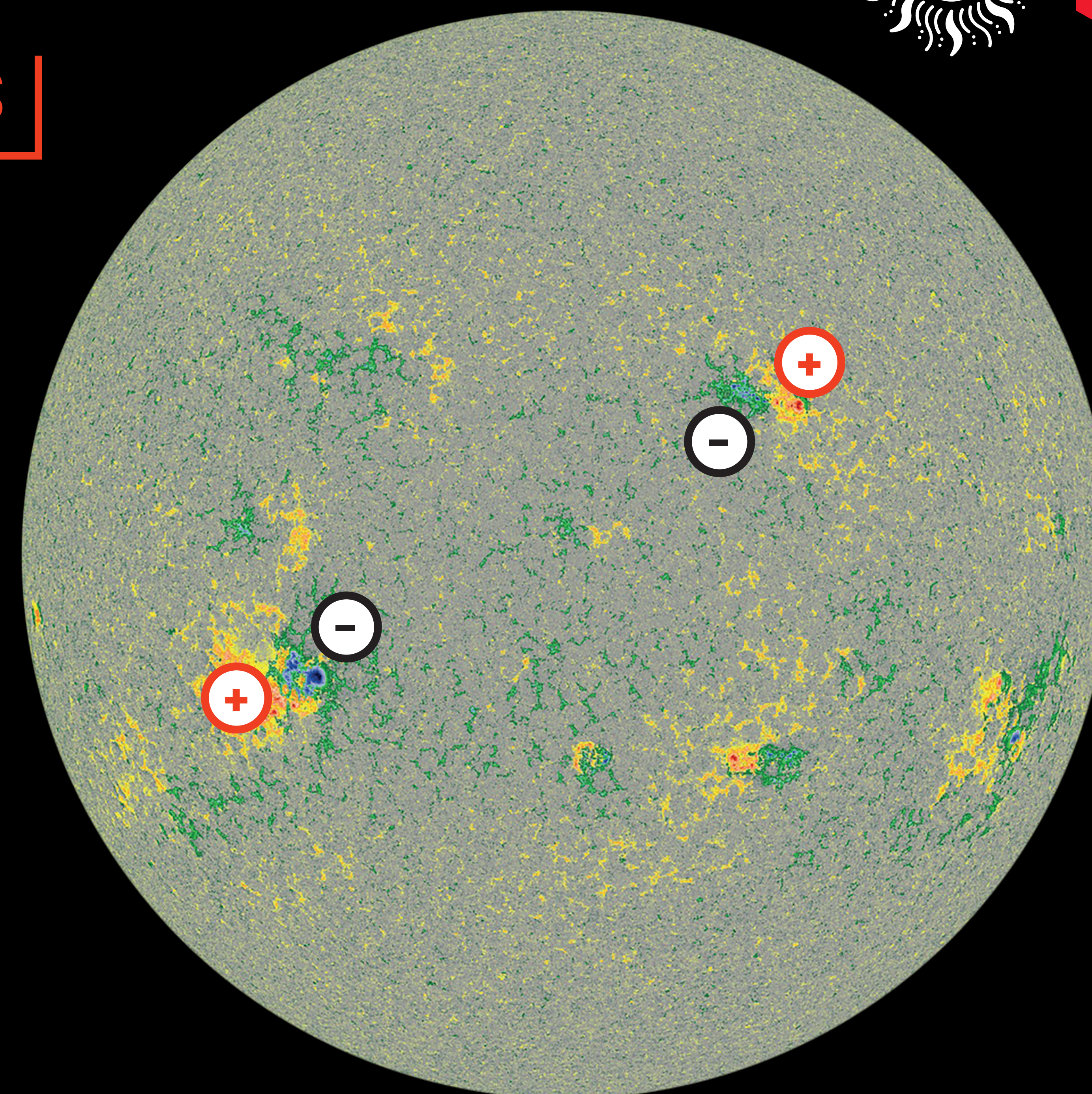
### UN BALLET MAGNÉTIQUE

Un cycle de 11 ans : L'activité du Soleil varie régulièrement, avec des pics et des creux d'apparition des taches solaires. Découvert au 17<sup>e</sup> siècle : Les premières observations des taches solaires en Europe ont permis de reconstituer 270 ans d'activité solaire. Aujourd'hui, nous sommes dans le cycle n°25.



Le diagramme dit papillon montre que l'apparition des taches solaires migrent vers l'équateur au cours du cycle.

On note que le signe des pôles magnétiques est opposé d'un hémisphère à l'autre.



**Le Soleil est un électro-aimant géant** couvert d'une multitude d'aimants +/– ou –/+ sur sa surface et ce d'autant plus que l'on est proche du maximum du cycle solaire.

Grâce à un effet physique appelé l'effet Zeeman, les scientifiques réalisent des magnétogrammes : des cartes qui révèlent l'intensité et la polarité de son champ magnétique.

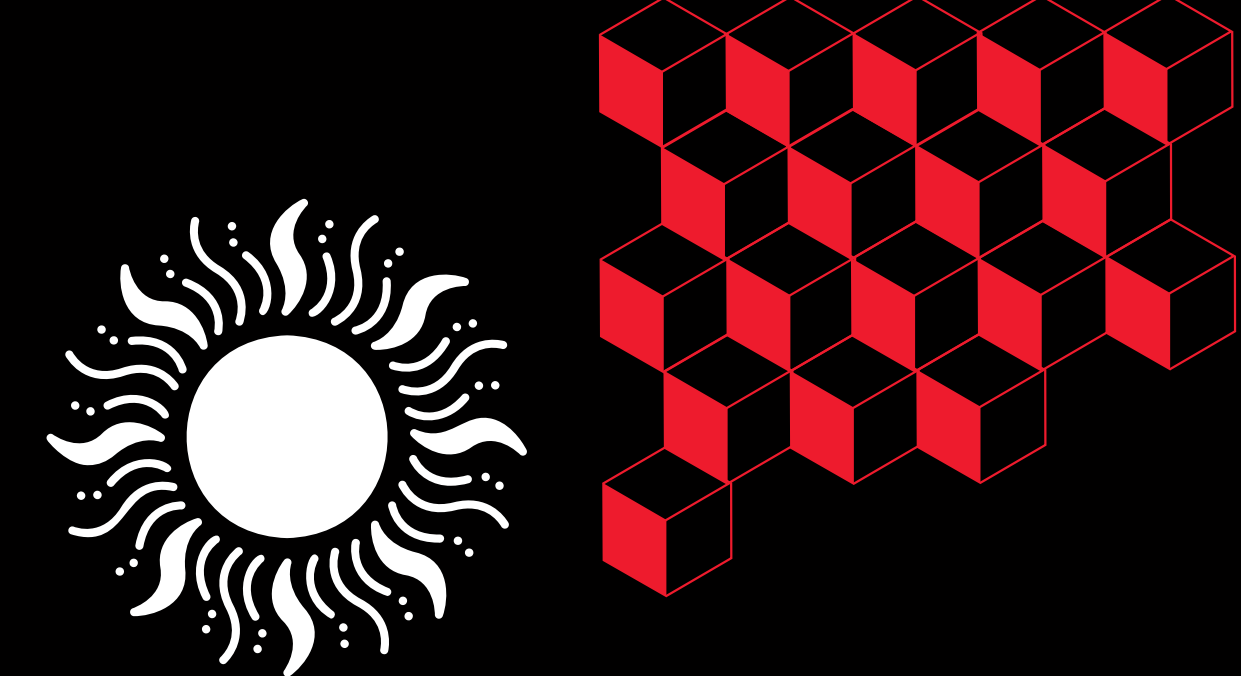
Sur ces cartes, les zones jaunes (polarité positive) et vertes (polarité négative) représentent les pôles nord et sud d'aimants localisés proportionnés à l'échelle du Soleil !

C'est à partir de ces magnétogrammes de toute la surface du Soleil enregistrés quotidiennement dans les observatoires solaires, que l'on forme le diagramme papillon sur une durée de plus de 50 ans.

crédit image : NASA/HDO-HMI

# LA DYNAMO SOLAIRE :

## le Soleil comme un aimant géant



Le champ magnétique du Soleil naît d'un mécanisme de **dynamo fluide** :

Les mouvements du plasma (un gaz chaud et ionisé, donc conducteur d'électricité) génèrent des courants électriques, qui produisent à leur tour le champ magnétique solaire.

Ce courant global est alternatif, mais avec une fréquence extrêmement lente : 2,88 nHz (contre 50 Hz pour le courant de nos prises électriques !).

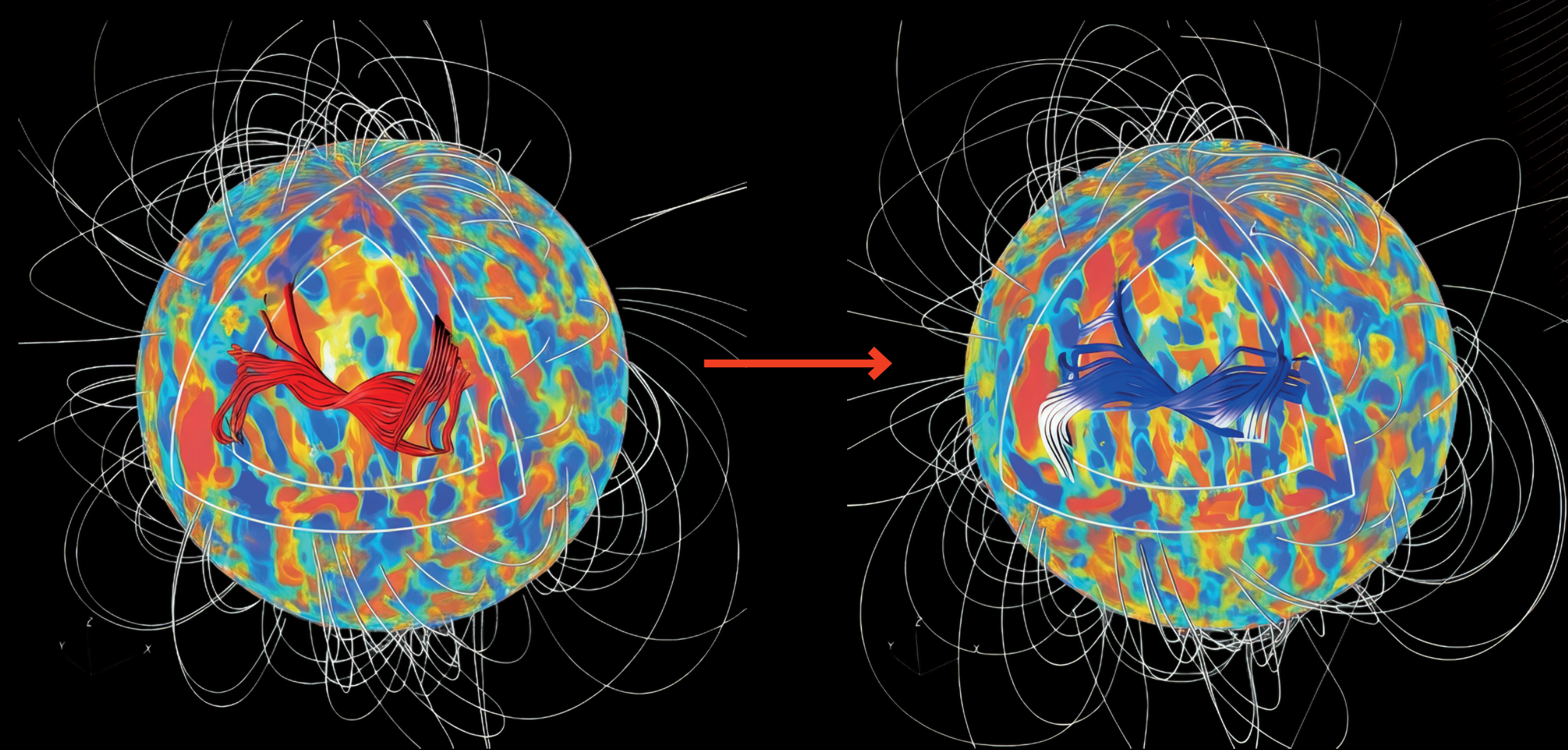
**Un cycle magnétique complexe :**

Le champ magnétique oscille et s'inverse : les pôles Nord et Sud échangent leur polarité (+/-).

Un renversement complet prend 1 à 2 ans, mais les deux pôles ne basculent pas toujours simultanément. Par exemple, le pôle Sud a atteint son maximum en octobre 2024, soit 18 mois après le pôle Nord (avril 2023).

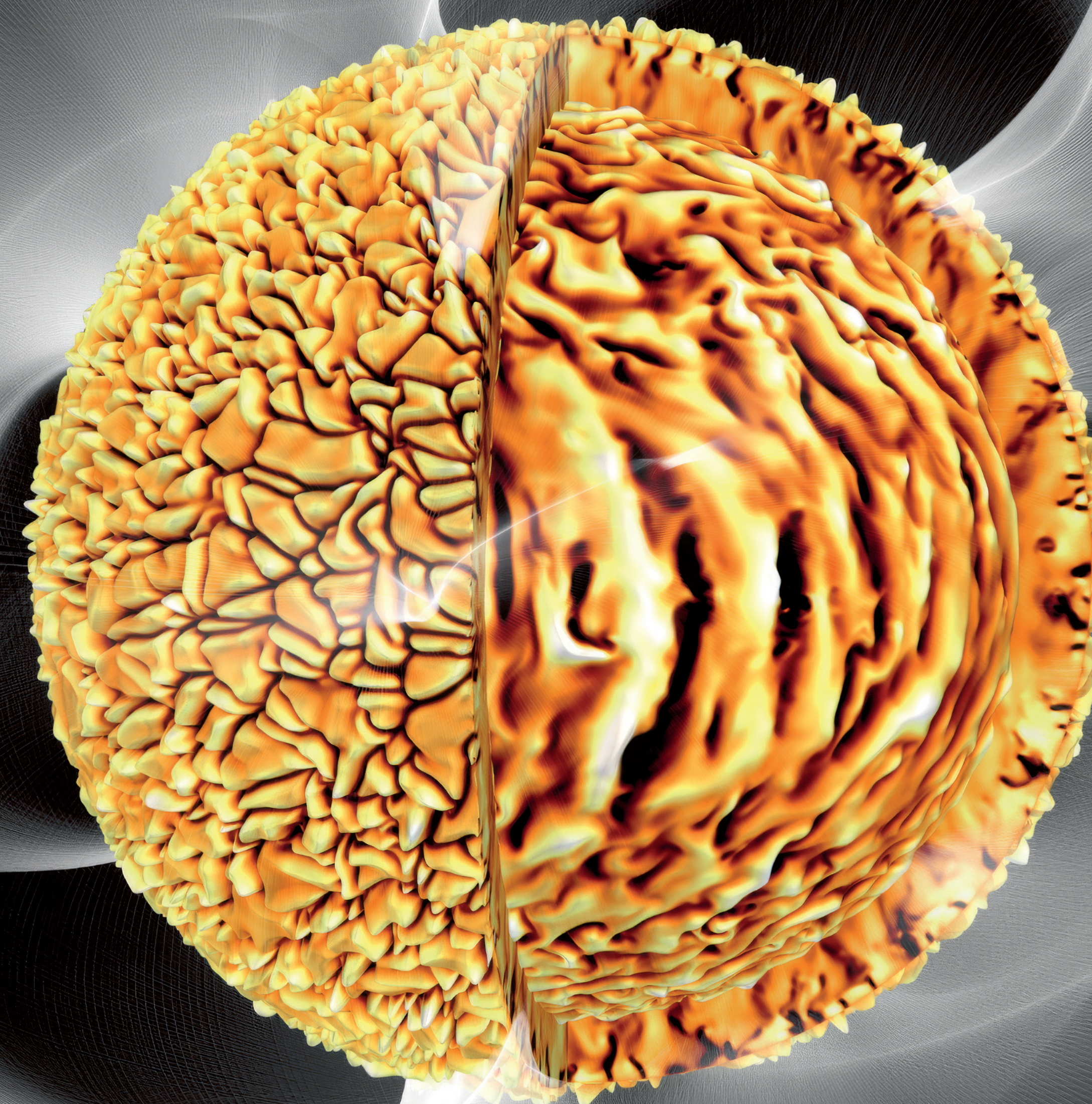
Au CEA, les astrophysiciens modélisent cette dynamo en 3D grâce à des super calculateurs du TGCC, pour mieux comprendre ses mécanismes.

Ils développent aussi de nouveaux modèles complets du Soleil comprenant toutes ses structures internes jusqu'à ses couches d'atmosphère avec le code de dernière génération DYABLO-Whole Sun.



Représentation d'un renversement du champ magnétique dans une dynamo solaire 3D. Le ruban magnétique interne passe du rouge au bleu (+ → -).

La flèche indique le changement d'état de polarité, un renversement magnétique.



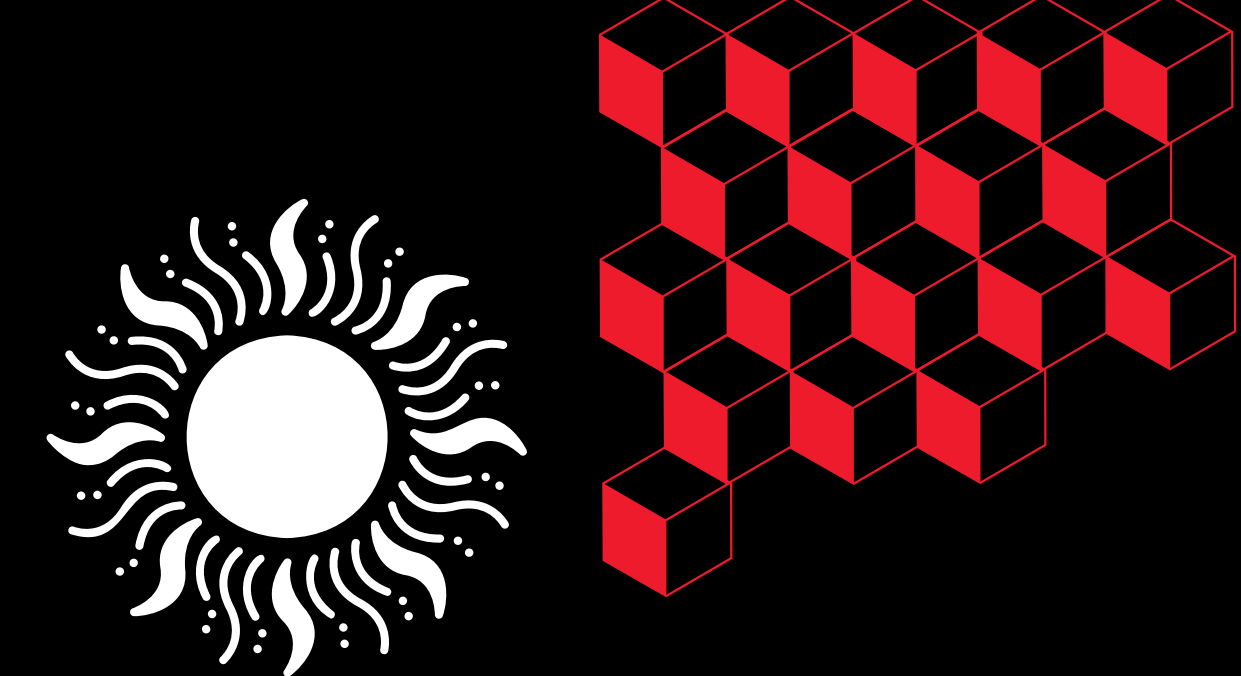
Simulation haute résolution (10 milliards de mailles) de la dynamo solaire. On voit le champ magnétique généré par effet dynamo fluide avec les lignes blanches et la convection de surface (à gauche) et en profondeur (coupe à droite).

En jaune ce qui est chaud et monte, et en tons foncés ce qui est froid et descend.

### 50 Mh !

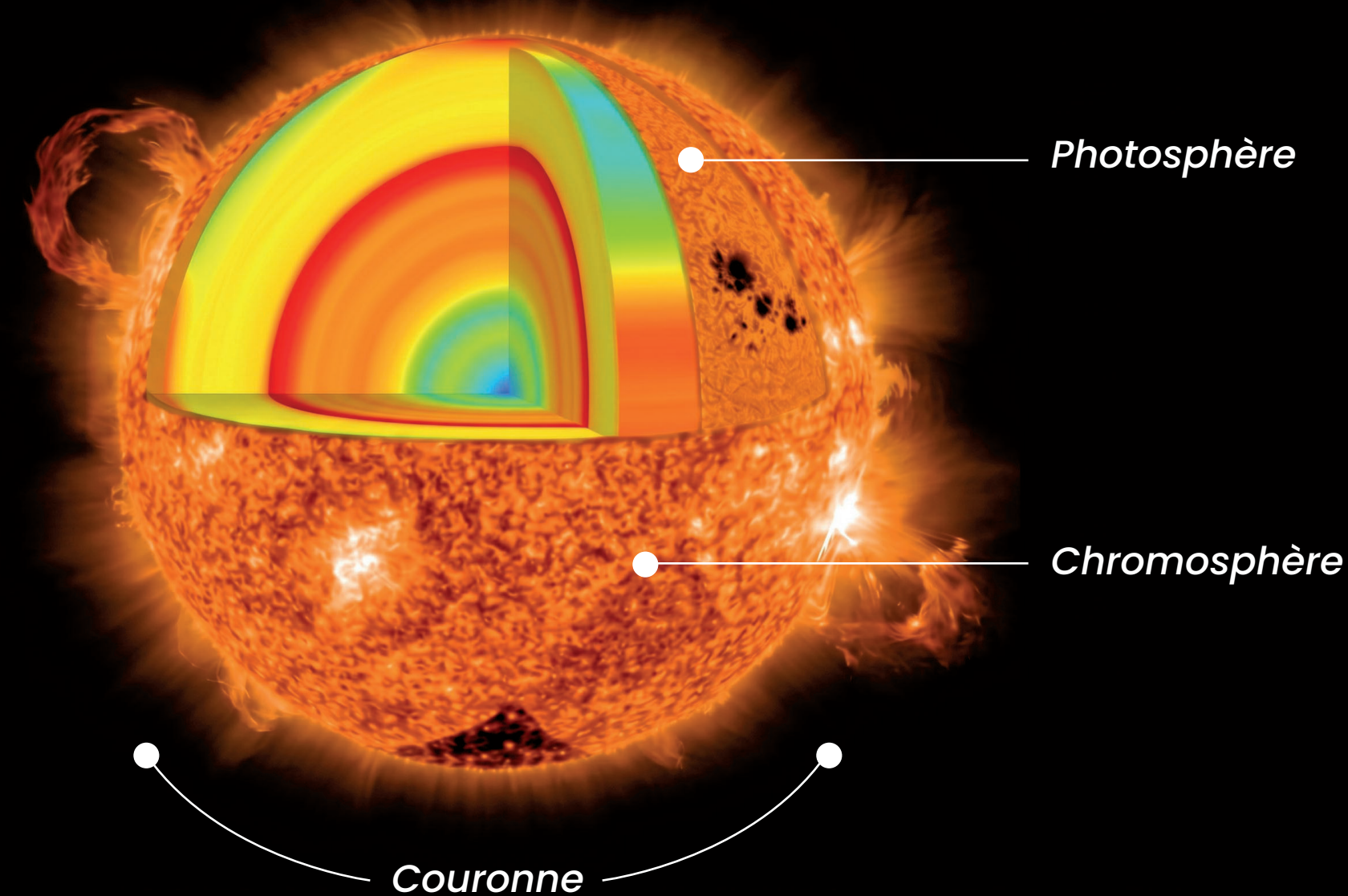
TEMPS DE CALCUL, SOIT ~ 6000 MICROPROCESSEURS PENDANT 1 AN EN CONTINU.

# LA CHROMOSPHERE : une atmosphère rougeoyante



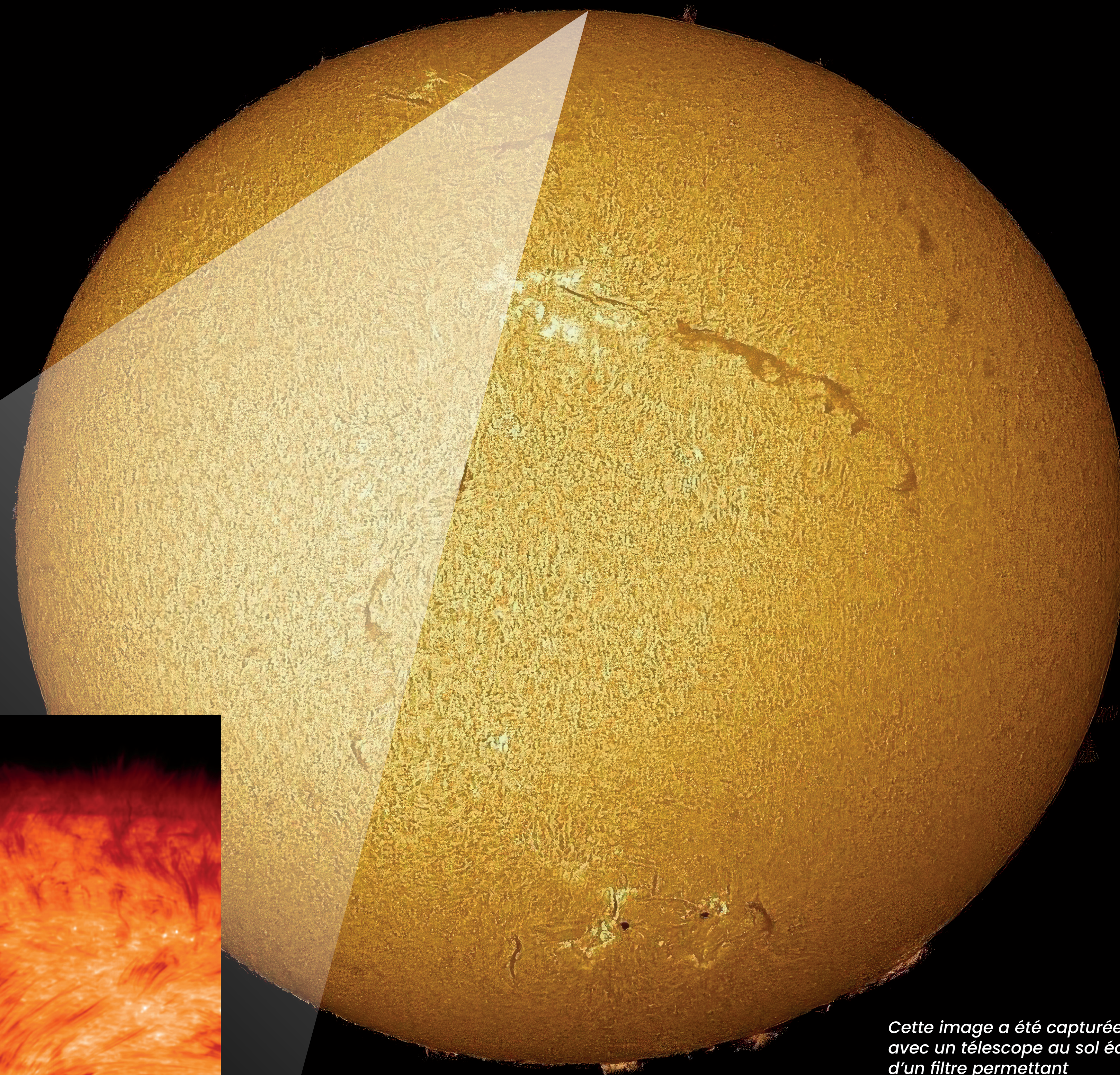
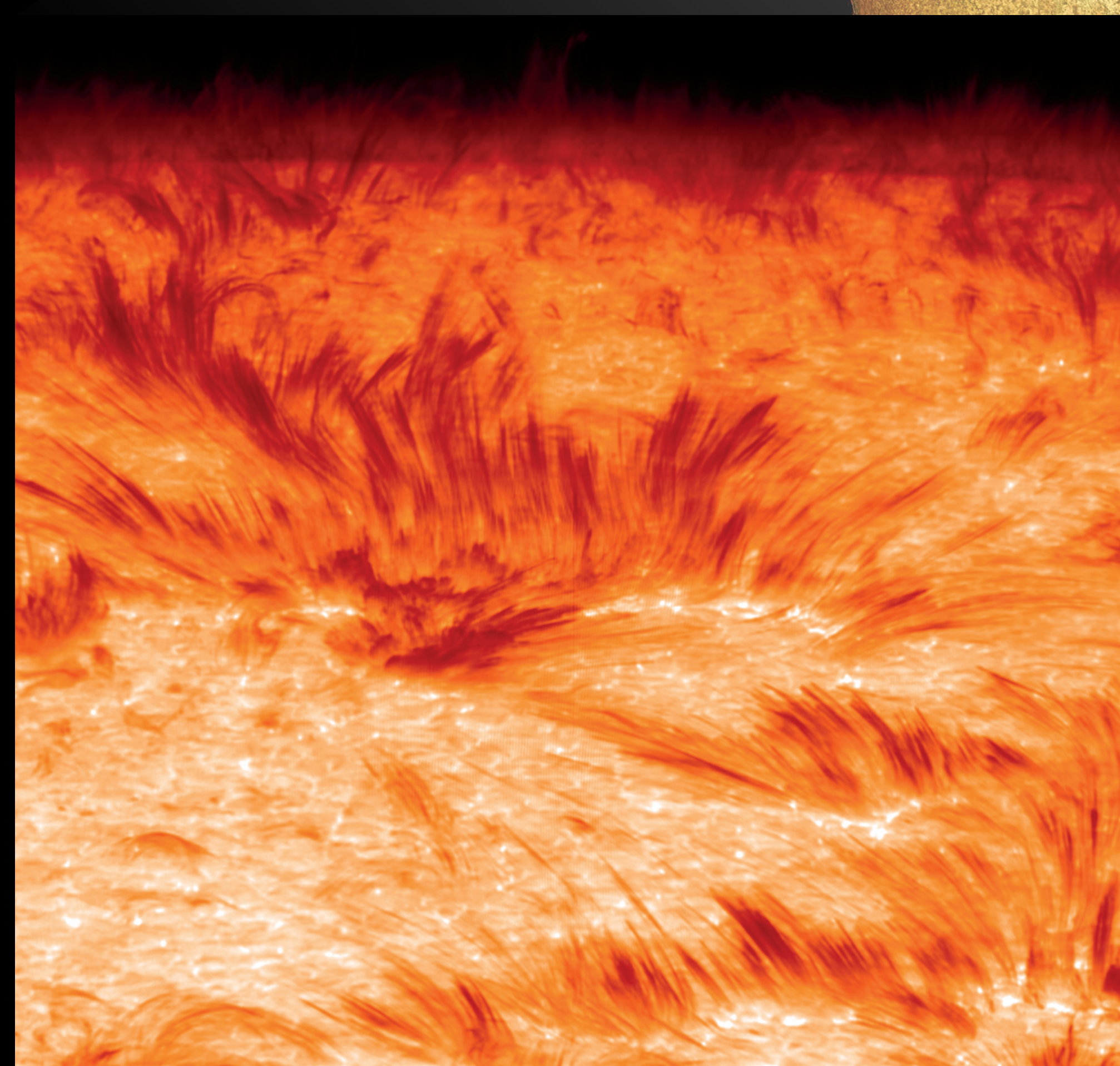
La **chromosphère** est la couche de l'atmosphère du Soleil juste au-dessus de la photosphère, la surface visible du Soleil. C'est une région dynamique qui s'étend jusqu'à environ **3 000 km au dessus de la photosphère** (environ 0,5% du rayon solaire).

La chromosphère est parcourue par des **spicules** : de fins jets de plasma. Chaque spicule a un diamètre d'environ 300 km, une durée de vie d'une quinzaine de minutes, et peut atteindre des vitesses de 400 000 km/h. À tout moment, près de 3 millions de spicules sont actifs dans la chromosphère. Ces structures se déplacent de la chromosphère vers la couronne solaire (de l'intérieur vers l'extérieur), en suivant les lignes du champ magnétique du Soleil.



Cette image, obtenue avec l'instrument SOUP au Télescope Solaire Suédois (SST) de 1 mètre à La Palma (Espagne), montre des spicules près du limbe solaire. Le limbe est le bord apparent du disque solaire, visible depuis la Terre.

© SDP/NASA/AIA

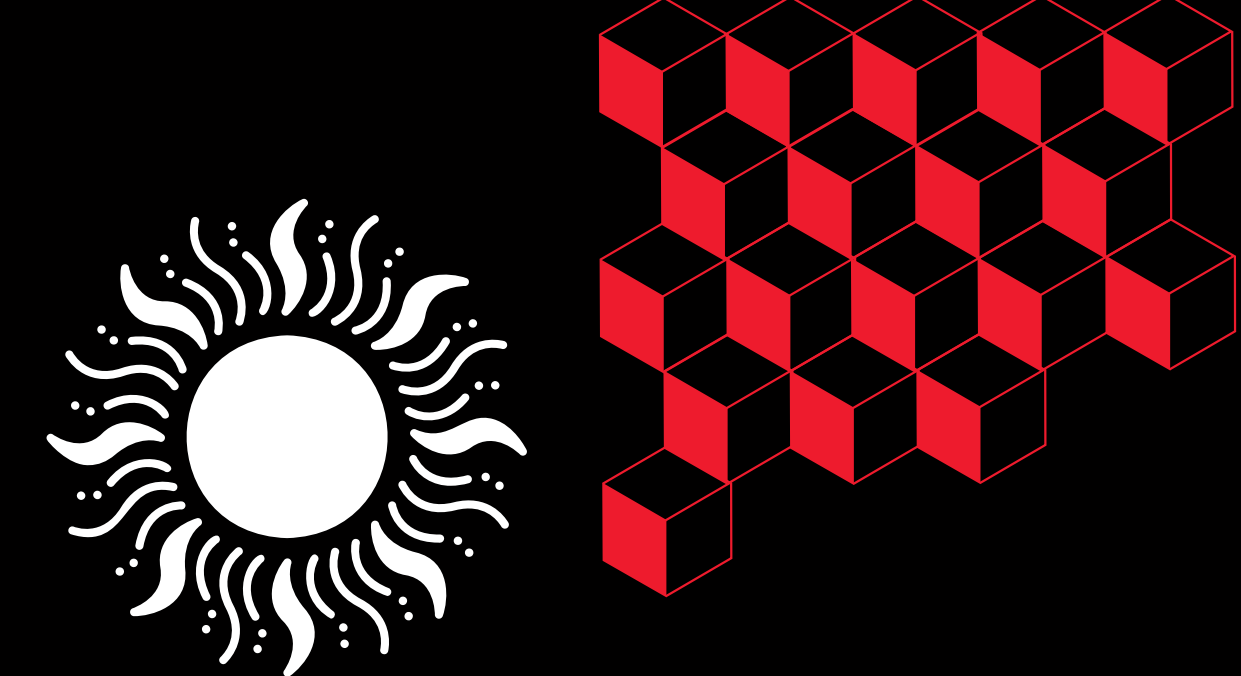


Cette image a été capturée avec un télescope au sol équipé d'un filtre permettant d'observer les jets de gaz chauds, comme les spicules.

## 3000 km

C'EST L'ÉPAISSEUR DE LA CHROMOSPHERE, SOIT ENVIRON 0,5% DU RAYON DU SOLEIL.

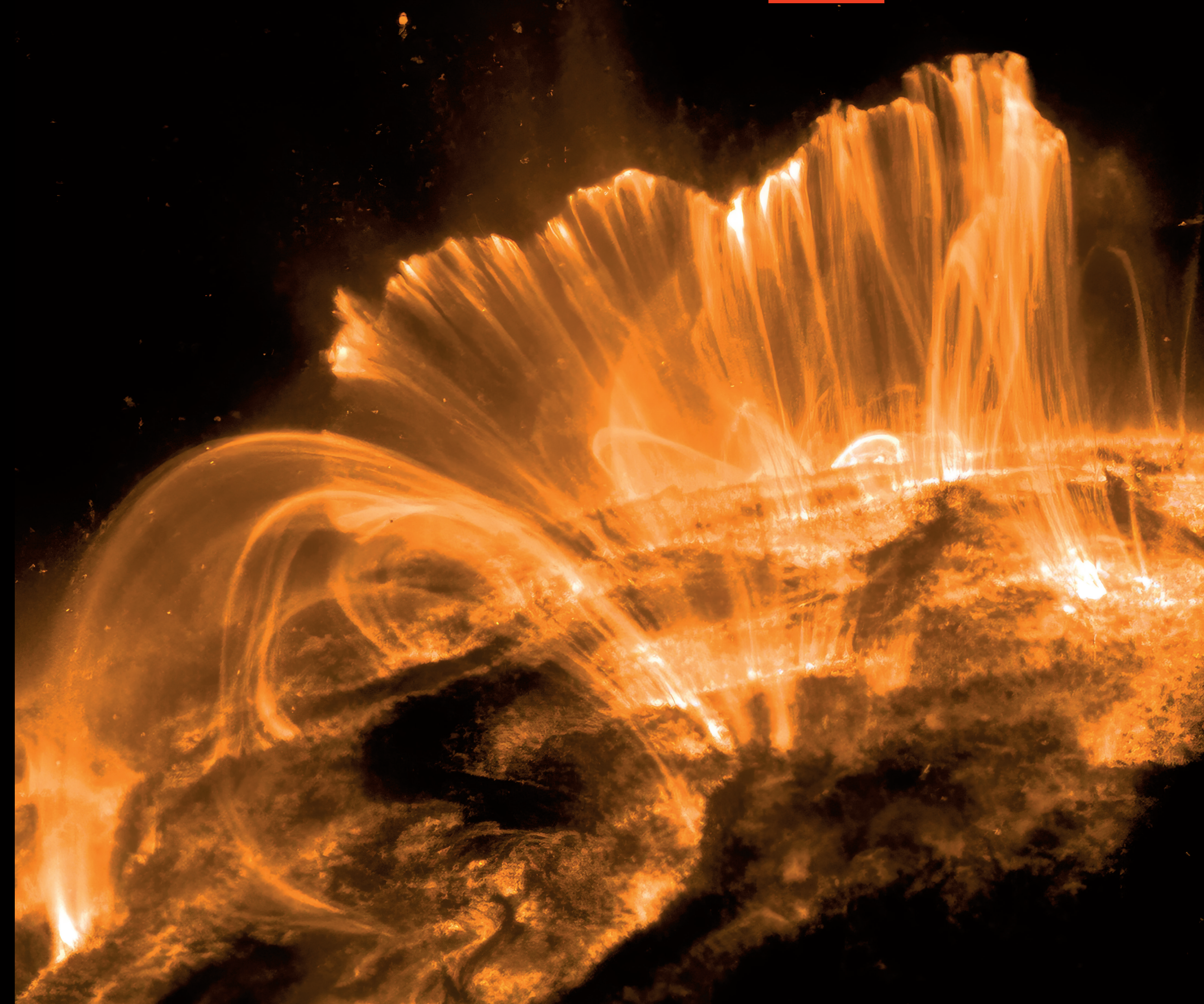
# LES ÉRUPTIONS SOLAIRES : des explosions d'une puissance inouïe



Les éruptions solaires appelées **flares** ('embrillancement') sont des flashes lumineux qui ont lieu dans la couronne du soleil. Phénomènes très impulsifs, il se déclenchent en quelques secondes à quelques minutes et peuvent durer quelques heures.

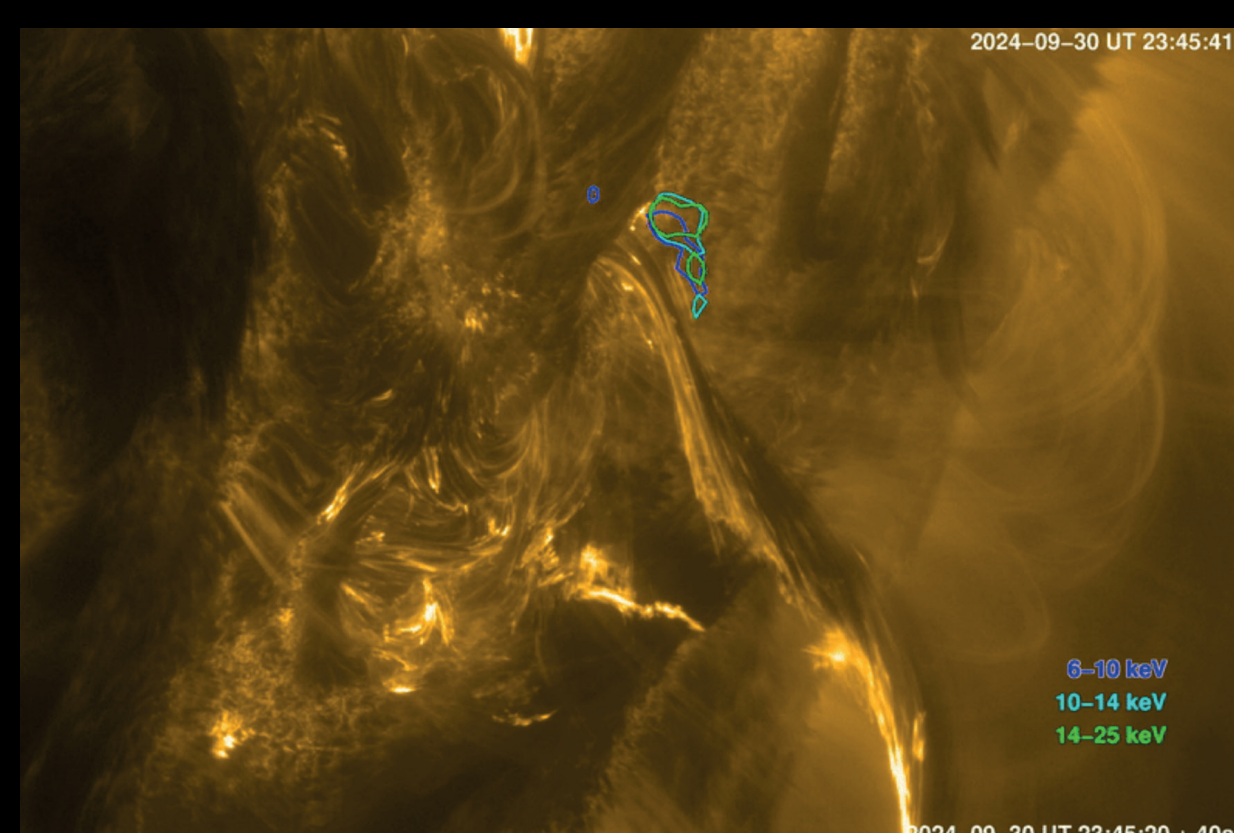
Les flares ont lieu en général dans les régions de fortes concentration de champ magnétique, particulièrement au dessus des taches solaires. Elles sont le résultat de phénomènes de **reconnexion magnétique**, libérant de l'énergie magnétique sous forme d'accélération de particules et de chaleur.

Les flares montrent une distribution d'évènements couvrant plus de 10 ordres de grandeur en énergie ! Ils sont visibles dans de nombreuses longueurs d'onde (visible, rayons X, UV, radio) et sont à l'origine de l'accélération de particules très énergétiques dirigées vers le Soleil et vers le reste de l'héliosphère.

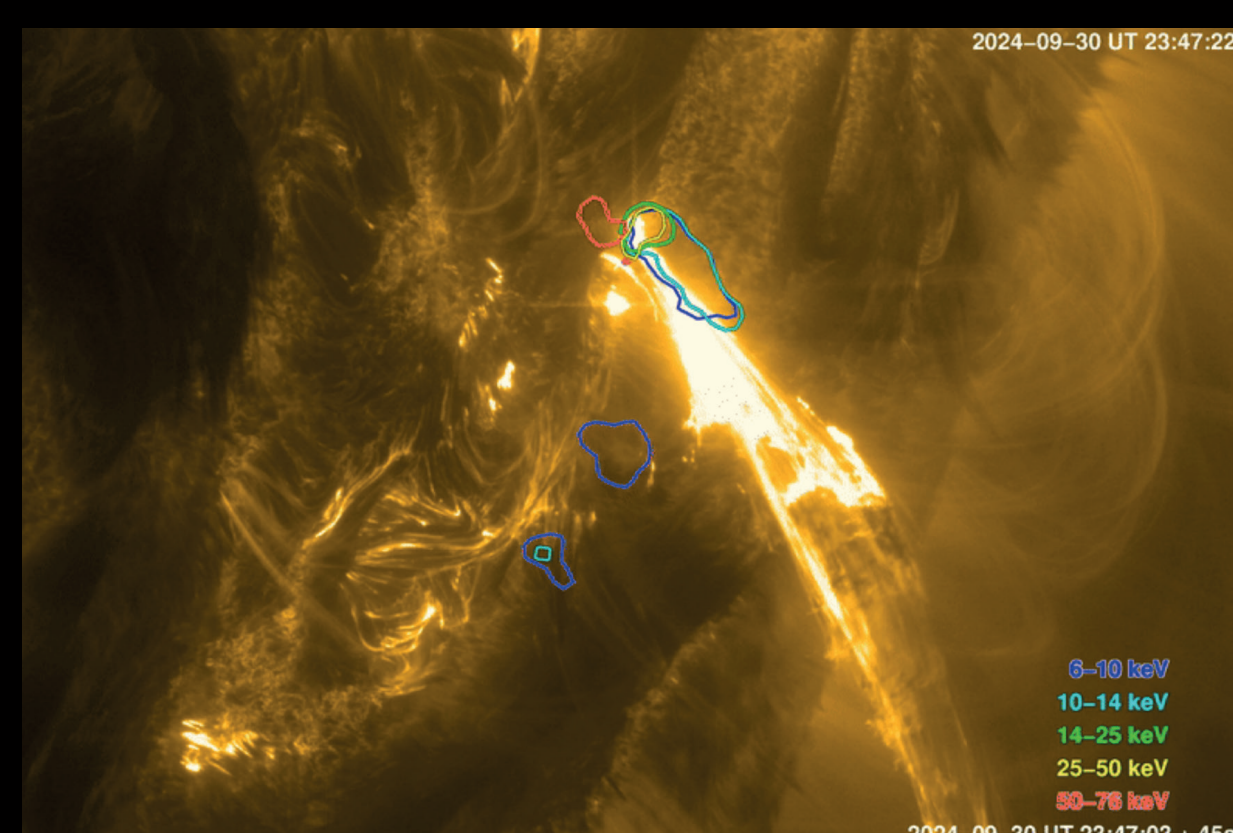


## EXEMPLES DE BOUCLES D'ÉRUPTIONS SOLAIRE

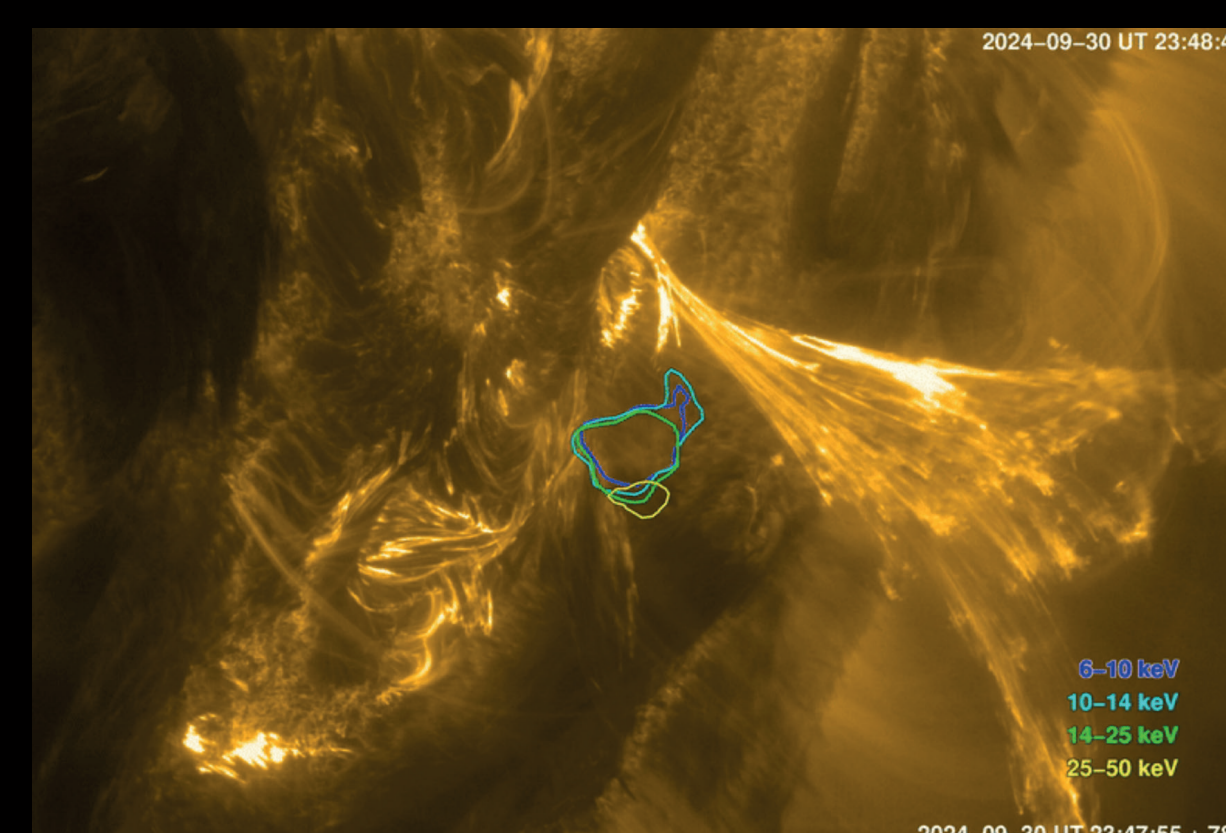
observées par l'imageur EUV  
à bord du satellite TRACE  
lors de l'éruption du 11/09/2000  
avec les boucles vues de côté.



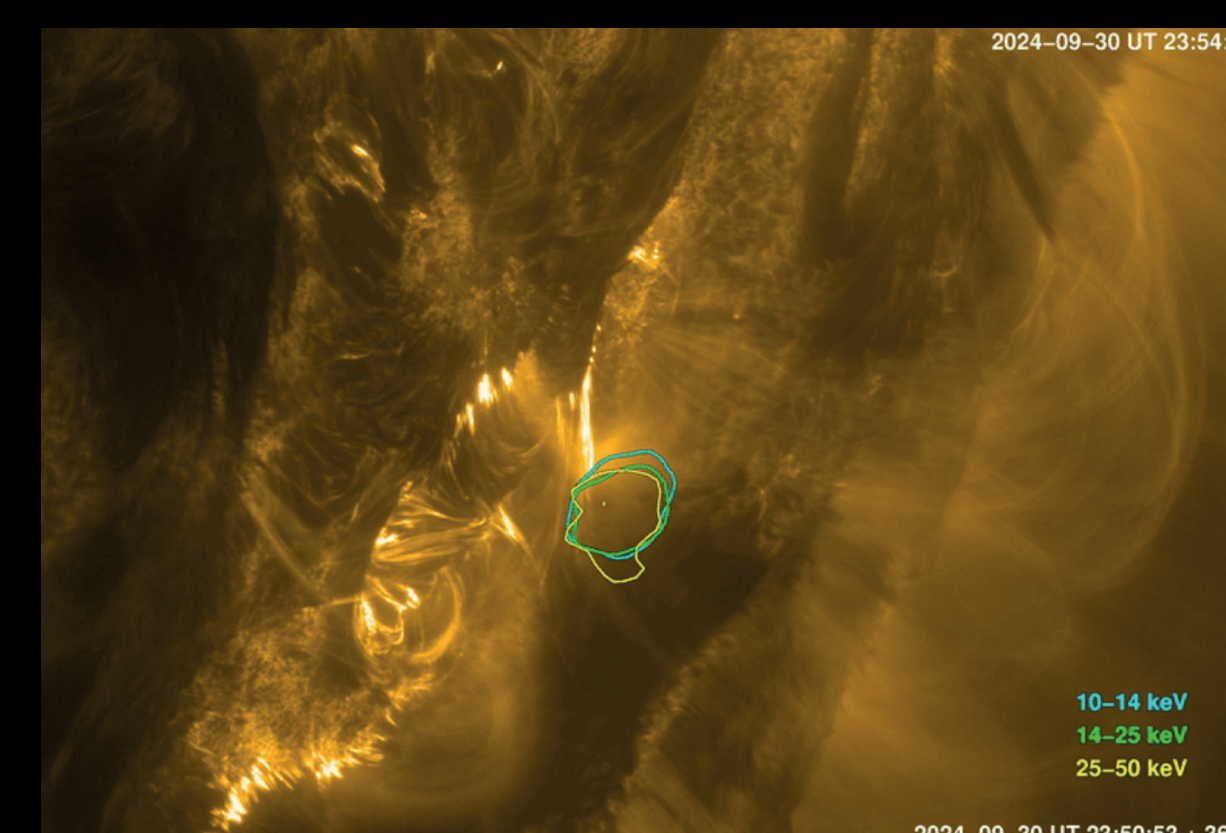
23H45



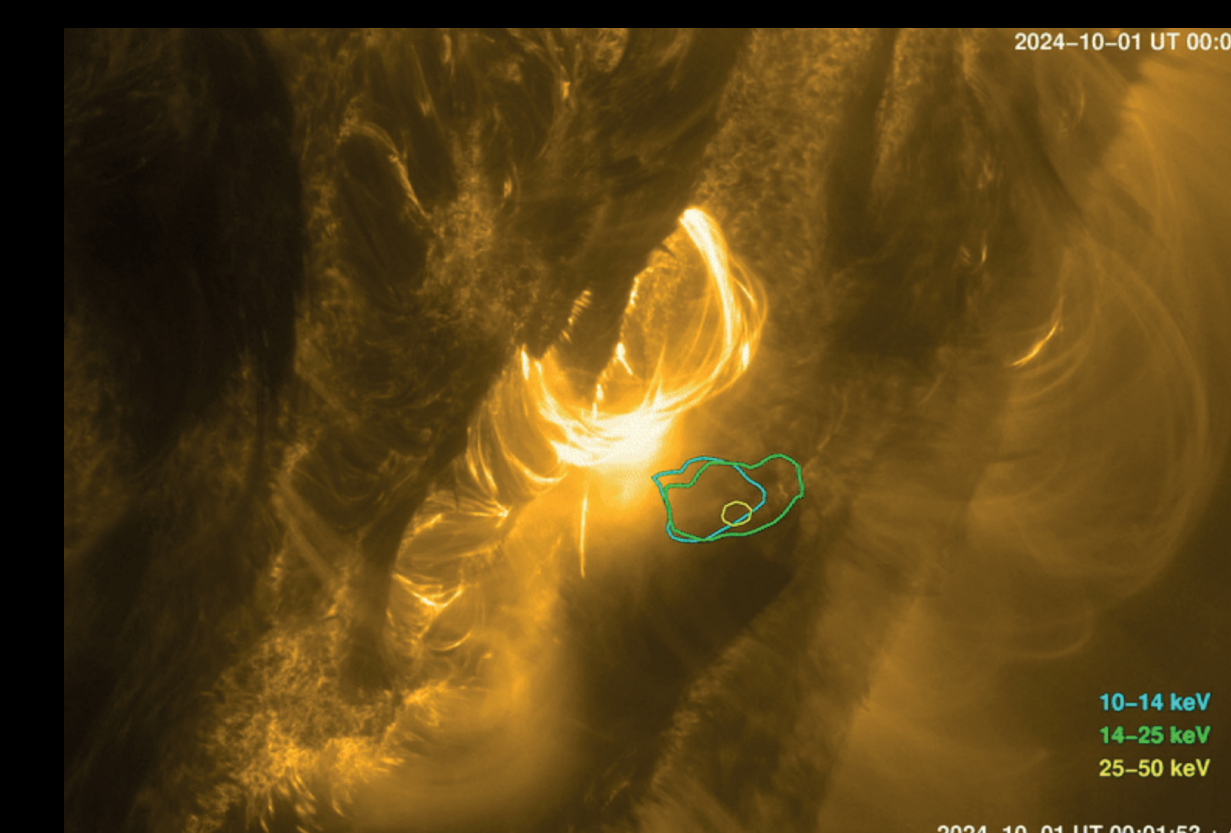
23H47



23H48



23H54



01H50

Evolution de l'émission de rayons X lors de l'éruption solaire enregistrée le 30 septembre 2024 par le satellite spatial Solar Orbiter de l'ESA. Les contours colorés délimitent les régions sources de rayons X détectées par le spectromètre STIX à différentes énergies. Ils sont superposés à des images prises en ultraviolet par l'instrument EUI. L'image EUI montre le plasma à environ 1 million de degrés, mais STIX sonde des régions bien plus chaudes, ce qui explique pourquoi certains contours ne semblent pas correspondre aux structures révélées par les images en UV.

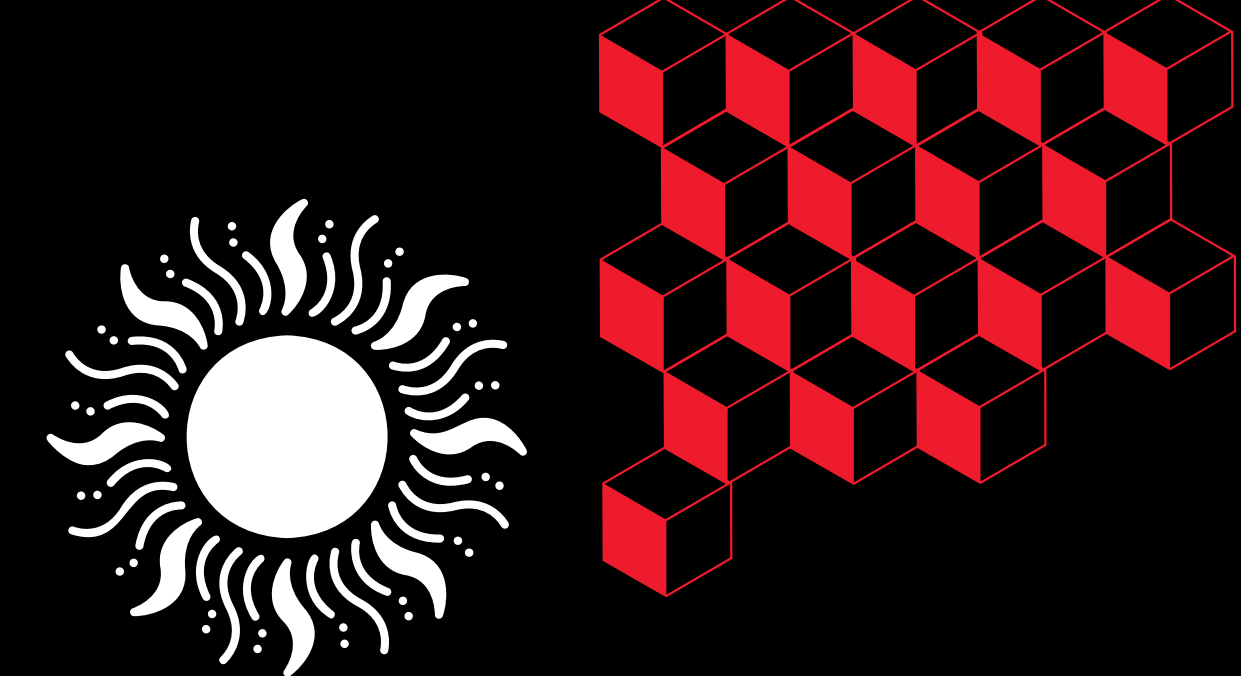
crédit : ESA & NASA/Solar Orbiter/EUI & STIX

cea

## 10<sup>25</sup> W

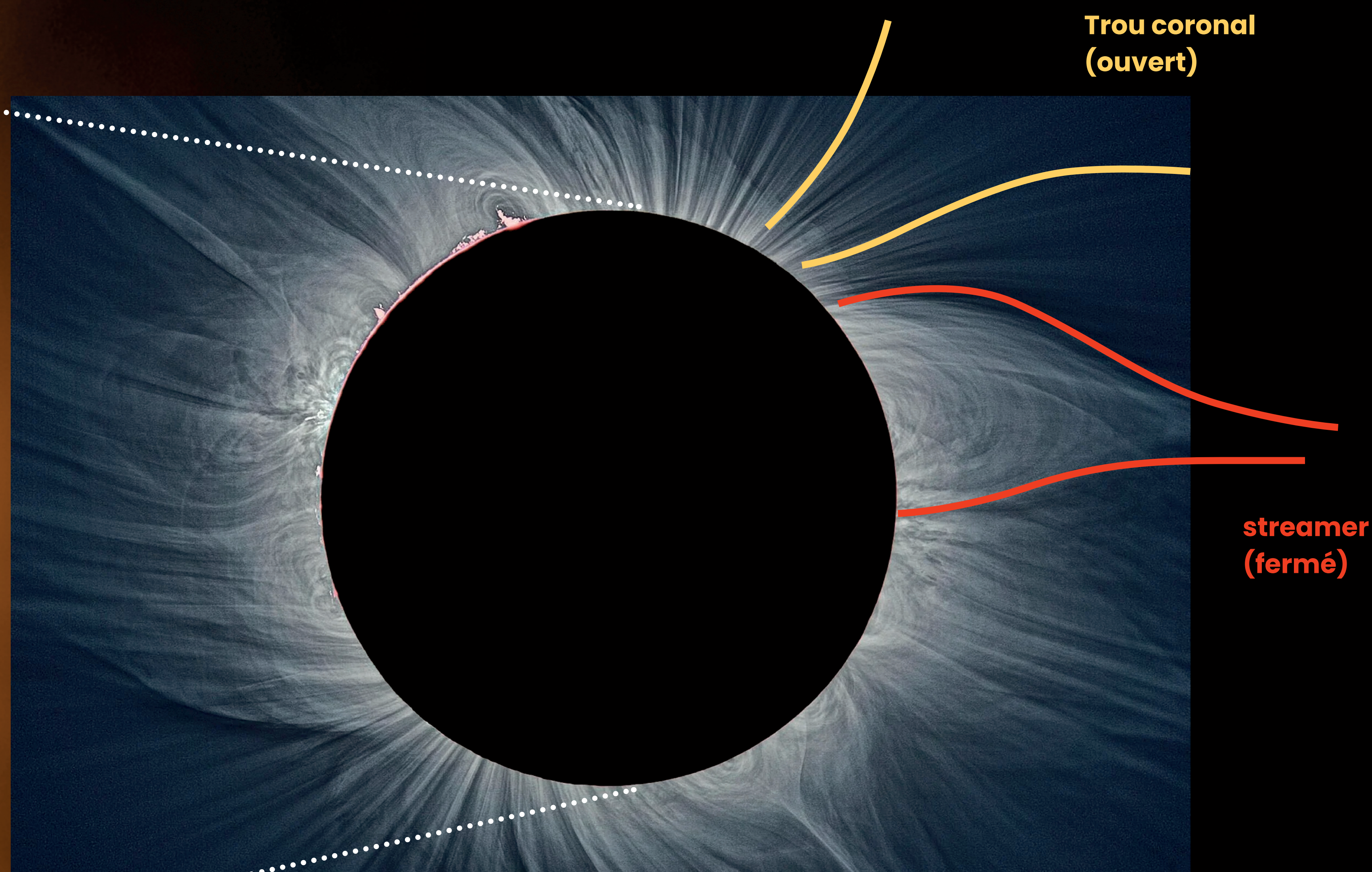
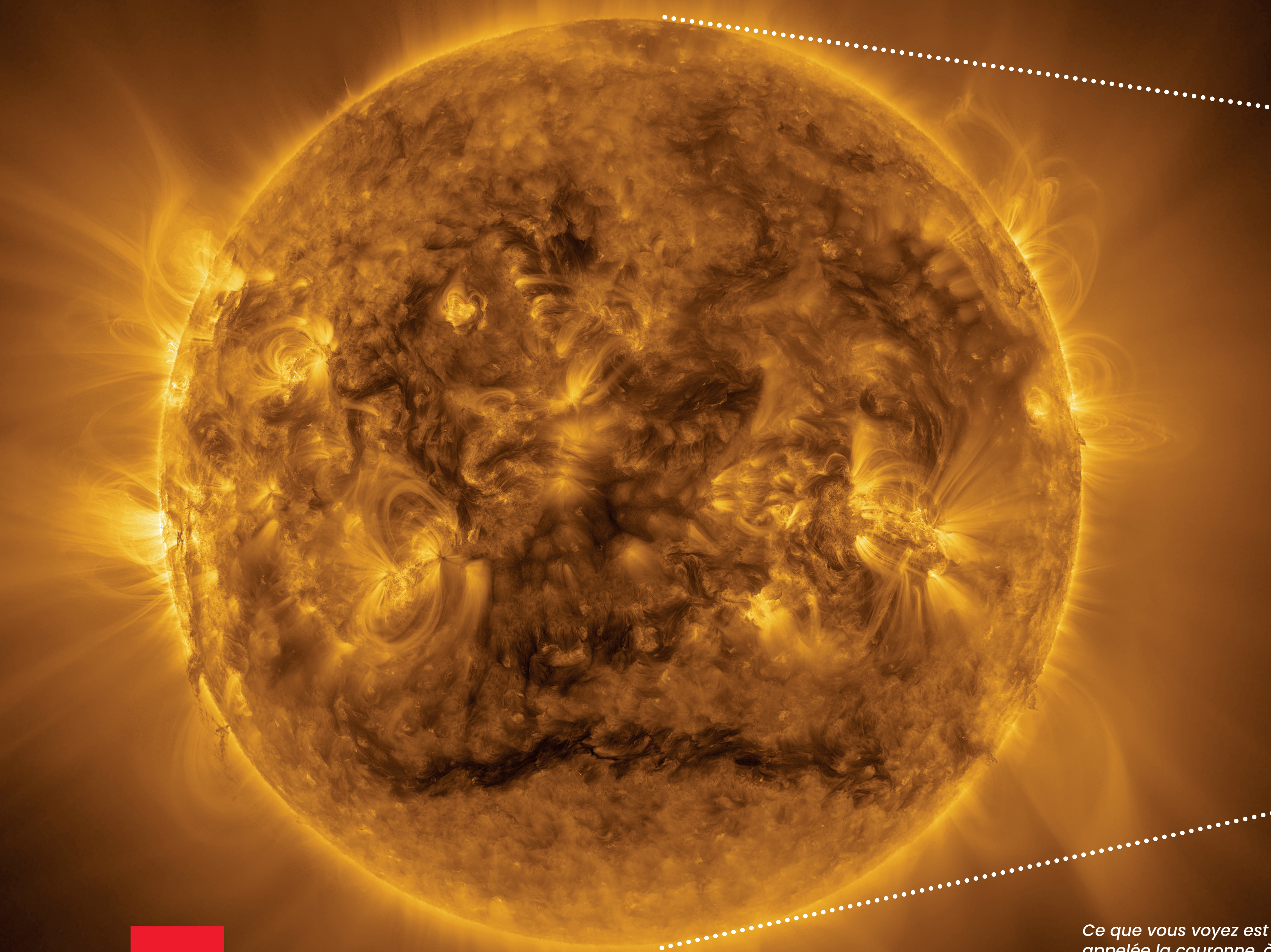
IL FAUDRAIT 320 MILLIONS D'ANNÉES  
DE CONSOMMATION MONDIALE D'ÉNERGIE POUR ÉGALER  
L'ÉNERGIE D'UNE ÉRUPTION D'UNE HEURE.

# LA COURONNE SOLAIRE : un mystère brulant



La **couronne** est l'atmosphère étendue jusqu'à 10 millions de km qui entoure notre Soleil. Elle est très chaude et émet dans les ultraviolets (UV). Les zones brillantes (régions actives) correspondent à un fort champ magnétique. Elle est cependant un million de fois moins brillante que la surface solaire (la photosphère).

La couronne est loin d'être immobile ! Elle danse en fonction des évolutions du champ magnétique et du cycle de 11 ans. Quand le champ magnétique est fermé, on obtient des **streamers**. Quand il est ouvert, on observe des **trous coronaux**. La couronne est révélée lors des éclipses totales ou avec un instrument appelé coronographe (inventé par un Français, Bernard Lyot à l'Observatoire de Paris).



Le coronographe crée une éclipse artificielle en masquant le disque très lumineux du Soleil avec un disque opaque. Cela permet de voir la couronne, normalement invisible à cause de l'éclat du Soleil. © M. Druckmüller

Ce que vous voyez est l'atmosphère du Soleil, appelée la couronne, à plusieurs millions de degrés, telle qu'elle apparaît en lumière ultraviolet.  
Crédit : ESA & NASA/Solar Orbiter/EUI Team, E. Kraaikamp (ROB)

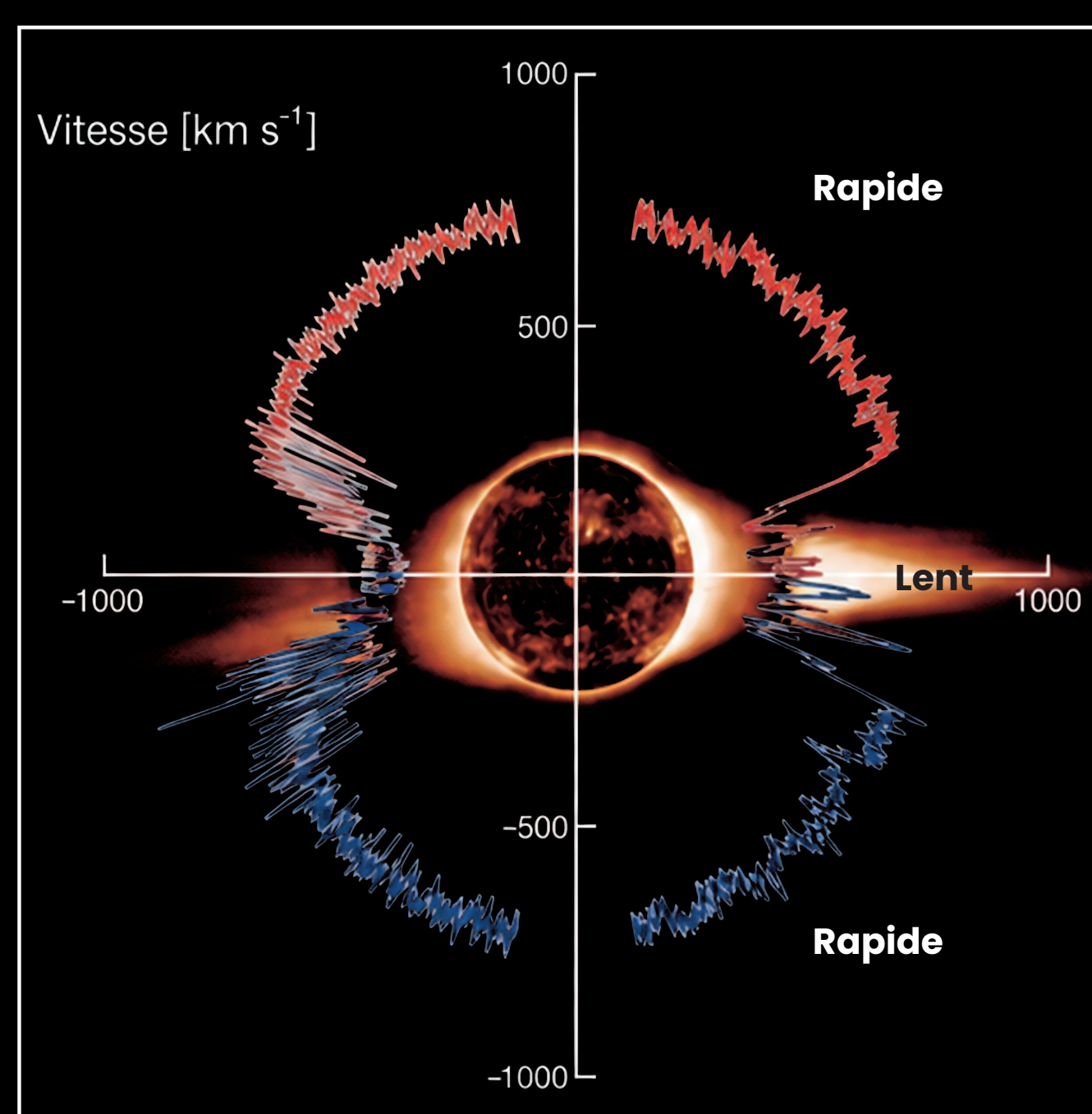
**1,5 million °C**  
C'EST LA TEMPÉRATURE QU'ATTEINT LA COURONNE  
DANS SES COUCHES LES PLUS CHAUDES !

# LE VENT SOLAIRE :

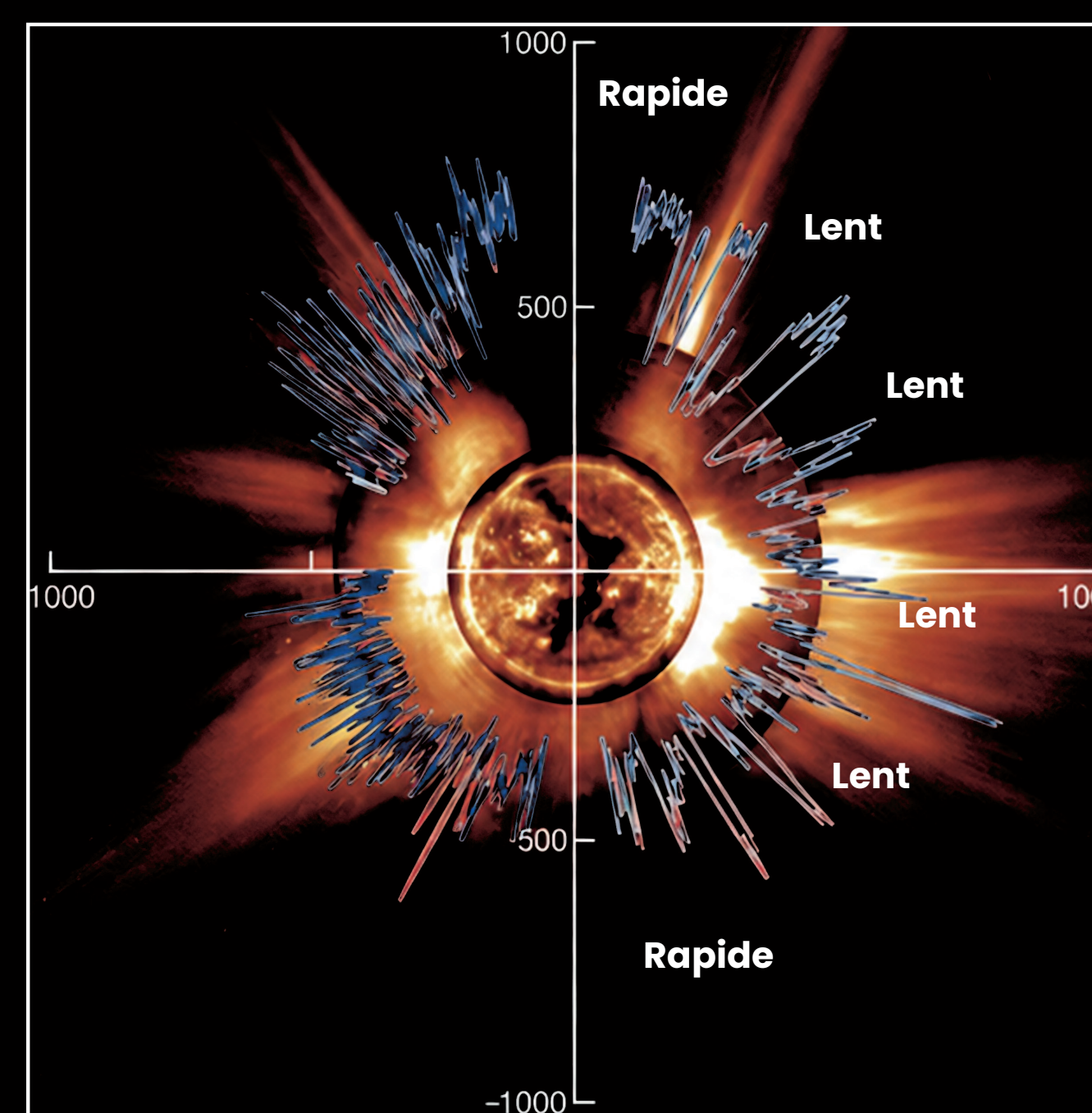
## Le souffle du Soleil

Le vent solaire est un flux de particules chargées (électrons, protons, etc.) accélérées dans la couronne. Il peut être lent ou rapide, et plus ou moins structuré en fonction des humeurs du Soleil !

Le vent solaire délimite la zone d'influence de notre étoile au sein de la Galaxie, qu'on appelle **l'héliosphère**.



vent solaire structuré pour un soleil calme.  
© Mc Comas et al. (2003)



vent solaire structuré pour un soleil actif  
© Mc Comas et al. (2003)

La sonde spatiale Ulysse (lancée en 1990) a mesuré la vitesse du vent solaire ainsi que sa polarité (couleur bleu et rouge) tout autour du Soleil. Plus on s'éloigne de l'axe horizontal, plus le vent solaire est rapide.

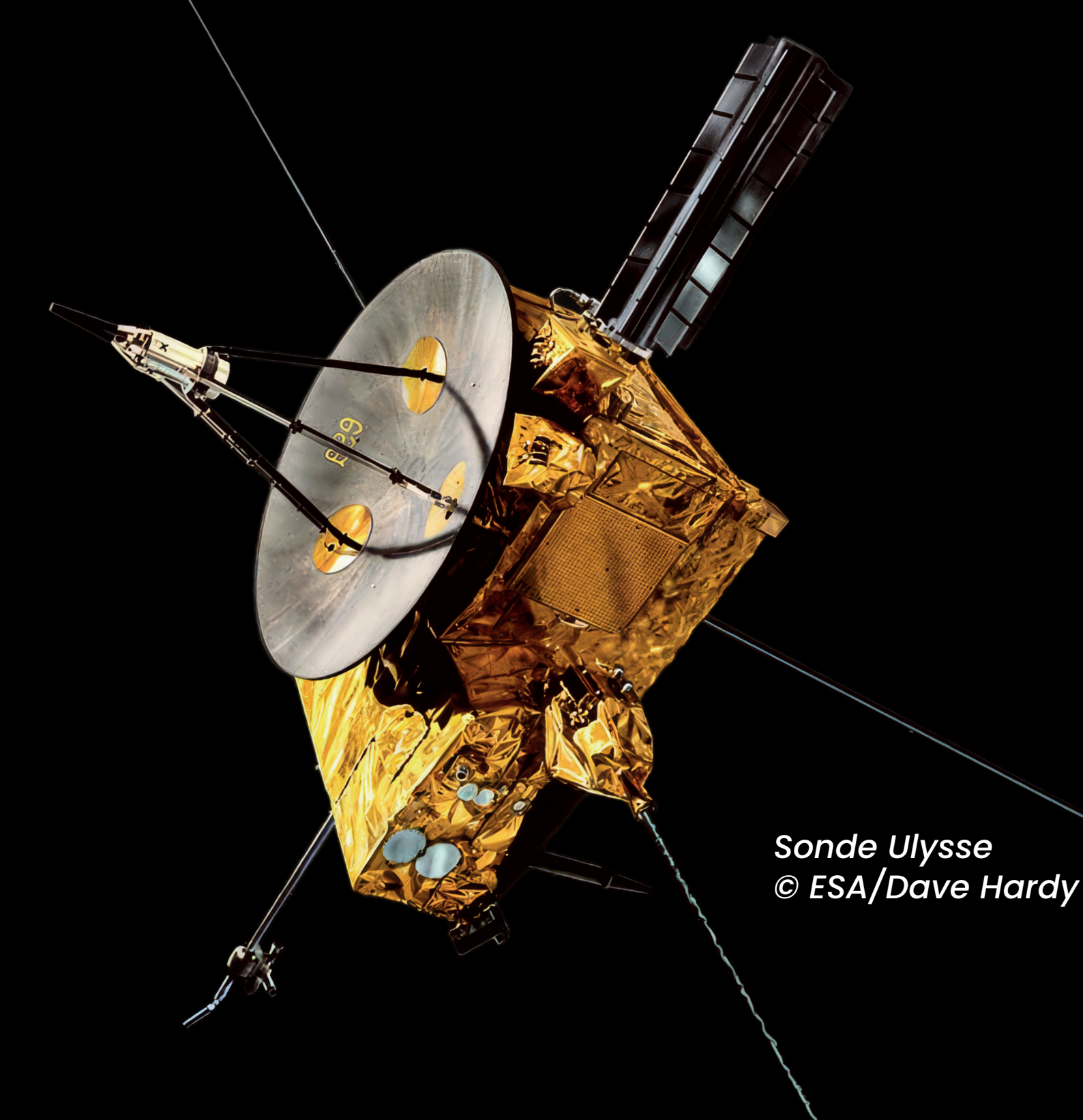
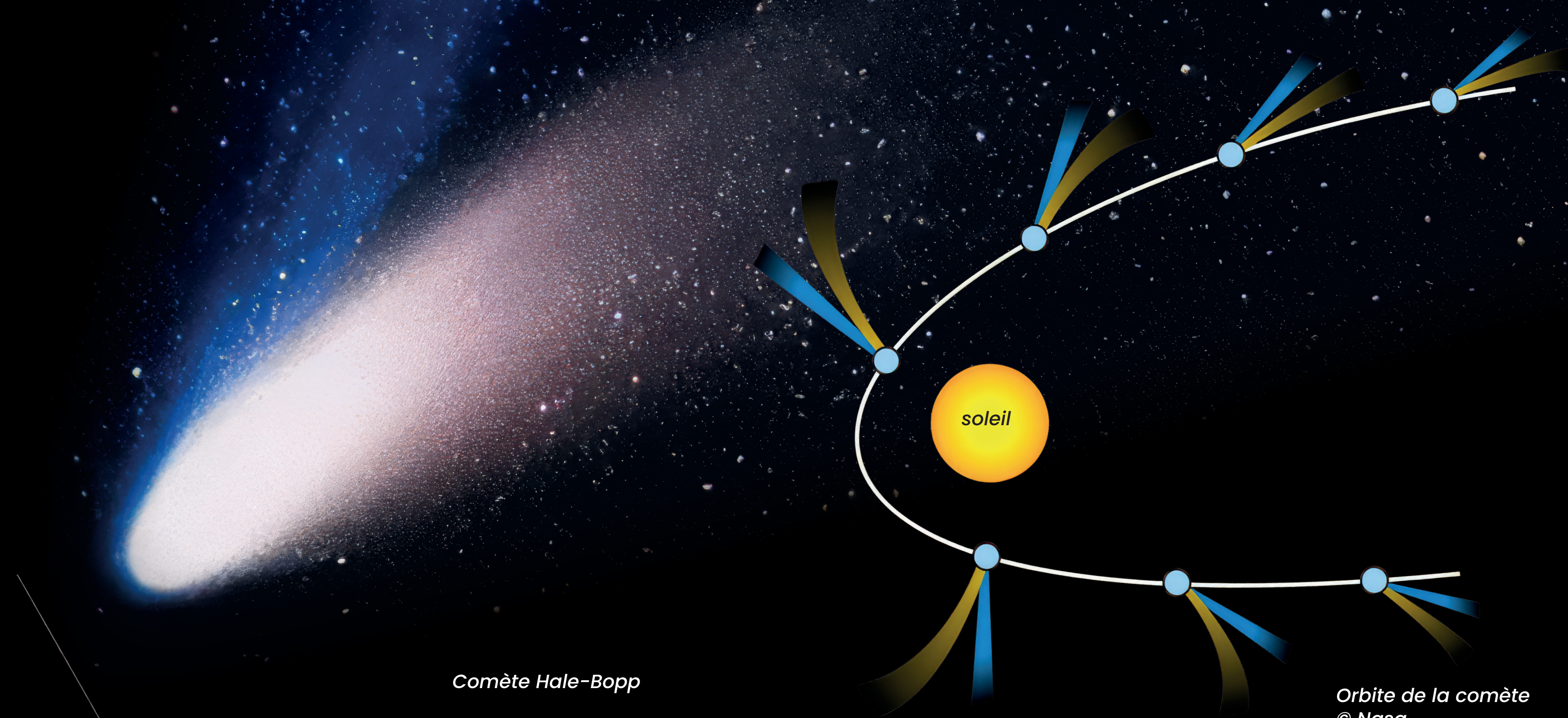
À gauche, le soleil a une activité basse, son champ magnétique ressemble à celui d'un aimant : il possède un pôle nord et un pôle sud magnétiques.

Cette configuration change lors des périodes d'activité intense (à droite), où le champ devient plus complexe.

cea

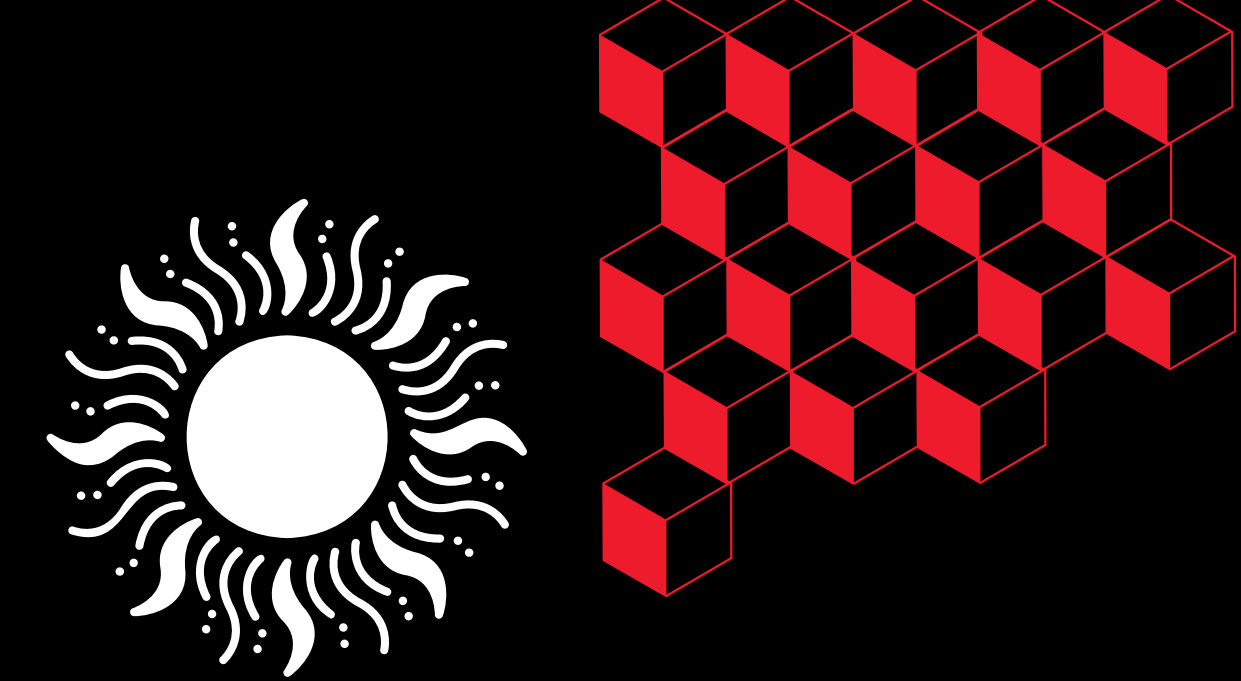
C'est grâce aux comètes qu'on a découvert le vent solaire ! Elles ont en effet deux queues distinctes :

- une queue de plasma (particules chargées) qui est toujours opposée au Soleil
- une queue de poussière (roches) qui s'incurve le long de la trajectoire

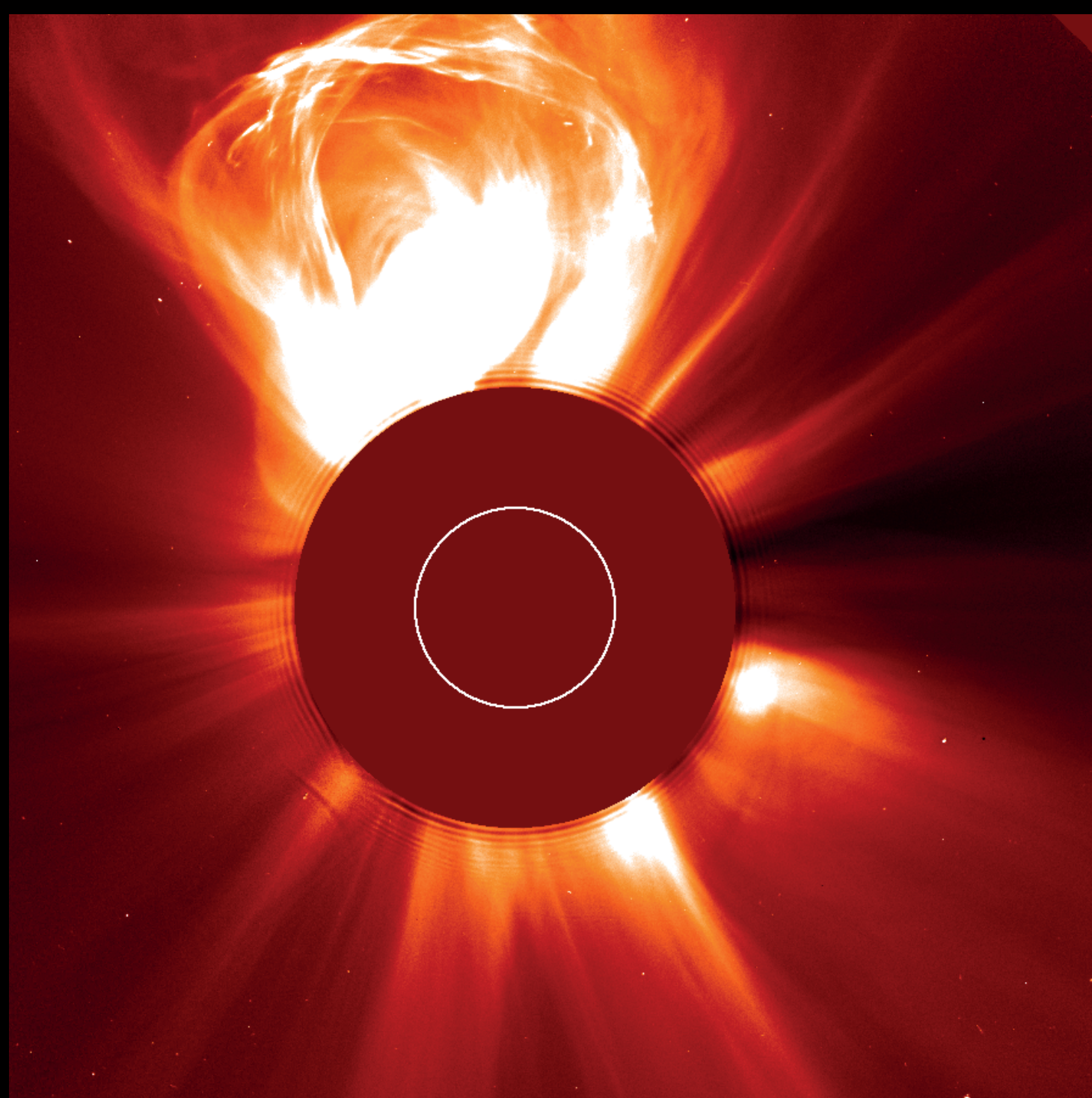


**2,8 millions km/h**  
C'EST LA VITESSE QUE PEUT ATTEINDRE  
LE VENT SOLAIRE À LA TERRE !

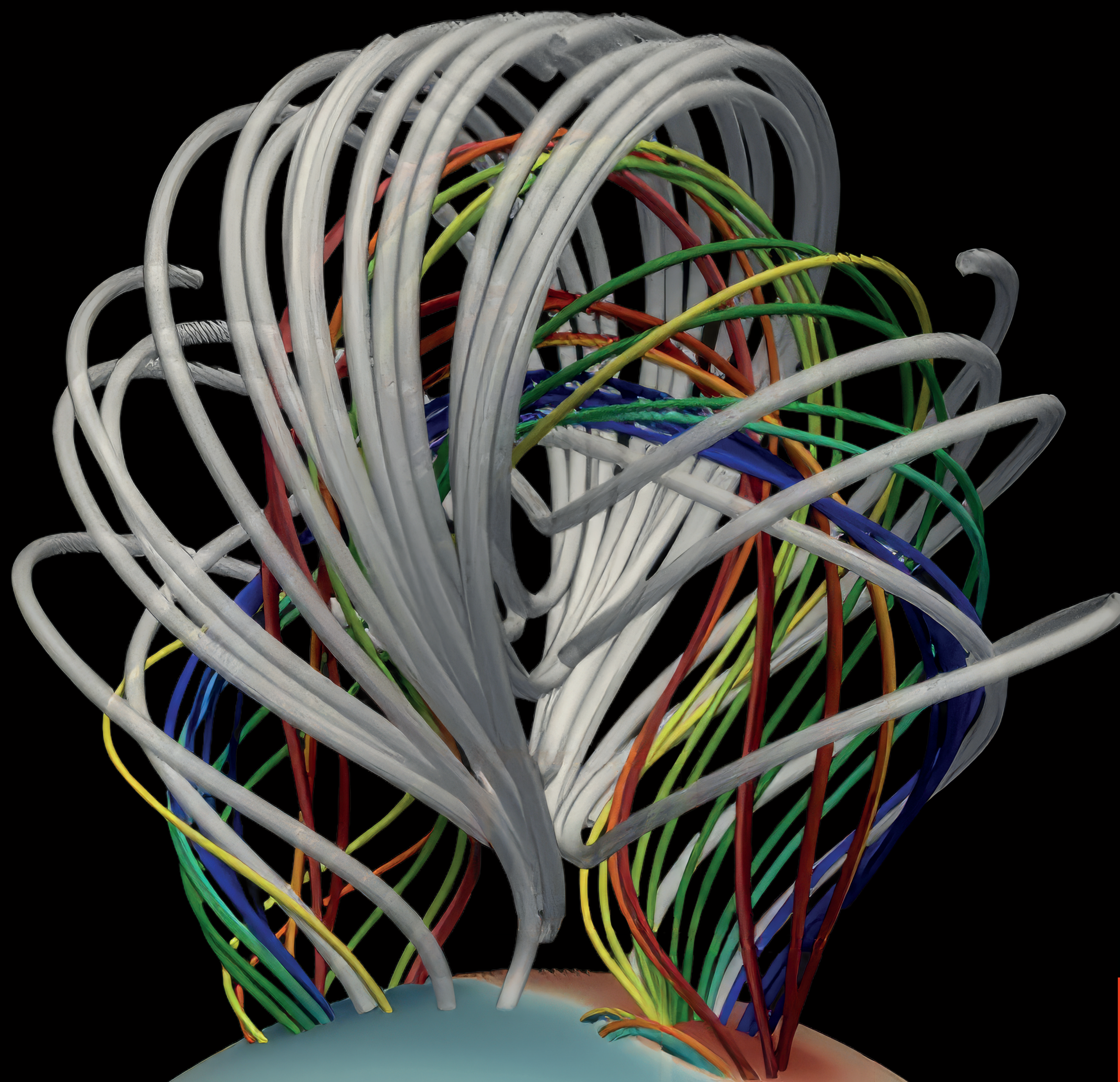
# QUAND L'ATMOSPHÈRE solaire s'enfuit



Quand le Soleil a trop d'énergie, il peut s'en débarrasser sous forme d'un nuage magnétique appelé **éjection de masse coronale** (EMC). Elles sont souvent déclenchées par des instabilités magnétiques semblables aux éruptions solaires. Elles ressemblent à un immense nuage de particules et de champ magnétique.



Observation par SOHO/LASCO d'une EMC : le coronographe crée une éclipse artificielle, permettant de voir la structure magnétique de l'éjection de plasma, ici en expansion dans la couronne solaire.



Simulation de la structure magnétique complexe avec ses lignes de champs multiples et auto cohérentes. Les blanches forment la gaine de l'EMC.  
© Regnault et al. (2023)

Les éjections de masse coronale (EMC) sont des bulles de plasma géantes projetées par le Soleil à des vitesses folles : entre 360 000 et 5,4 millions de km/h !

En voyageant dans l'espace, elles se déforment tout en conservant une structure organisée grâce au champ magnétique interne qu'elles ont arraché au Soleil. Lorsqu'elles atteignent la Terre, leur taille peut dépasser 37 millions de kilomètres, soit près de 30 fois le diamètre du Soleil !

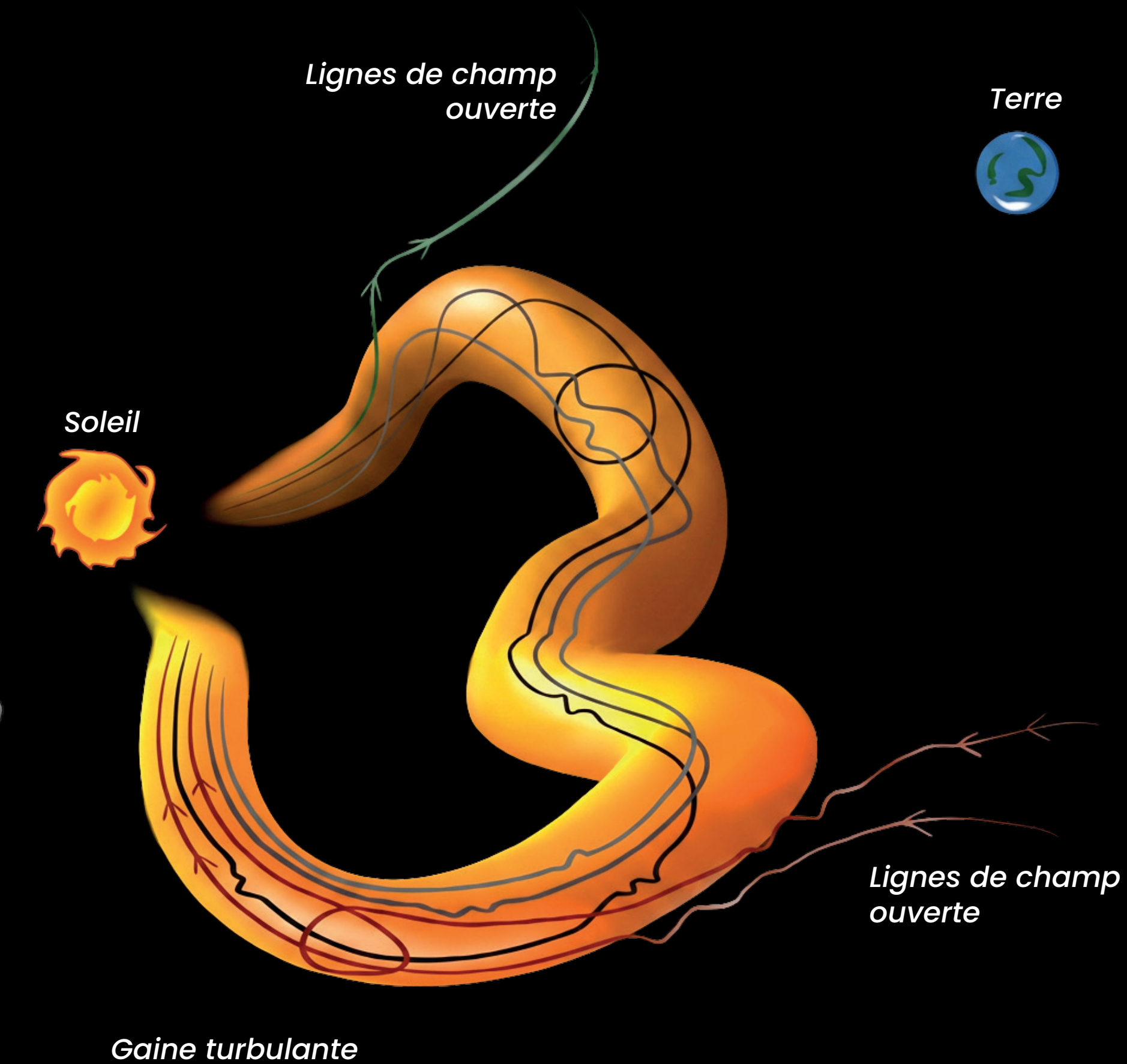


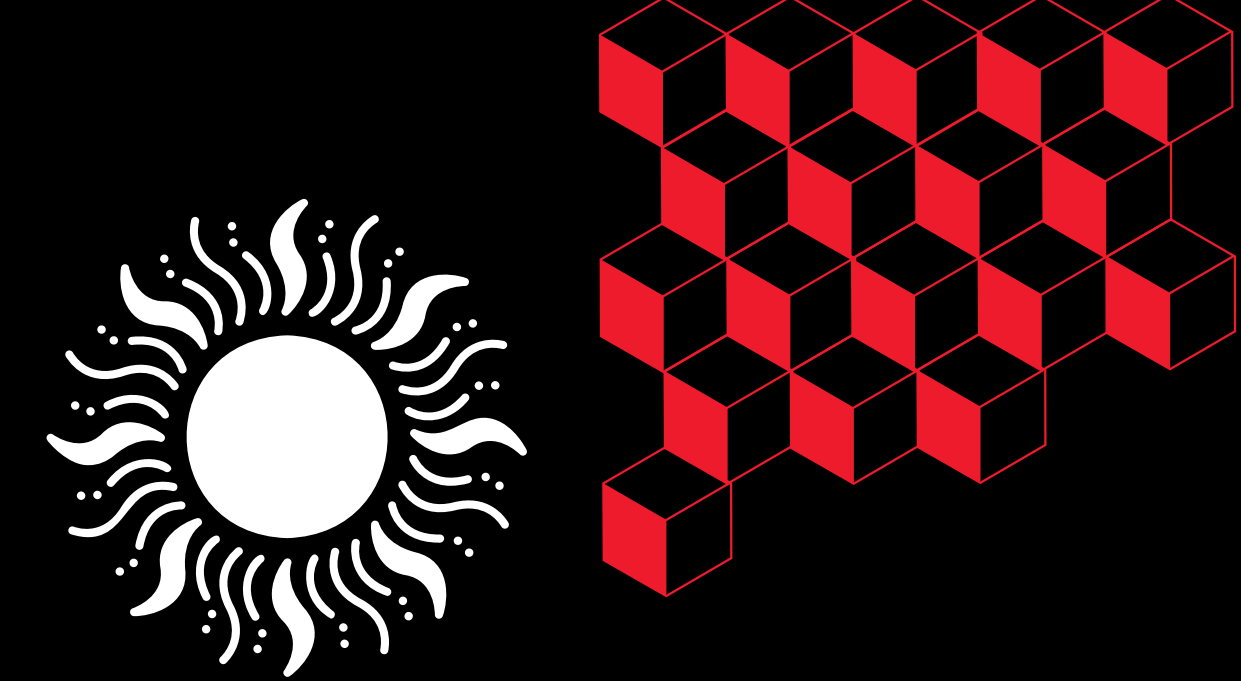
Schéma © Al-Haddad & Lugaz 2025

## 1000 milliards de tonnes !

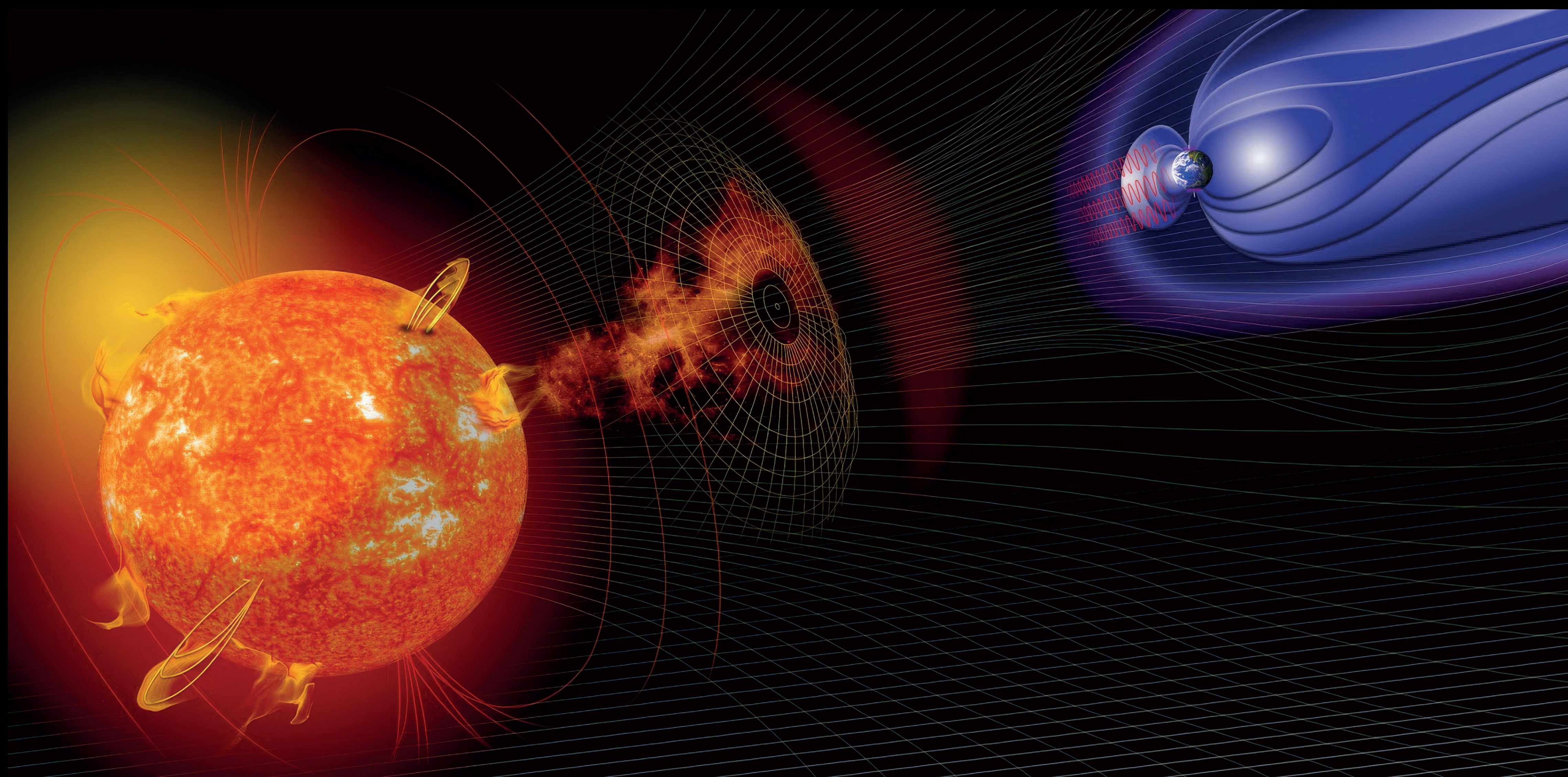
C'EST LA MASSE D'UNE ÉJECTION DE MASSE CORONALE. À L'ÉCHELLE DU SOLEIL, C'EST COMME UN GRAIN DE SABLE SUR L'EVEREST.

# LA MÉTÉOROLOGIE DE L'ESPACE :

## quand le Soleil affole la Terre



Quand les éruptions solaires ou les éjections de masse coronale atteignent la Terre, elles vont provoquer des perturbations. La Terre est protégée par son propre champ magnétique (magnétosphère) et son atmosphère.



© NASA



Ces perturbations peuvent amener à la création de courants électriques autour de la Terre. Une jolie conséquence de ces courants dans l'atmosphère terrestre est la création des aurores polaires. Mais tout n'est pas rose car nos technologies modernes y sont très sensibles : avec par exemple la chute de satellites, les pertes de signal GPS et radio ou encore des pannes électriques.

La future mission Vigil de l'ESA, à laquelle participe le CEA, surveille la météorologie de l'espace pour prédire ses impacts.

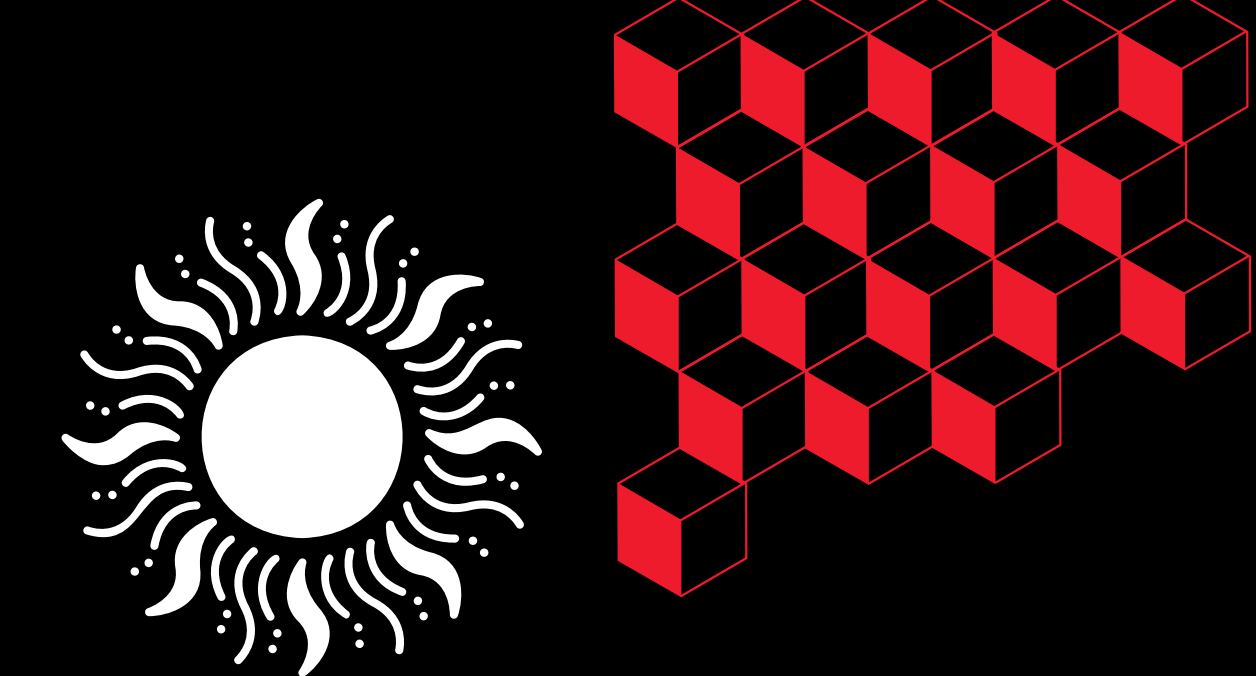
Son coronographe ultraviolet JEDI simulera des éclipses artificielles, masquant le Soleil pour étudier sa couronne et ses éruptions.

**Entre 8 minutes et 3 jours**  
C'EST LE DÉLAI MOYEN QUE MET UN ÉVÉNEMENT  
SOLAIRE À ATTEINDRE LA TERRE !



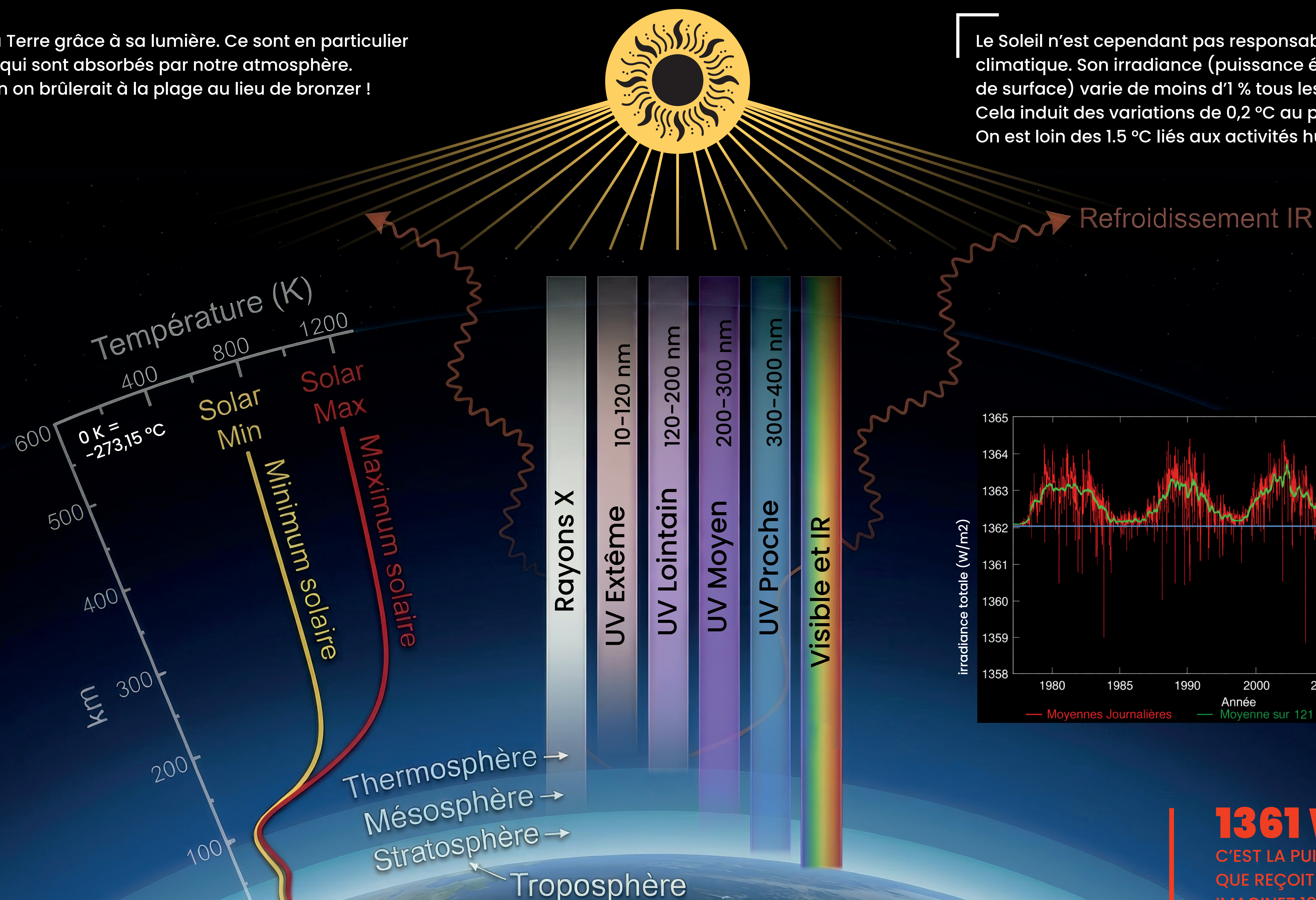
# LE SOLEIL NOUS RÉCHAUFFE...

mais pas trop !



Le Soleil réchauffe la Terre grâce à sa lumière. Ce sont en particulier les ultraviolets (UV) qui sont absorbés par notre atmosphère. Heureusement, sinon on brûlerait à la plage au lieu de bronzer !

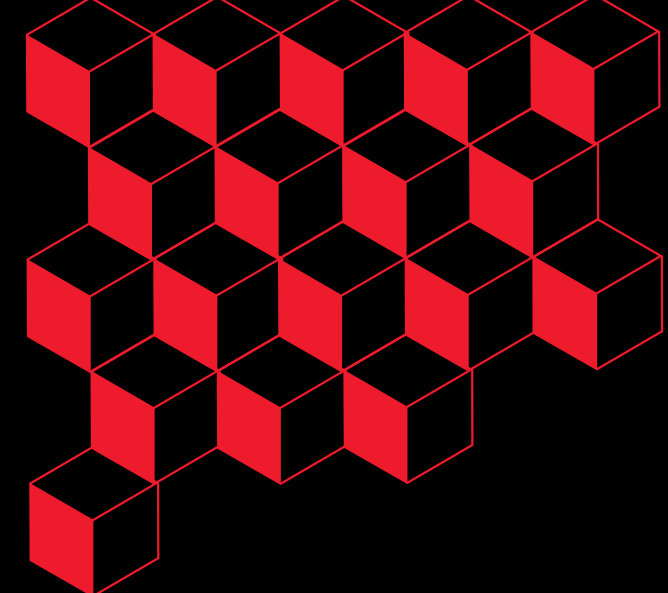
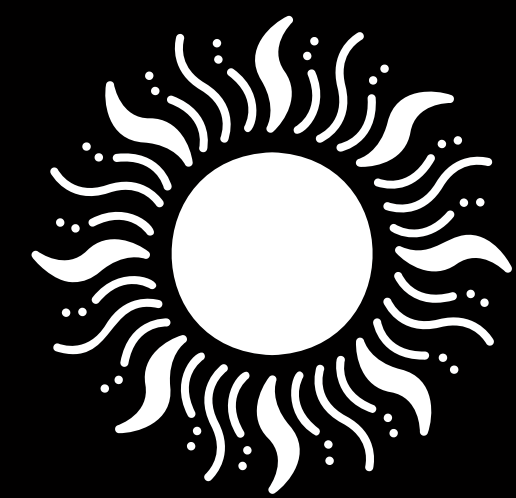
Le Soleil n'est cependant pas responsable du changement climatique. Son irradiance (puissance émise par unité de surface) varie de moins d'1 % tous les 10 ans. Cela induit des variations de 0,2 °C au plus. On est loin des 1.5 °C liés aux activités humaines !



**1361 W/m<sup>2</sup>**  
C'EST LA PUISSANCE PAR M<sup>2</sup>  
QUE REÇOIT LA TERRE GRÂCE AU SOLEIL !  
IMAGINEZ 10 ÉOLIENNES GÉANTES  
SUR UN TERRAIN DE FOOT...

# EXEMPLE DE MISSIONS SOLAIRES

## qui explorent notre étoile



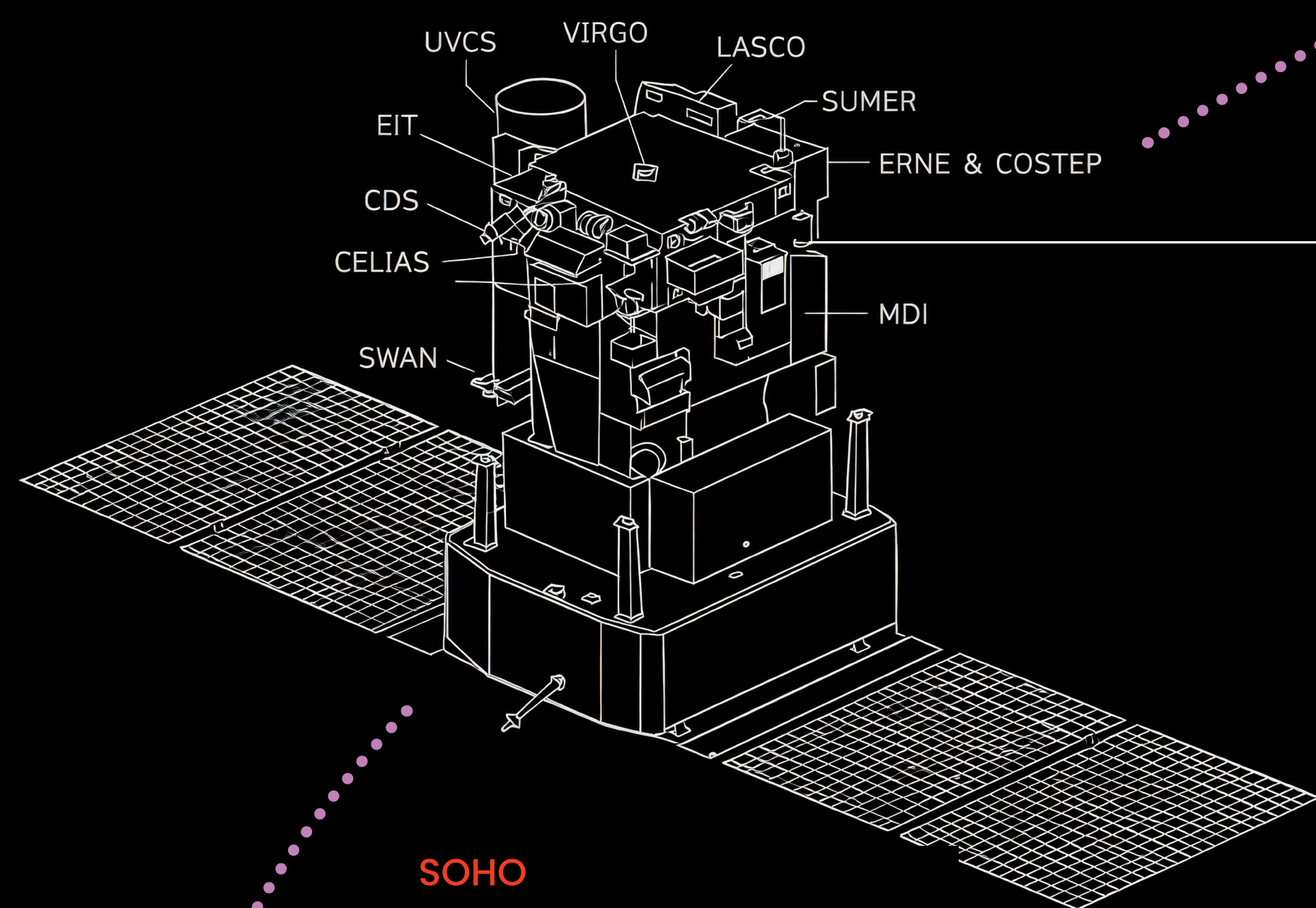
### LE CEA, ACTEUR CLÉ DE L'EXPLORATION SOLAIRE EUROPÉENNE

Le CEA a contribué à 2 missions phares de l'ESA, toujours en fonctionnement, dédiées au Soleil et à l'héliosphère :

- **SOHO (1995)** : le satellite qui a révolutionné notre compréhension du Soleil.
- **Solar Orbiter (2020)** : la sonde qui frôle notre étoile pour en percer les mystères.

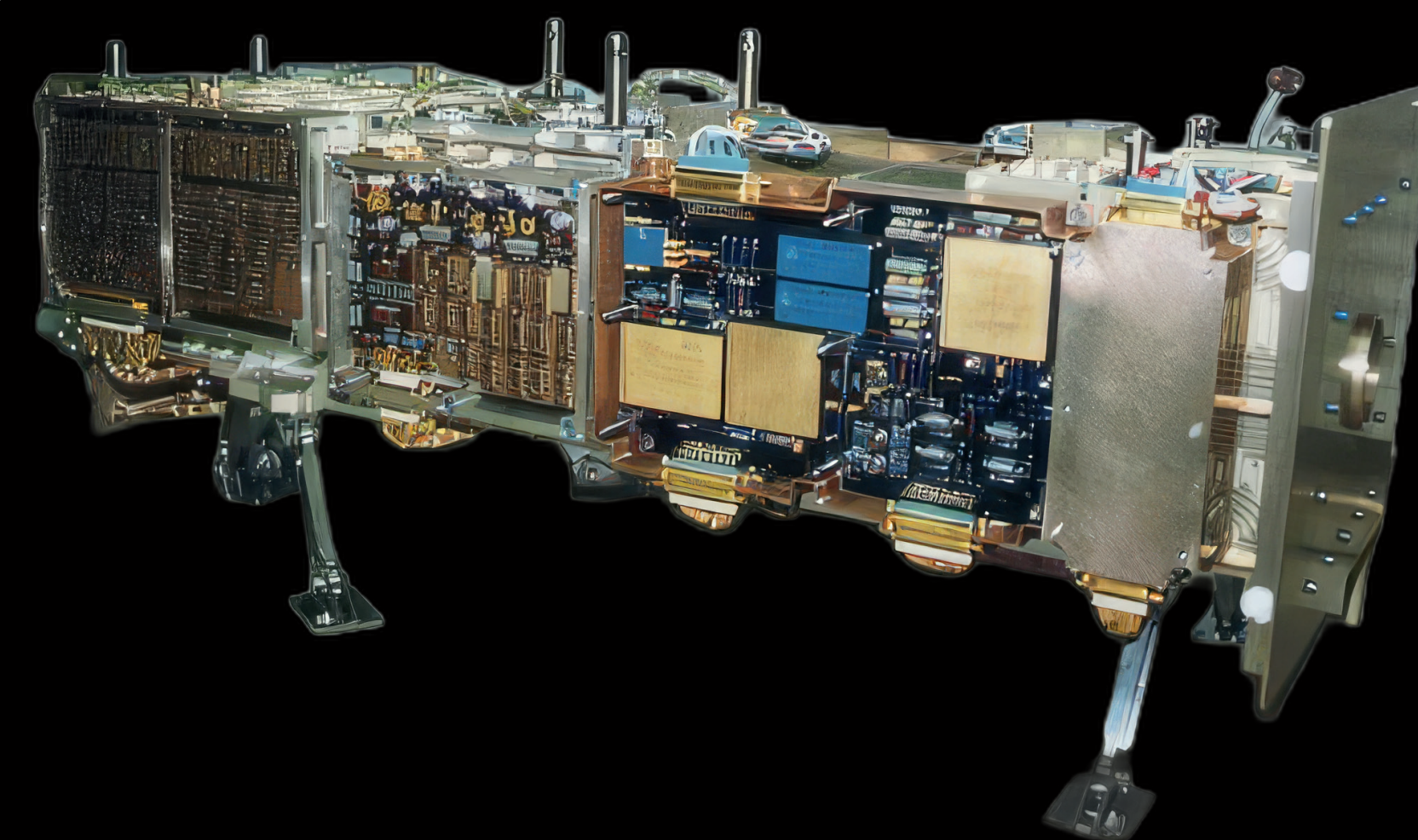
Le CEA a conçu les chaînes de détection de deux instruments majeurs :

- **GOLF** : pour écouter les battements du Soleil (héliosismologie).
- **STIX** : pour capturer l'énergie des éruptions solaires, grâce à une technologie pionnière : le détecteur Caliste capable de mesurer des rayons X de 4 à 150 keV.

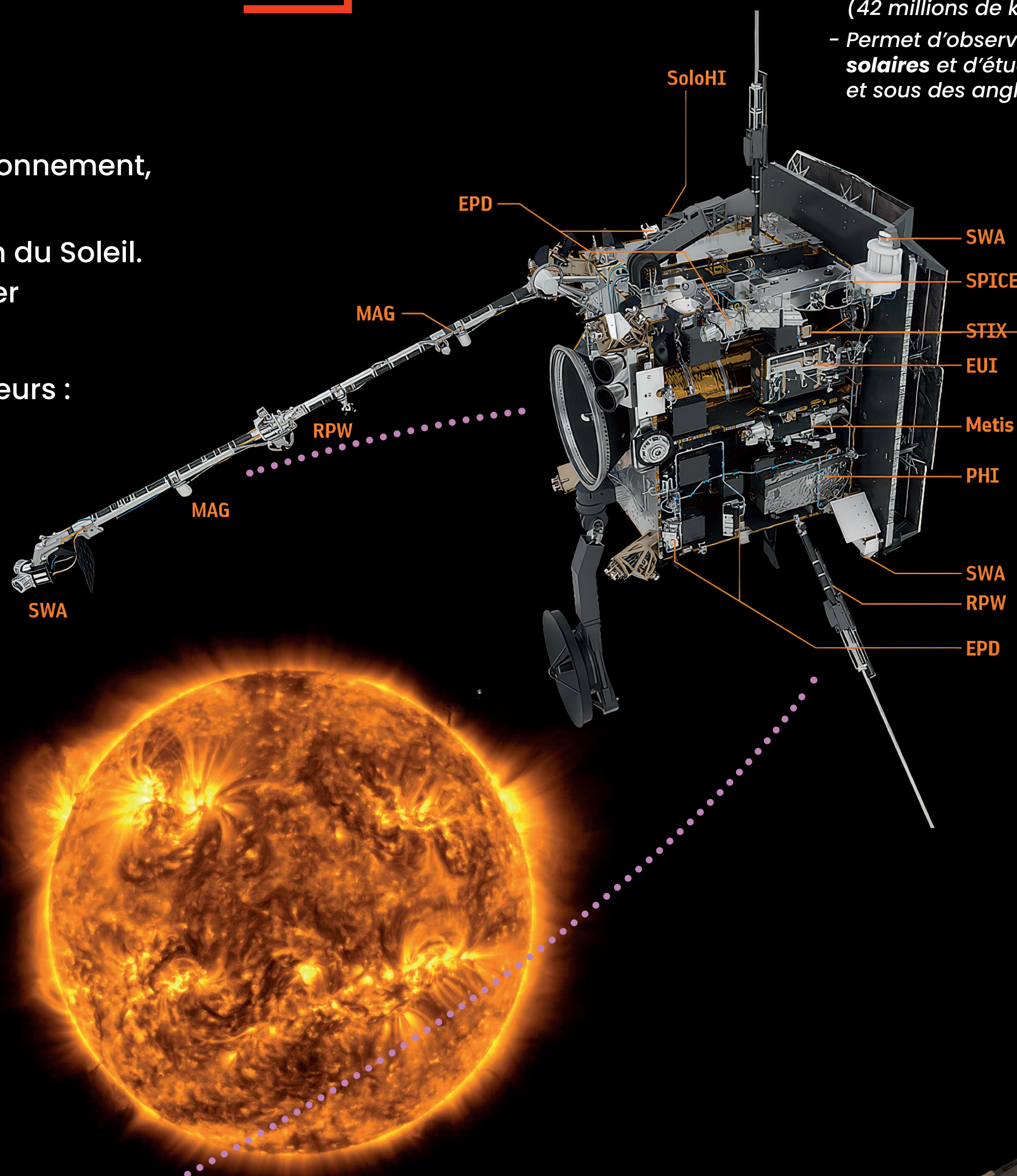


#### SOHO

- situé à 1,5 million de km de la Terre, et fait face au Soleil.
- Observation continue du Soleil, sans interruption, idéal pour étudier les modes d'oscillation (héliosismologie) et de surveiller l'activité solaire et les éjections de masse coronale (EMC) en temps réel.

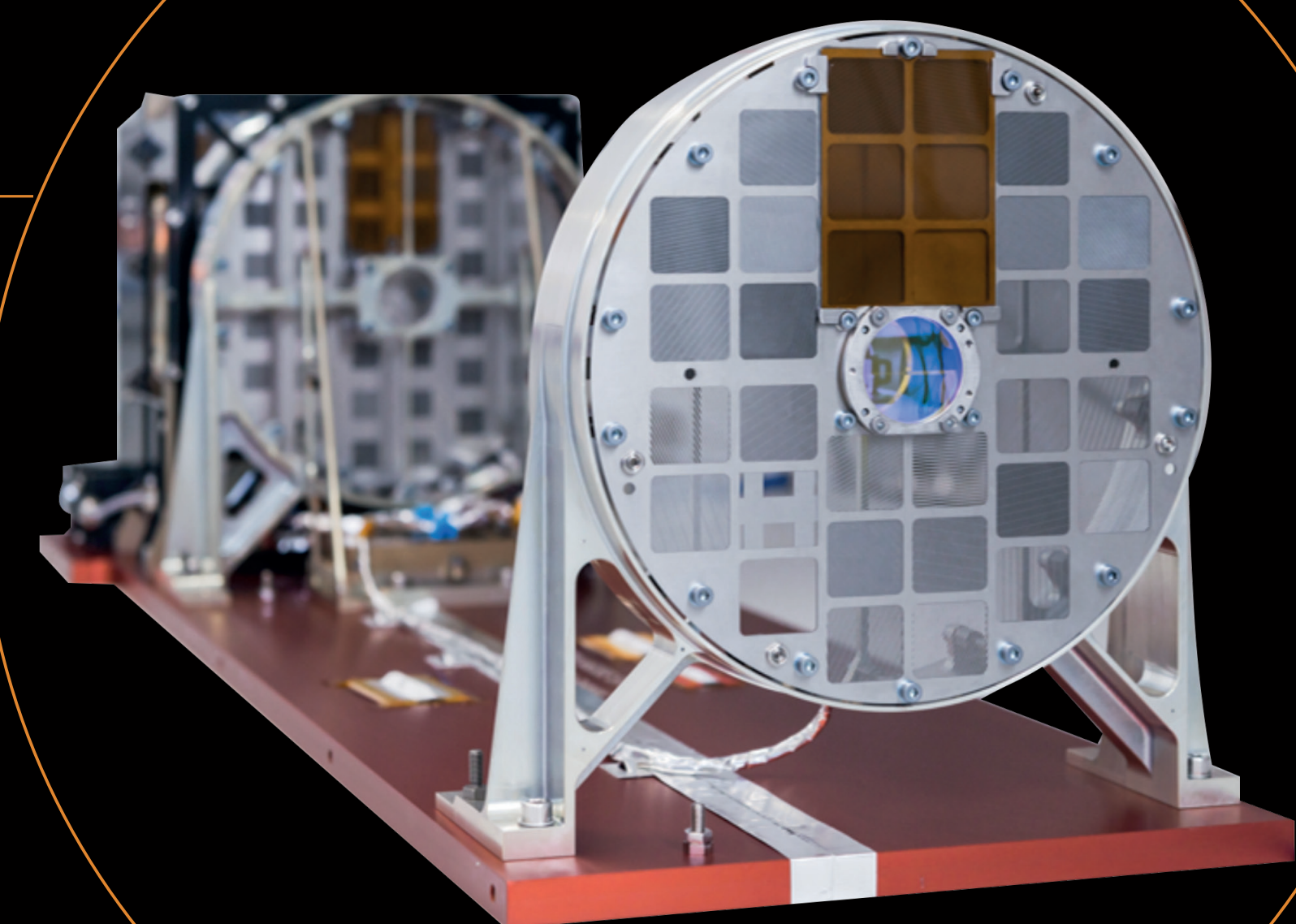


GOLF est un des 12 instruments de SOHO

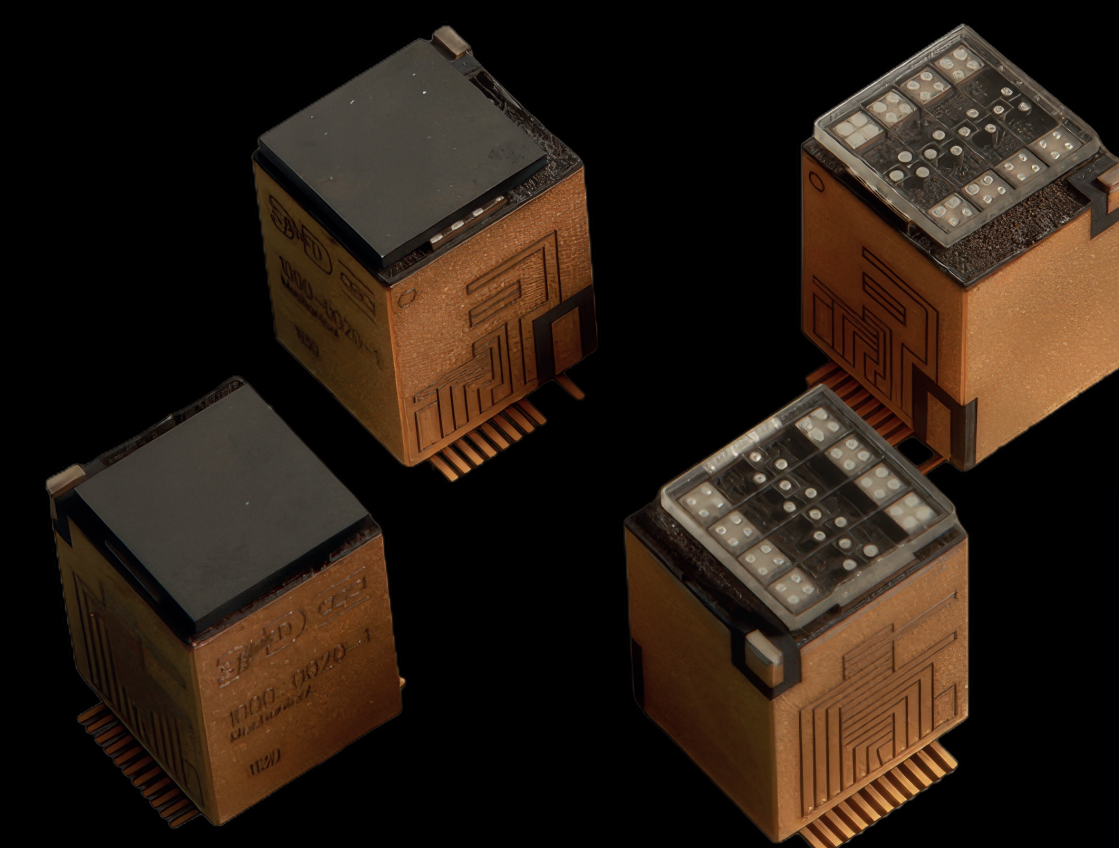


#### SOLAR ORBITER

- Orbite elliptique **très inclinée** (jusqu'à 33° par rapport à l'équateur solaire) et **proche du Soleil** (42 millions de km)
- Permet d'observer **la face cachée et les pôles solaires** et d'étudier le Soleil à **haute résolution** et sous des angles inédits.



STIX (Spectromètre/Télescope à rayons X) est l'un des 14 instruments de Solar Orbiter. Composé de 32 détecteurs Caliste, il observe les rayons X émis par le Soleil lors des éruptions solaires.



#### DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE :

Les détecteurs Caliste, nés pour l'astronomie, sont aujourd'hui aussi utilisés pour la sécurité nucléaire, le contrôle industriel et la médecine, grâce à leur haute résolution spectrale et spatiale.

## Une 1<sup>ère</sup> fois à l'été 2029 !

INCLINAISON ORBITALE DE SOLAR ORBITER DE 33° PAR RAPPORT AU PLAN DE L'ÉCLIPTIQUE, PERMETTANT D'OBSERVER LES PÔLES SOLAIRES.