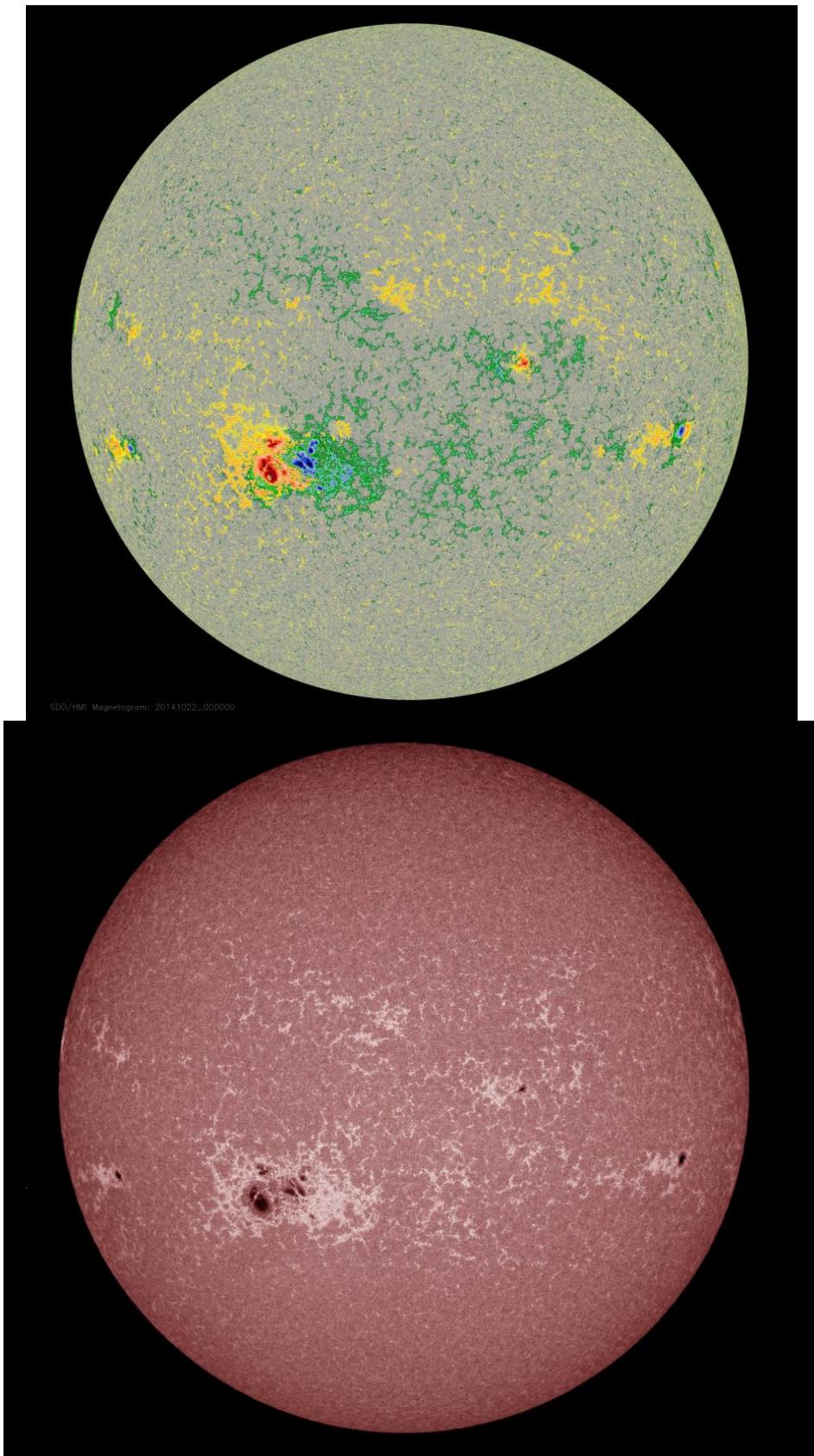


## cyclicité et magnétisme solaire



*L'un des plus gros groupes de taches jamais observé, le 22 Octobre 2014, ici par SDO (NASA). En haut une carte des champs magnétiques, appelée magnétogramme (en vert/bleu, champs sortants; en jaune/rouge, champs entrants, en gris champ nul). Dans les taches le champ magnétique peut atteindre 0.25 Tesla. Autour, dans les brillances, il est plus dilué et plus faible.*

Le Soleil est une étoile variable, dont l'aspect fluctue avec une période de 11 ans. Les champs magnétiques, dont les taches constituent la principale manifestation, gouvernent cette activité, qui est à l'origine des éruptions. Cependant nous verrons que le cycle magnétique dure 22 ans.

### Le Soleil : une étoile en évolution

Le Soleil est une étoile ordinaire, ni petite ni grosse, ni chaude ni froide, parmi les milliards que comporte la Galaxie, mais c'est notre étoile, et sans elle, nous ne serions pas là !

#### 1.1 – Un objet très hétérogène

Le Soleil est un corps gazeux extrêmement hétérogène : du cœur vers la surface, la température passe de 15 millions à 6000 degrés, la pression de cent milliards à 0.01 bar (1 bar, c'est la pression atmosphérique terrestre), la densité de 150 à un millionième (1 est la densité de l'eau) ! Au dessus de la surface visible, pression et densité continuent à décroître au fur et à mesure qu'on s'éloigne, mais par contre la température remonte à plus d'un million de degrés. La surface du Soleil s'appelle photosphère : elle ne fait que 300 km d'épaisseur (moins d'un millième du rayon). La température y est de 5750 degrés, c'est elle qu'on voit à l'œil nu et qui présente des concentrations magnétiques sombres, plus froides : les taches. Au dessus d'elle se trouve la chromosphère, épaisse de 2000 km, de moindre densité ; la température y est de 8000 degrés. Elle est invisible sans instrument spécialisé, hormis pendant les éclipses totales où elle forme un mince liseré rose (à cause de l'émission de la raie H $\alpha$  à 656.3 nm) autour de la Lune. La chromosphère contient les régions actives, composées de zones magnétisées entourant les taches et de filaments sombres ; c'est ici que se déclenchent les éruptions (*chapitre 3*). Enfin, la couronne raccorde le Soleil au milieu interplanétaire. Très ténue et vaste, sa température est de 2 millions de degrés, et elle s'étend sur des millions de km. La remontée de température entre la chromosphère et la couronne se fait en seulement en quelques dizaines de km dans une fine couche appelée « zone de transition » : on pense qu'un chauffage résulte de la dissipation d'ondes acoustiques, dont le mécanisme est toujours débattu. Le vent solaire prend naissance dans la couronne : c'est un flot d'électrons, protons et ions qui se répand dans le milieu interplanétaire jusqu'à l'orbite de la Terre et au-delà. Ce vent s'écoule à 400 km/s. Il est guidé par les champs magnétiques solaires à grande distance. Ses variations, lors de phénomènes violents (éruptions, éjections) sont à l'origine des aurores boréales et australes qu'on observe sur Terre, mais aussi sur d'autres planètes. Le Soleil est une étoile dynamique !

#### Une vision multi-longueur d'onde de l'atmosphère solaire

Le Soleil est présent dans tout le spectre électromagnétique, des rayons  $\gamma$  aux ondes radio, en raison de l'hétérogénéité de son atmosphère (de 5000 à 2 millions de degrés) et de processus variés de rayonnements spécifiques. Lors des éruptions, on assiste à l'émission transitoire de rayons  $\gamma$  et X pouvant signifier une élévation de température locale à 100 millions de degrés, des émissions radio de particules accélérées (effet cyclotron, chocs hydrodynamiques), des rayonnements X de freinage (impacts de faisceaux sur la surface solaire), en sus des rayonnements permanents dits thermiques. La physique solaire d'aujourd'hui repose sur l'observation multi-longueur d'onde pour appréhender les phénomènes dans leur ensemble, en combinant observations au sol (optique, radio) et dans l'espace ( $\gamma$ , X, UV).

#### 1.3 Structure interne du Soleil : noyau, zone convective, zone radiative

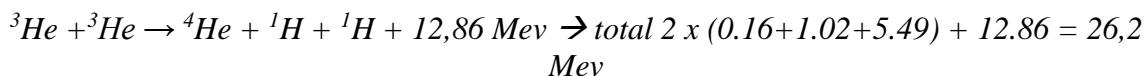
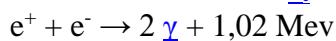
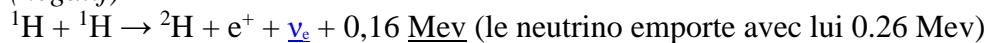
L'intérieur solaire n'est pas accessible aux télescopes car opaque ; les renseignements dont on dispose proviennent de modèles contraints par les observations de son enveloppe. Le Soleil tire l'énergie qu'il rayonne des réactions de fusion thermonucléaires de l'Hydrogène en Hélium dans son cœur. La principale source d'énergie est due aux réactions « proton – proton » qui transmutent 4

noyaux d'Hydrogène (4 protons) en un noyau d'Hélium (2 protons, 2 neutrons). Chaque réaction dégage 26.2 Mev et s'accompagne de la production de neutrinos et de rayons Gamma ( $\gamma$ ) énergétiques. Sachant que seule 10% de la masse du Soleil est un réservoir de combustible utilisable d'Hydrogène, le calcul donne une durée de vie approximative de dix milliards d'années.

Chaque seconde, ce sont 900 millions de tonnes d'Hydrogène qui se transforment en Hélium au cœur du Soleil !

### La principale chaîne proton – proton dans le cœur solaire et son bilan d'énergie

$^1H$ ,  $^2H$ ,  $e^+$ ,  $e^-$  désignent le proton, le deutérium, le positron (électron positif), l'électron (négatif)



### Que désigne le Mev ?

En physique nucléaire, on mesure l'énergie en méga électron volt (Mev). L'électron volt est l'énergie d'une charge élémentaire (électron, proton, positron) placée dans un potentiel de 1 Volt, soit  $1.6 \cdot 10^{-19}$  joule (J).

La chaîne « proton proton » génère un déficit de masse égal à 4 millions de tonnes par seconde car la masse d'un noyau d'Hélium est plus faible que celle de 4 protons. Cette perte de masse est convertie en énergie par la relation d'Einstein d'où la luminosité de l'étoile (énergie produite par seconde) qui rayonne au total  $3.86 \cdot 10^{26}$  watts (W), soit cent milliards de fois la puissance consommée par l'humanité toutes sources d'énergie confondues! Mais en fin de vie, le Soleil est si massif qu'il aura perdu moins d'un millième de sa masse initiale.

La lumière produite au cœur du Soleil sous forme de rayons  $\gamma$  met 2 millions d'années à émerger sous forme visible à cause des interactions avec la matière (si elle sortait en ligne droite elle mettrait seulement 2 secondes). Elle diffuse lentement par collisions comportant des phénomènes multiples d'absorption et d'émission.

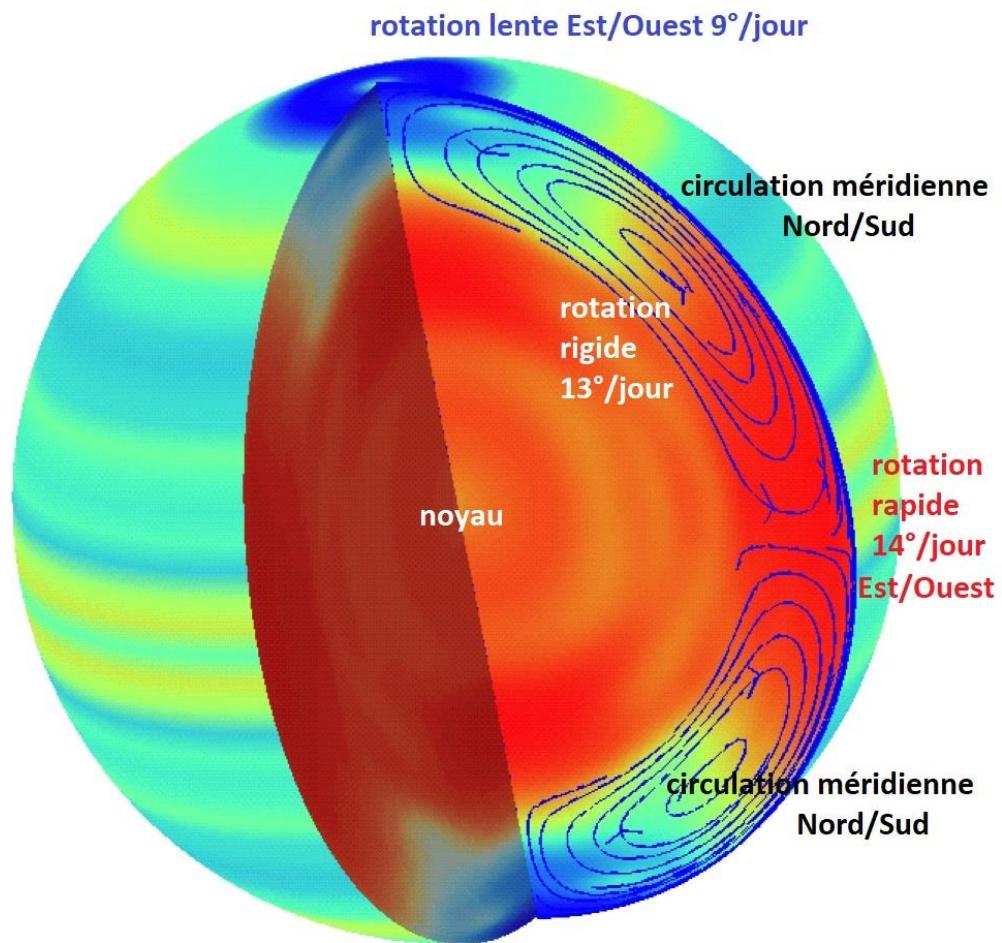
### L'équivalence masse énergie

La célèbre relation d'Albert Einstein  $E = m C^2$  établit l'équivalence entre la masse  $m$  (en kg) et l'énergie  $E$  (en J).  $C$  est la vitesse de la lumière (300 000 km/s). La fusion de noyaux légers comme l'Hydrogène en Hélium s'accompagne d'un déficit de masse converti en énergie.

30 m<sup>2</sup> de surface solaire ont la même puissance qu'une tranche de centrale nucléaire (2000 MW) !

Le cœur du Soleil s'étend sur le quart de son rayon. Au-delà, l'énergie est transportée vers l'extérieur par rayonnement (la zone radiative) puis par les mouvements (la zone convective). Elle émerge sous forme de lumière à la surface de l'étoile, qu'on appelle photosphère, très fine couche, c'est elle qu'on voit à l'œil nu !

Les informations dont on dispose sur la zone convective proviennent de l'analyse des mouvements de la surface solaire, la photosphère. Cette fine couche se comporte comme une membrane de tambour, avec des modes propres d'oscillation (fréquences très basses, de l'ordre du milli Hertz), qui sont le reflet de la structure interne. La discipline qui s'intéresse à l'analyse de ces vibrations s'appelle « héliosismologie » (« astérosismologie » pour les autres étoiles). Elle s'est développée récemment avec les instruments SOHO et SDO dans l'espace, ainsi qu'au sol (réseau GONG). L'observation des taches montre que la rotation de surface est différentielle : l'équateur du Soleil tourne plus vite que les pôles. L'héliosismologie permet de sonder en profondeur cette vitesse de rotation et suggère la présence d'une couche sous laquelle la rotation devient rigide : la « tachocline », à 0.65 rayon solaire. Cette technique révèle aussi une circulation méridienne du Soleil, en surface de l'équateur vers les pôles, organisée en grandes cellules qui jouent un rôle important dans la cyclicité du Soleil.



*La rotation du Soleil (d'Est en Ouest) varie selon la latitude et la profondeur (bleu/vert : lente ; jaune/rouge : rapide). En surface elle passe de 14°/jour (équateur) à 9°/jour (pôles). En profondeur, la rotation devient rigide vers 0.65 rayon solaire à 13°/jour. Il existe aussi de grandes cellules à circulation méridienne dans la direction Nord Sud, de l'équateur vers les pôles en surface, à la vitesse de 10 m/s ; elle correspond à un transport compatible avec le cycle de 11 ans. SOHO/MDI – ESA/NASA.*

## 1.4 Le futur du soleil

Le Soleil s'est formé à partir de la contraction d'un nuage d'Hydrogène interstellaire. Il est actuellement en équilibre hydrostatique, ce qui signifie que la pression du gaz s'oppose à son effondrement sous son propre **poids**. Il est en équilibre thermique entre la production d'énergie interne (fusion) et son rayonnement. Nous sommes à mi vie (5 milliards d'années).

Lorsque tout l'Hydrogène disponible (10% du Soleil) aura été consommé dans le noyau, les réactions de fusion ne pourront plus subvenir à entretenir la luminosité. Le Soleil va alors se contracter, la variation d'énergie résultante servant pour moitié à entretenir la luminosité, et pour moitié à accroître d'énergie thermique de l'étoile. La température va augmenter, provoquant la dilatation des couches extérieures. Cette dilatation implique une baisse de température de 5750 à 3000 degrés environ : on a affaire à une géante rouge, allant jusqu'à englober les planètes intérieures Mercure et Vénus. L'évolution s'accélère à mesure que la température centrale de l'étoile augmente, et la phase d'expansion prend fin lorsque la température centrale est suffisante (100 millions de degrés) pour amorcer les réactions de fusion de l'Hélium en Carbone. Dans le cas du Soleil, on n'ira pas au delà. La phase de géante rouge dure environ 1 milliard d'années.

La luminosité de la géante rouge est de 10 à 100 fois plus élevée. Lorsque les ressources en Hélium sont taries, la contraction du noyau reprend, mais la masse du Soleil est trop faible pour que la température de fusion du Carbone puisse être atteinte. La contraction du cœur va continuer pour former une naine blanche de 3000 km rayon seulement (dimensions d'une petite planète). La densité y est énorme, 10 millions de fois celle de l'eau ! La gravité à la surface d'un tel astre est plus d'un million de fois celle à la surface de la Terre, de sorte que si votre « poids » est de 70 kg, il serait de 70 000 tonnes sur une naine blanche !

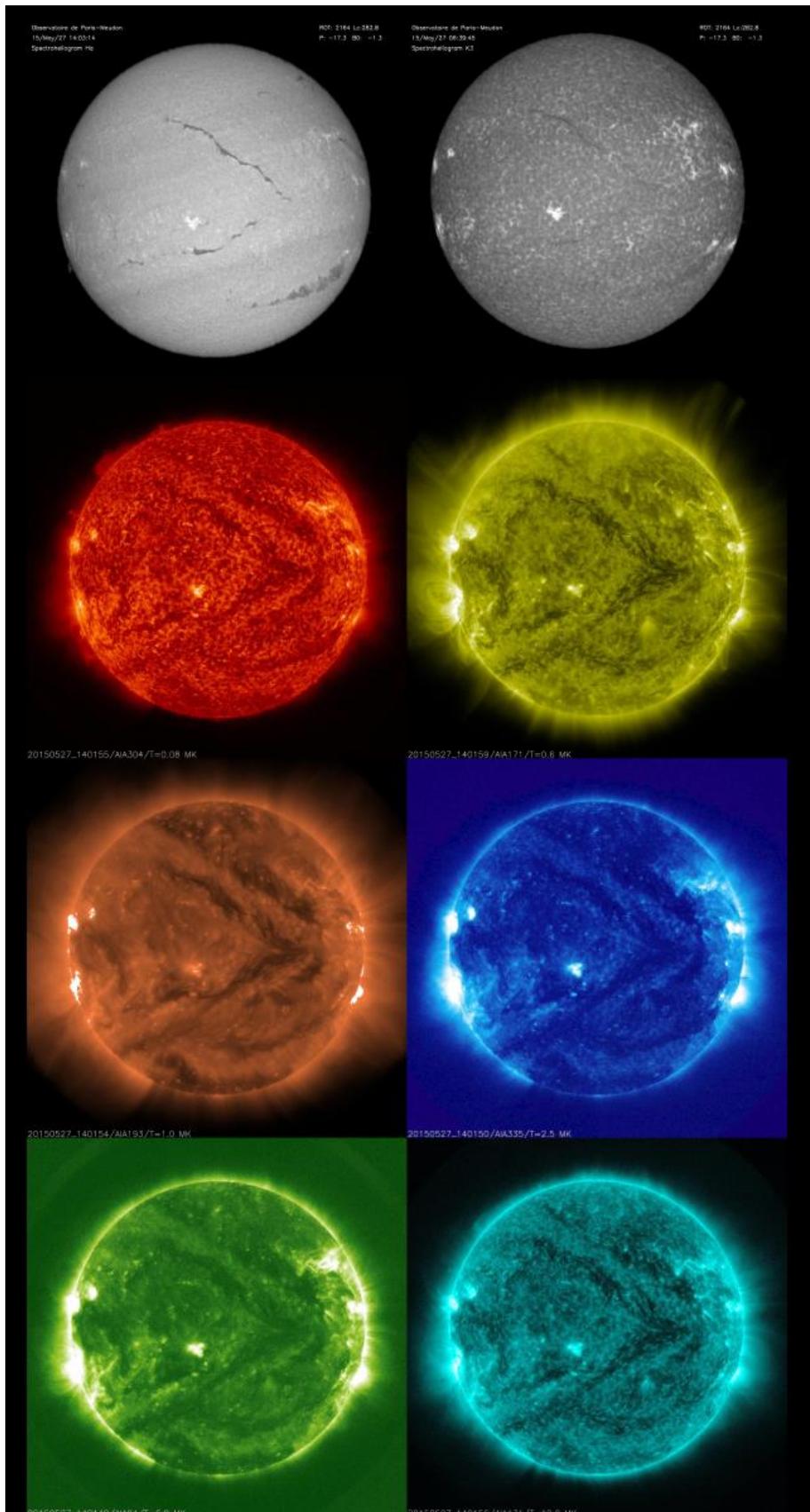
Que deviendra la naine blanche ? Elle se refroidira au fil du temps par rayonnement pour devenir une naine rouge, puis noire, corps froid invisible, dans lequel on pense que les noyaux de Carbone formeront un réseau cristallin solide.

## 2. Le spectre solaire : quels messages contient-il ?

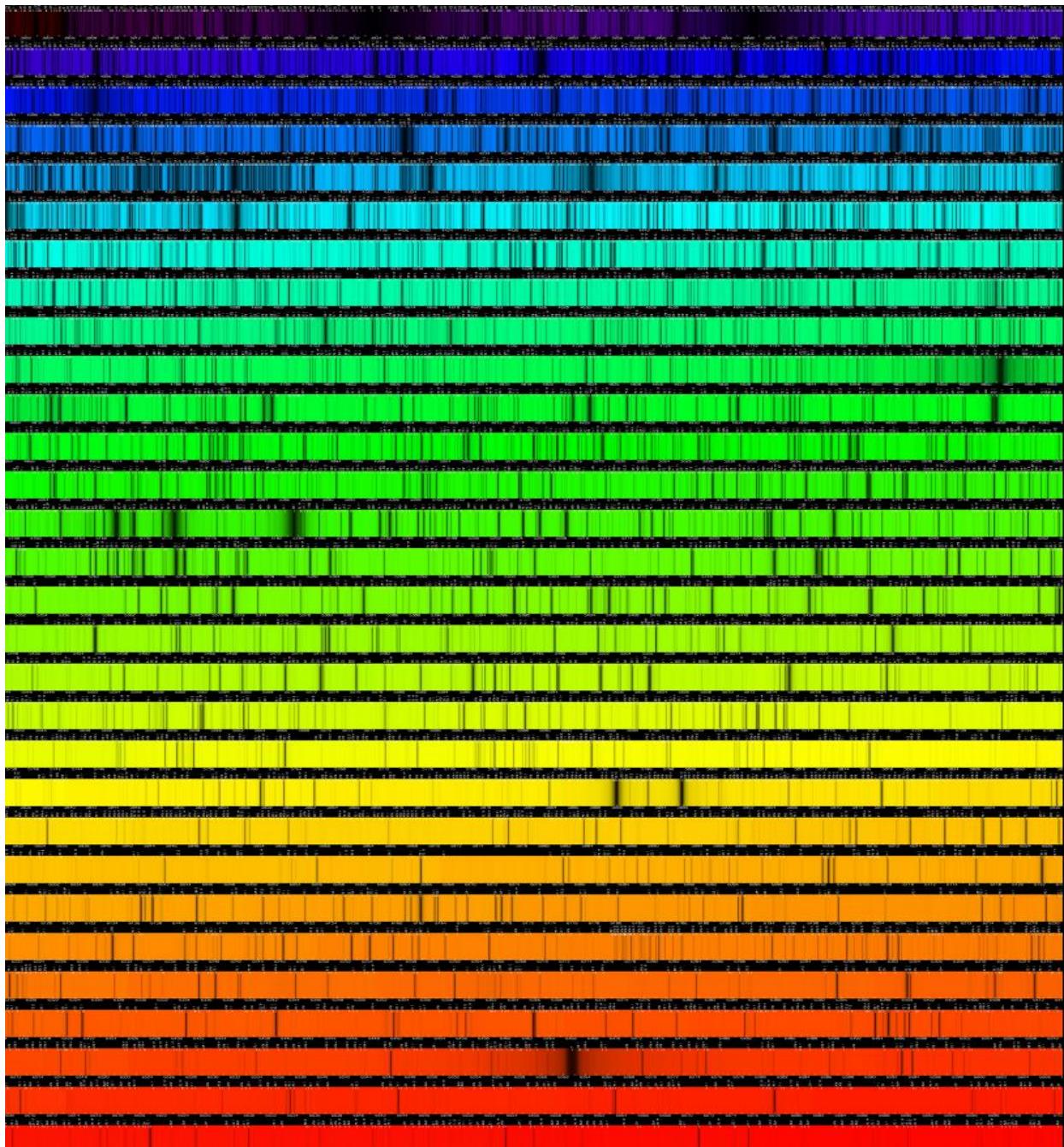
Les raies du spectre électromagnétique fournissent aux astronomes une source précieuse d'informations sur la composition chimique et les conditions physiques qui règnent dans l'atmosphère solaire.

### 2.1 Les raies et la température du milieu

Les raies des atomes neutres se forment dans la basse atmosphère (photosphère, chromosphère) entre 5000 et 10 000 degrés, dans le domaine visible du spectre. Celles d'**ions** impliquent des températures d'autant plus fortes que le degré d'ionisation (nombre d'électrons arrachés) est élevé ; elles sont émises en UV par la zone de transition chromosphère couronne (faible ionisation) et la basse couronne (forte ionisation), entre 20 000 et 10 millions de degrés.



*Trois filaments quiescents exceptionnellement longs observés dans des longueurs d'onde variées et étagées en température. En haut à 656 et 393 nm (OP/Meudon). En dessous, depuis l'espace en UV, six raies d'atomes ionisés à 30, 17, 19, 33, 9 et 13 nm correspondant respectivement aux températures de 80 000 degrés (Hélium) puis 0.6, 1, 2.5, 6 et 10 millions de degrés (Fer). Le rayonnement UV révèle les couloirs magnétiques occupés par les filaments dans la basse couronne (27 Mai 2015, AIA - SDO/NASA).*



*Spectre du Jungfraujoch de L. Delbouille, avec ses milliers de raies qui sont la signature des éléments chimiques présents dans l'atmosphère solaire. Les bandes sont graduées en Angström (1 Angström = 0.1 nm, une bande = 10 nm) et les éléments indiqués par leur symbole. ATM veut dire raie formée dans l'atmosphère terrestre. SUN désigne une raie solaire non identifiée ©OP.*

Pour expliciter les diagnostics qu'on peut tirer des raies du spectre solaire, en sus de la température, nous allons nous restreindre au domaine visible. Les quelques raies larges ont été attribuées par Fraunhofer à l'Hydrogène, Sodium, Calcium, Magnésium, etc... On a depuis découvert des milliers de raies fines d'éléments variés grâce au développement des techniques spectroscopiques. Ainsi, le spectre du Jungfraujoch (3450 m d'altitude) pris par l'Université de Liège au centre du disque présente une résolution fantastique de 0.0002 nm en longueur d'onde ! L'analyse du profil ou de la forme des raies (décalage, élargissement, dédoublement) permet de faire des diagnostics sur les mouvements de matière et les champs magnétiques. Ces paramètres sont essentiels pour modéliser les phénomènes solaires à l'aide des équations de la physique. Mais comment mesure t-on la vitesse et le champ magnétique dans l'atmosphère solaire ?

## 2.2 L'effet Doppler et la mesure des vitesses

Lorsqu'un objet en mouvement émet une onde électromagnétique vers un observateur fixe, la fréquence de l'onde perçue par l'observateur change : sa fréquence augmente si l'objet se rapproche ; elle diminue si l'objet s'éloigne. Cette variation de fréquence est proportionnelle à la vitesse de l'objet. C'est l'effet découvert en 1848 par Christian Doppler (1803-1853) et Hippolyte Fizeau (1819-1896), valable non seulement pour les ondes électromagnétiques, mais aussi pour les ondes acoustiques dans la matière.

### L'effet Doppler Fizeau

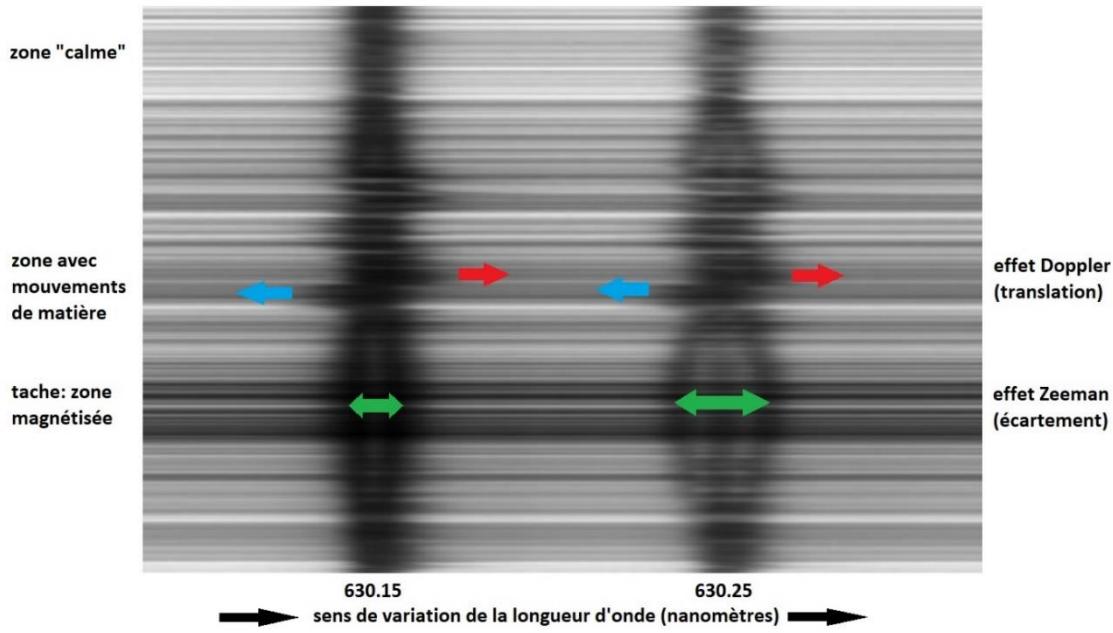
La variation de fréquence ( $v - v_0$ ) d'une onde électromagnétique de fréquence  $v_0$  émise par un objet en déplacement à la vitesse  $V$  est égale à  $[v_0 V / C]$ , où  $C$  est la vitesse de la lumière. Cette formule, valable quand  $V < 0.1 C$ , est l'approximation d'une autre plus complexe issue de la relativité restreinte.

L'effet Doppler est utilisé dans nombre d'applications pratiques, par exemple pour contrôler l'écoulement du sang en médecine, la vitesse des véhicules sur la route... On le perçoit naturellement en bout de piste d'un aéroport. Un avion qui décolle à 300 km/h engendre une variation de fréquence sonore d'environ 25% : le son est plus aigu lorsqu'il vient vers vous, et plus grave lorsqu'il s'éloigne.

L'effet **Doppler** a permis à l'astronome américain Edwin Hubble (1889-1953) de découvrir l'expansion de l'Univers en observant un décalage vers le rouge des spectres des galaxies lointaines. On l'utilise en physique solaire pour mesurer la vitesse de la matière en déplacement. Les raies d'un spectre se décalent vers les petites ou grandes longueurs d'onde selon le sens du mouvement (approche ou éloignement). Cependant, cet effet ne donne accès qu'à la projection du mouvement sur la ligne de visée (ligne de l'observateur à l'objet). Les composantes du vecteur vitesse dans le plan du ciel nécessitent une analyse du mouvement propre des structures solaires, produisant une mesure indirecte, non instantanée et souvent imprécise car les structures se déforment dans le temps.

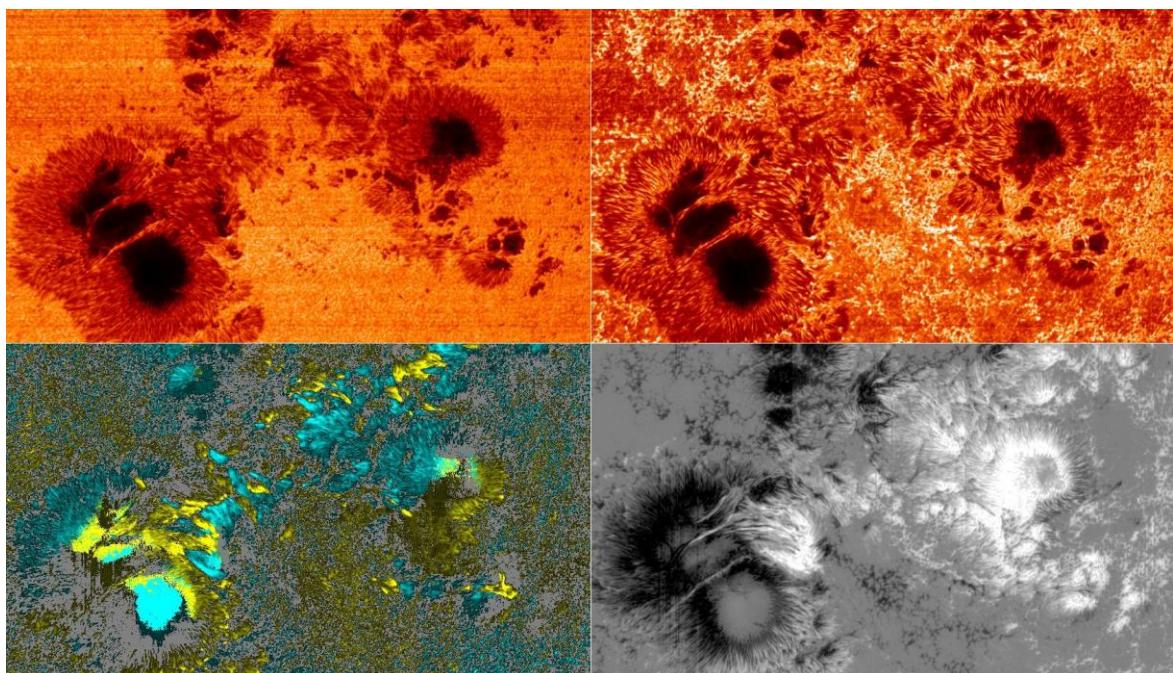
## 2.3 L'effet Zeeman et la mesure des champs magnétiques

En 1886, le physicien hollandais Pieter Zeeman (1804-1891) remarque que les raies spectrales d'un atome plongé dans un champ magnétique se scindent en deux ou trois composantes. Leur écartement en longueur d'onde est proportionnel au champ magnétique, ce qui autorise sa mesure. Cette découverte lui vaudra le prix Nobel en 1902. On peut donc déterminer les champs magnétiques à distance par leur effet sur les spectres atomiques du milieu qu'ils baignent. Les trois composantes du vecteur champ magnétique sont accessibles (à ceci près qu'il subsiste une incertitude de 180° sur la direction dans le plan du ciel) ; c'est la spécialité du télescope THEMIS du CNRS aux Canaries.



*Exemple d'effet Zeeman sur deux raies du Fer dans une tache de champ magnétique intense. L'effet se caractérise par un écartement des composantes: la longueur des flèches **vertes** est proportionnelle au champ magnétique. On distingue aussi l'effet Doppler sur des zones non magnétisées, caractérisé par une translation des raies (flèches **rouges** et **bleues**). La longueur d'onde croît de gauche à droite (satellite Hinode, JAXA/NASA/ESA).*

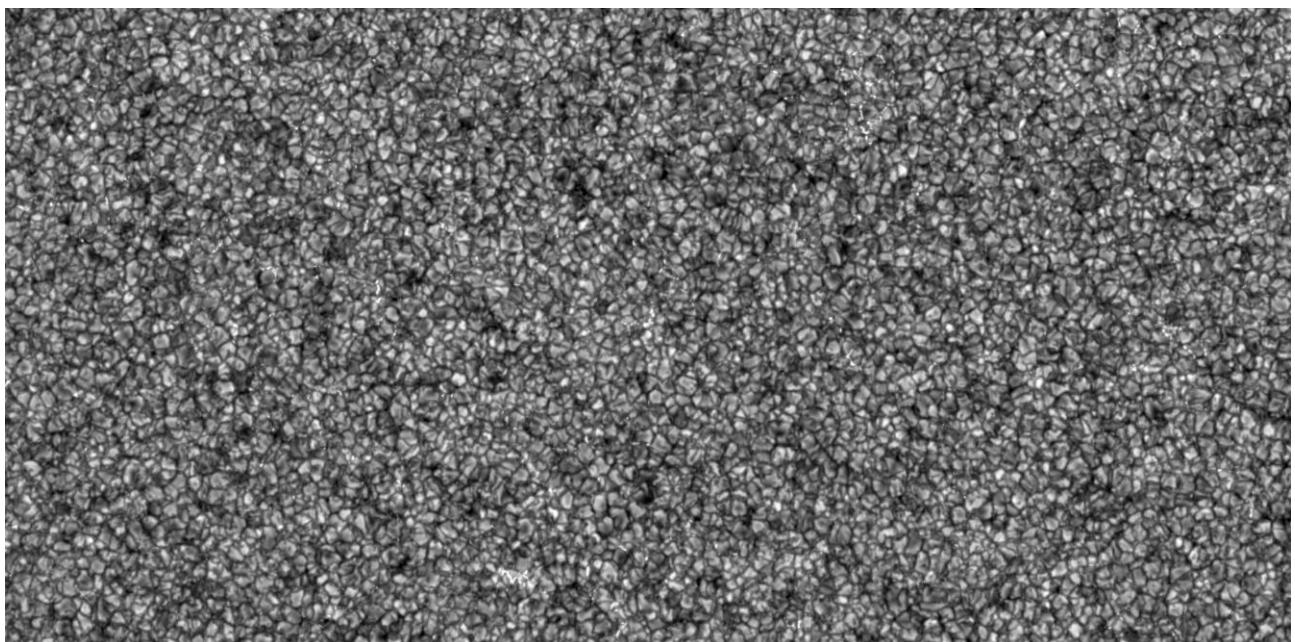
Les effets **Doppler** et **Zeeman** sont en réalité toujours présents simultanément : leur mesure produit des dopplergrammes (cartes des mouvements d'approche et d'éloignement) et des magnétogrammes (cartes des champs magnétiques de polarités Nord et Sud).



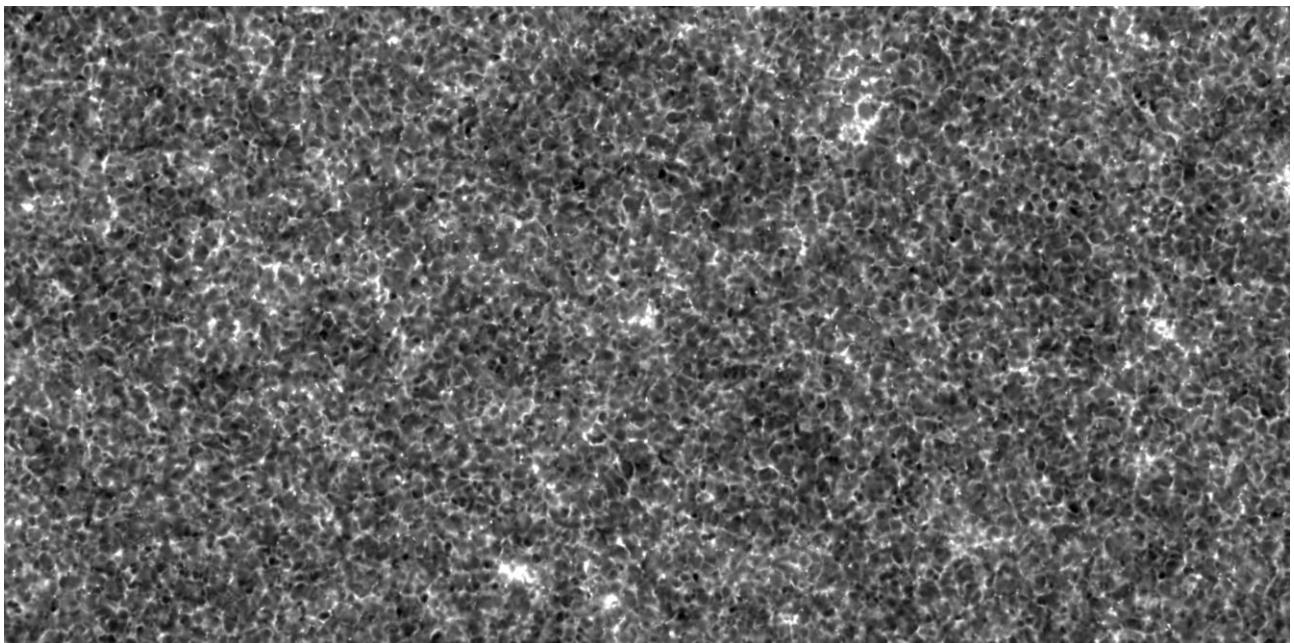
*Résultat d'observations spectroscopiques d'une tache solaire par l'instrument Hinode/SP - JAXA/NASA/ESA : en haut, intensités à deux altitudes distantes de 100 km; en bas à gauche, un dopplergramme (mouvement d'approche en bleu et d'éloignement en jaune); en bas à droite, un magnétogramme (champ magnétique sortant ou polarité Nord en blanc, entrant ou polarité Sud en noir). La largeur du champ représente 190 000 km ou environ 14 fois le diamètre terrestre (la Terre a la taille d'une petite tache).*

### 3 - Soleil calme

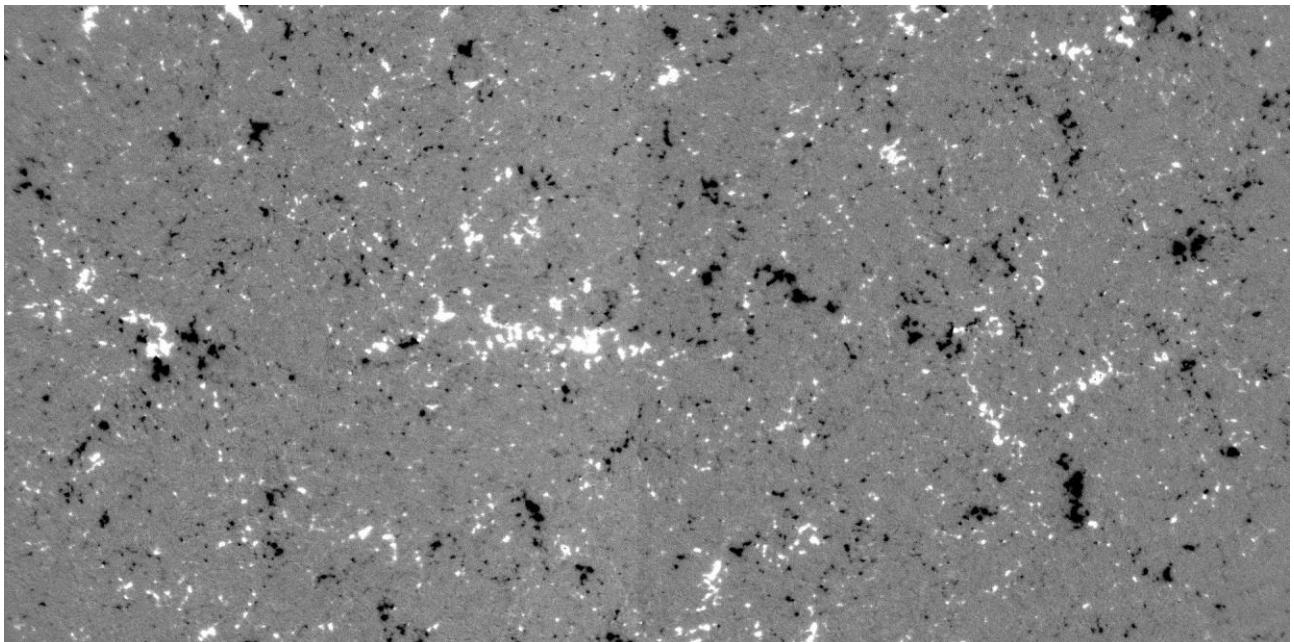
L'atmosphère solaire dite « calme » se trouve loin des taches ou des régions actives magnétisées. Elle couvre la majeure partie du Soleil. Que montre la photosphère « calme », fine couche constituant la surface du Soleil ? Comme elle se situe juste au dessus de la zone convective (qui est invisible), on y découvre la trace de mouvements convectifs: la granulation. Chaque granule possède la taille de la France (1000 km); la matière y est montante au centre et descendante à sa périphérie à la vitesses de 1 km/s. Les meilleures observations ont été faites par le télescope Hinode (SOLAR B) dans une bande spectrale étroite des molécules CH ou CN. Les détails les plus fins font 150 km. Dans les espaces intergranulaires (sombres), on distingue une myriade de points brillants éparpillés et non résolus, parfois regroupés en rubans: il s'agit de la signature de tubes minces de champ magnétique intense, plus de 0.1 Tesla. Ainsi, le Soleil est uniformément couvert de granules et de fins tubes magnétiques. Comprendre ces champs concentrés est un sujet de recherches actif, qui progressera encore avec SOLAR C et EST vers 2025, grâce à leur résolution inédite de 50 km. On espère élucider les mécanismes de formation et le rôle de ces tubes.



*Photosphère « calme » au centre du disque à 430 nm, bande passante 0.7 nm ; le champ fait 10% du Soleil dans sa largeur et 5% du Soleil dans sa hauteur. Résolution 150 km. Hinode/BFI - JAXA/NASA/ESA. La surface est couverte de granules (taille élémentaire 1000 km) et de points brillants, des tubes magnétiques.*



Chromosphère « calme » au centre du disque dans la raie H du Calcium à 397 nm, bande passante 0.3 nm ; le champ se superpose exactement à celui de l'image précédente et révèle la granulation à plus haute altitude. Les zones magnétisées (points blancs) sont renforcées car les tubes magnétiques s'évasent au fur et à mesure que l'on s'élève. Résolution 150 km. Hinode/BFI-JAXA/NASA/ESA.



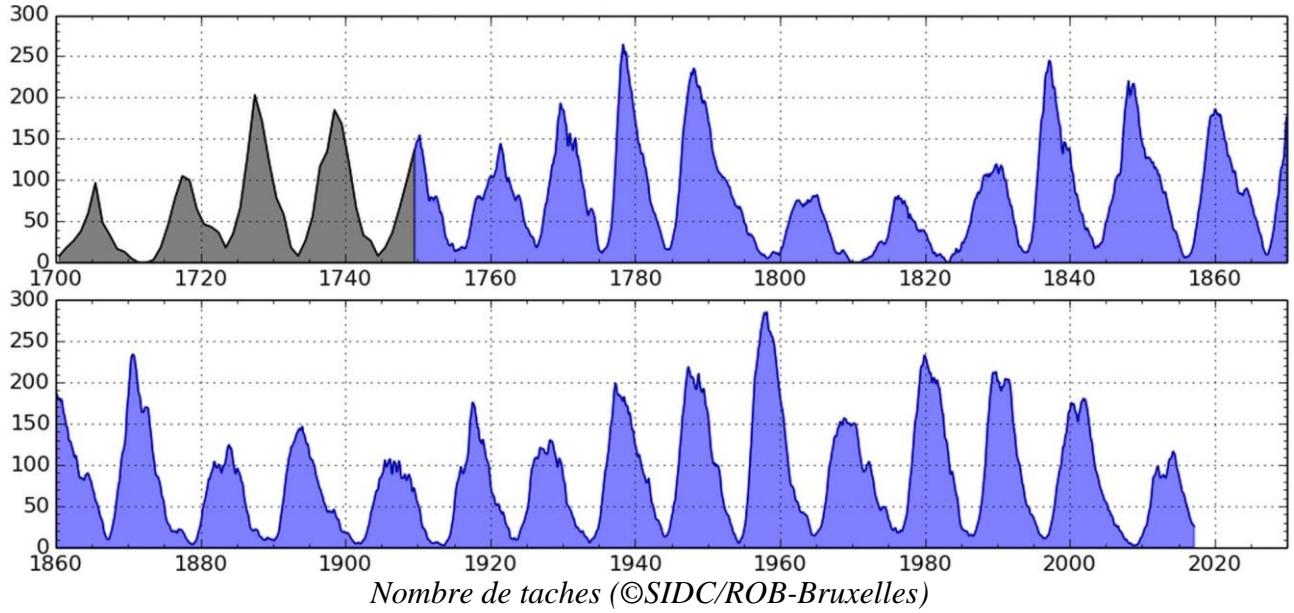
Les champs magnétiques du Soleil « calme » vus par effet Zeeman. Les polarités Nord (champ sortant) sont en blanc et Sud (champ entrant) en noir. La résolution, qui n'est que de 300 km, soit deux fois moins bonne que les images, révèle la présence de cellules magnétiques accolées, de contours variables, non fermées. Elle forment un réseau régulier appelé « supergranulation ». Les « supergranules » ont pour dimension moyenne 30 000 km. Leur formation proviendrait du transport des tubes magnétiques intra cellules par des flots horizontaux. Hinode/NFI- JAXA/NASA/ESA.

#### 4 - Le cycle solaire

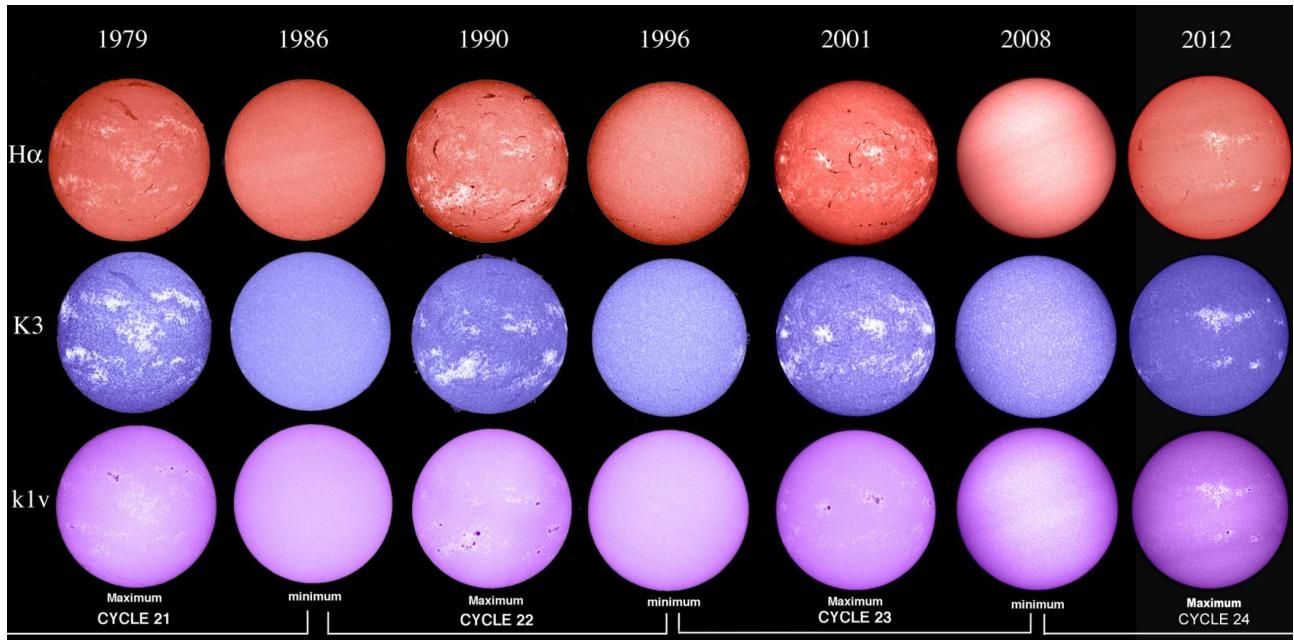
Nous n'avons pas conscience, dans notre vie courante, que le Soleil est une étoile variable ; et pourtant, certains phénomènes n'ont pas fini de nous surprendre.

## 4.1 Le cycle des taches

Les taches et groupes de taches sont comptés par le service « Solar Influences Data Center » (SIDC) de l'Observatoire Royal de Bruxelles. On dispose d'observations régulières depuis 1700 et plus sporadiques avant.



On constate une succession de pics espacés de 11 ans en moyenne (cela peut varier entre 10 et 12.5 ans) : c'est le cycle de Schwabe. Entre les minima et maxima, le Soleil se couvre de régions actives parfois étendues ainsi que le montrent les observations de Meudon.

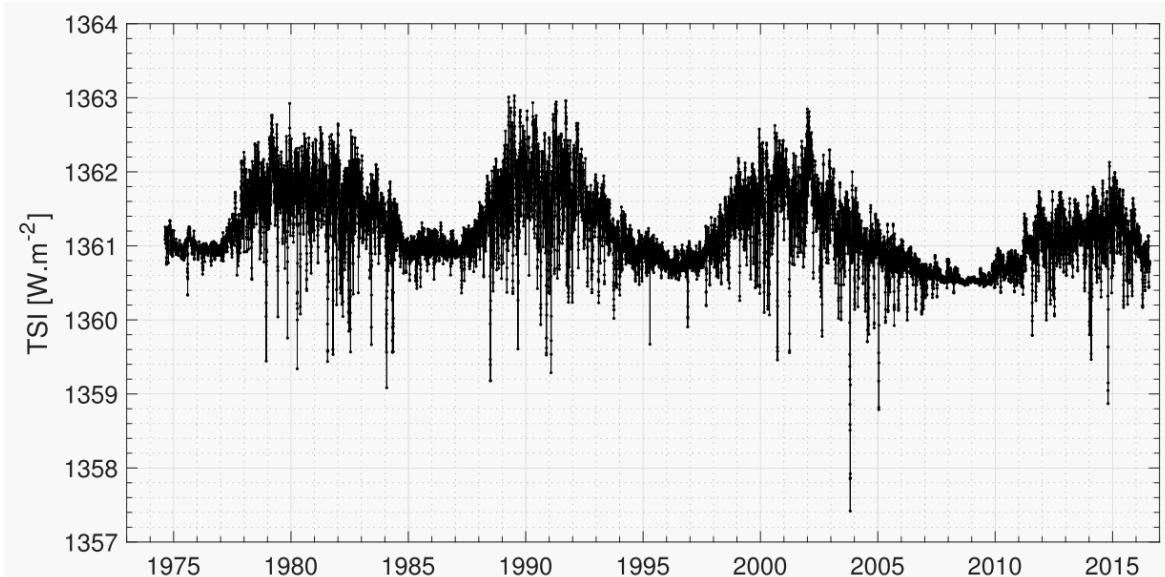


*Succession de maxima (1979, 1990, 2001, 2012) et de minima solaires (1986, 1996, 2008).*  
©OP/Meudon.

Le dernier maximum a eu lieu en 2013. Le temps de montée des cycles est de 4 ans alors que celui de descente est de 7 ans. L'amplitude des pics n'est pas du tout constante, car il existe une modulation plus ou moins centennale appelée cycle de Gleissberg avec des séries de cycles faibles,

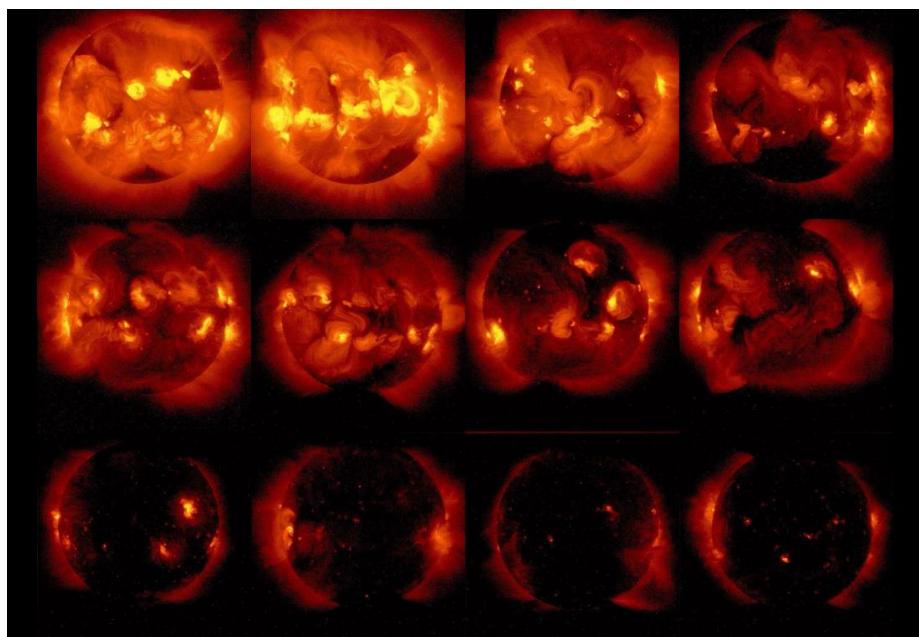
les « grands minima ». On les observe avant 1700 sous Louis XIV, vers 1810 sous Napoléon, vers 1900 à la Belle Epoque. On se dirige vers un grand minimum autour de 2030.

Le cycle solaire module l'irradiance totale du Soleil mesurée en orbite : c'est la puissance reçue par la Terre hors atmosphère par mètre carré, tous rayonnements confondus ; elle est maximale aux maxima du cycle solaire, ce qui peut paraître étrange puisque les taches sombres sont plus nombreuses. Mais la baisse de luminosité due aux taches est plus que compensée par des régions brillantes et étendues autour, qu'on appelle facules. Entre les minima et maxima, la variation n'est que de 1 W/m<sup>2</sup> sur 1362 W/m<sup>2</sup>, soit moins d'un millième.



*Le cycle solaire en irradiance totale hors atmosphère est bien corrélé avec le cycle des taches (©M. Meftah, LATMOS/CNRS).*

L'irradiance spectrale (dans un domaine restreint du spectre électromagnétique) en UV a un impact important sur la haute atmosphère. Son comportement suit l'irradiance totale, mais les fluctuations sont bien plus grandes, de l'ordre de 3%. Et dans le domaine des rayons X, la cyclicité est proche de 100%, toujours en phase avec le cycle des taches !



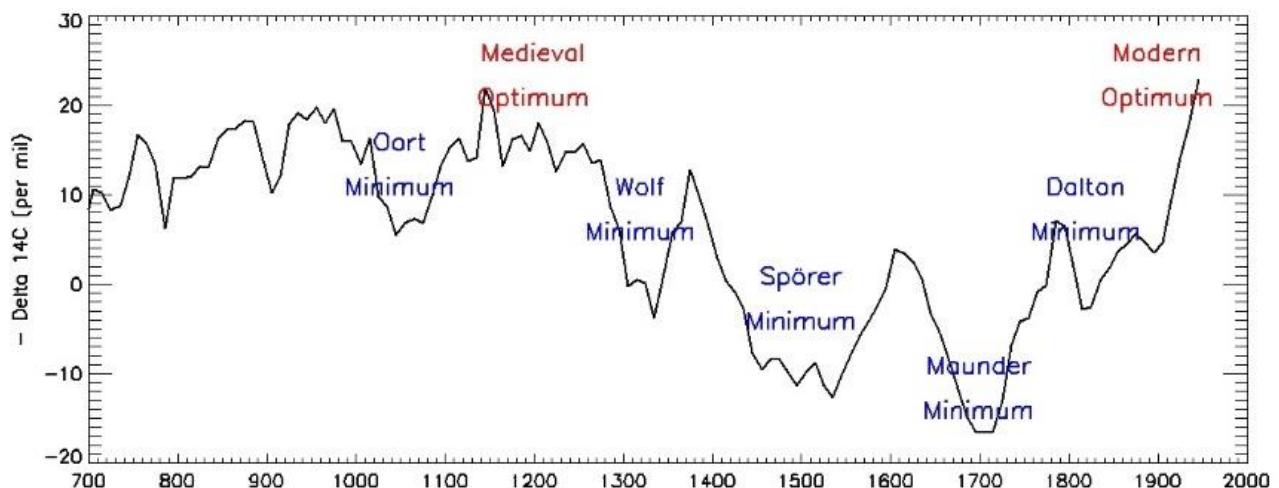
*Le cycle solaire en rayons X (©Yohkoh SOLAR A/JAXA) du maximum de 1990 au minimum de 1997.*

## 4.2 Les grands minima du millénaire

On sait reconstituer l'activité solaire sur le long terme (quelques milliers d'années) à l'aide d'un isotope « cosmogénique ». De quoi s'agit-il ? L'atmosphère de la Terre est sans cesse bombardée par les « rayons cosmiques », et les collisions avec les molécules provoquent l'apparition d'isotopes (atomes possédant le même nombre de **protons** mais pas de **neutrons**). Ainsi, le Carbone 12 (6 protons + 6 neutrons) peut se transmuter en Carbone 14 (6 protons + 8 neutrons) instable dont le temps moyen de désintégration est de 5000 ans. On l'utilise pour la datation de tissus biologiques morts, le pourcentage de C14 par rapport au C12 décroissant avec le temps. Lors des maxima solaires, la Terre est moins impactée par les particules cosmiques à cause de la recrudescence du champ magnétique solaire dans le milieu interplanétaire. Ainsi, on retrouvera moins de C14 dans les cernes des troncs d'arbres (qui fixent le gaz carbonique CO<sub>2</sub>) lors des maxima solaires. Cette technique a permis de mettre en évidence quatre grands minima successifs profonds : Wolf, Spörer, Maunder, Dalton entre 1300 et 1850, le plus remarquable étant le minimum de Maunder à l'époque du roi Soleil.

### Les rayons cosmiques

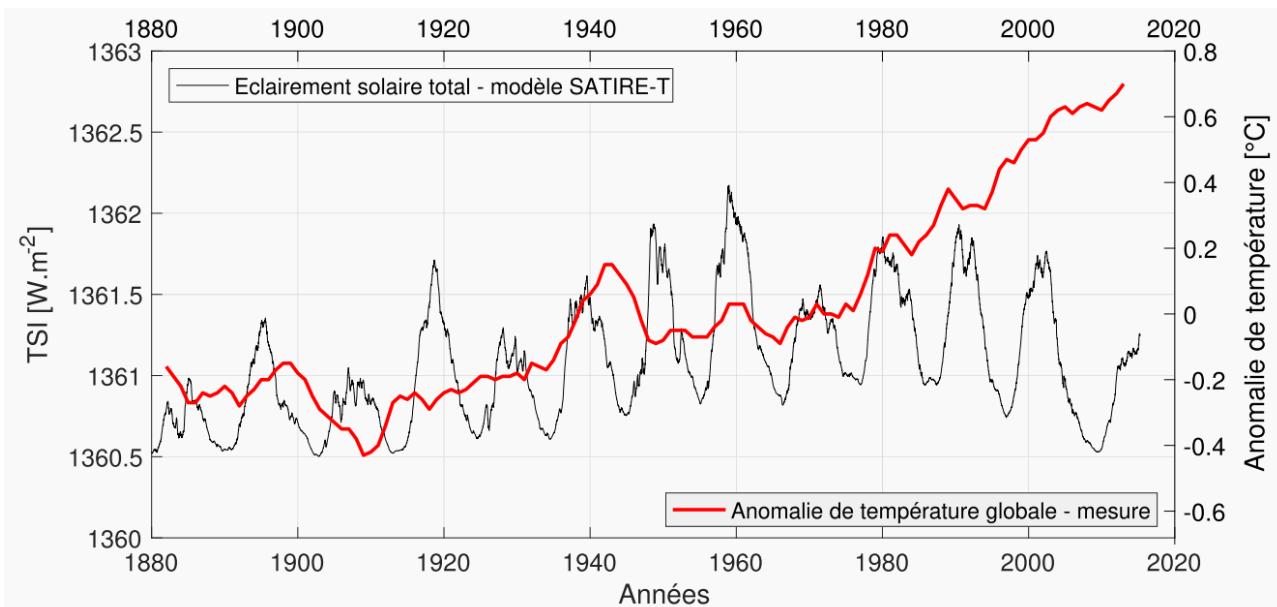
Ce ne sont pas des rayons, mais des particules chargées de très haute énergie (protons, noyaux) accélérés dans notre galaxie par des phénomènes violents (explosions d'étoiles ou supernovae) à des vitesses proches de la lumière (300 000 km/s). Lorsque le champ magnétique se renforce sous l'action du Soleil, le flux de rayons cosmiques décroît car ceux-ci sont déviés.



*Grands minima d'activité solaire relevés par l'isotope cosmogénique C14 (©OP)*

Cette période longue de 5 siècles correspond au petit âge glaciaire, où la température moyenne était inférieure à notre époque d'à peine un degré. Comme on sait que l'irradiance solaire est atténuée en période de minimum, une baisse prolongée de l'activité solaire a pu contribuer au refroidissement climatique. Les modèles montrent une assez bonne corrélation entre l'activité solaire et la température jusqu'en 1980 ; après, il y a divergence, sans doute en raison de l'accumulation de gaz à effet de serre.

Cependant, les grands minima solaires du petit âge glaciaire peuvent se conjuguer à d'autres causes en termes d'effets climatiques. On sait que le volcanisme opacifie l'atmosphère en raison des poussières qu'il y injecte, mais il faut pour cela de puissances éruptions, dites « méga colossales », pour répandre des centaines de km<sup>3</sup> de poussière de manière durable autour du globe et l'assombrir. Or il y en a eu deux en Indonésie dans la période qui nous intéresse, une au début (Samalas, 1257) et une à la fin (Tambora, 1815), lors des minima de Wolf et de Dalton. Par contre, il n'y a pas eu d'éruption de cette intensité aux minima de Spörer et de Maunder.

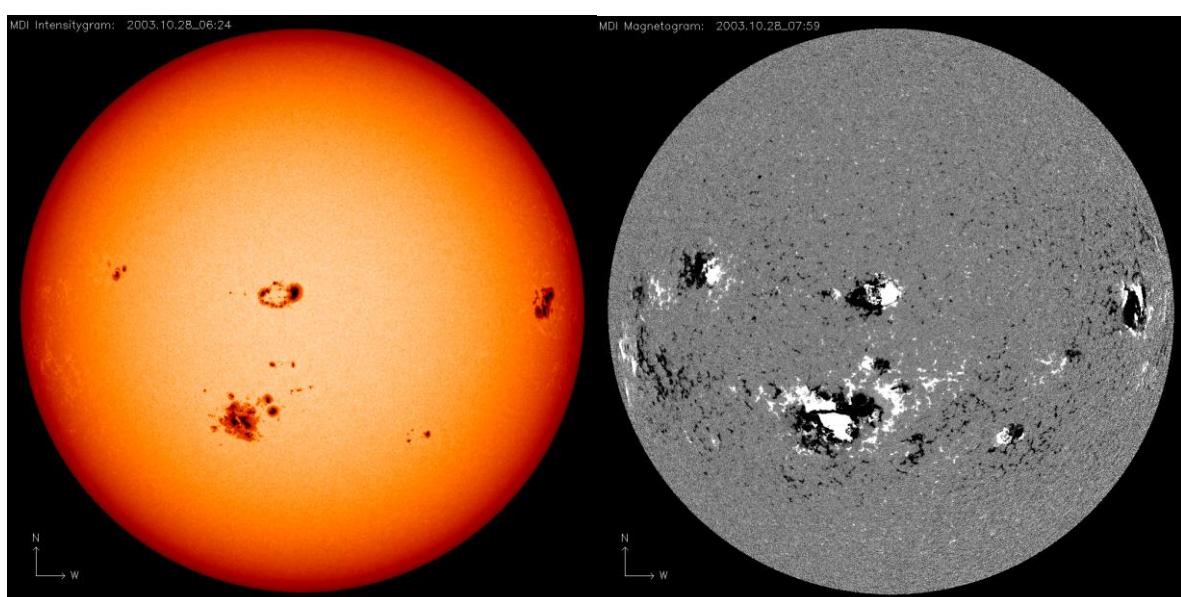


*Anomalie de température terrestre et irradiance solaire (modèle SATIRE) : depuis 1980, l'irradiance décroît alors que la température monte (©M. Meftah, LATMOS/CNRS).*

## 5 - Le magnétisme solaire

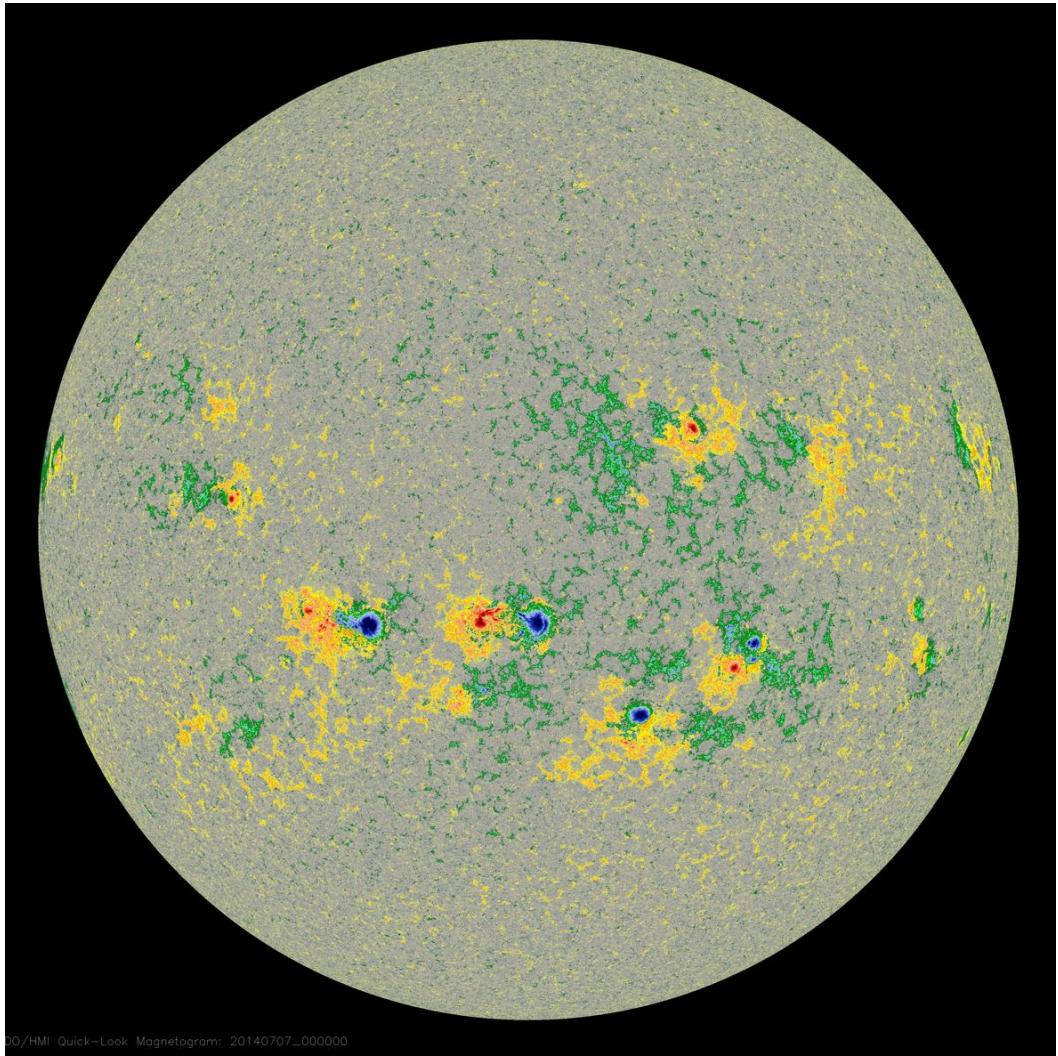
Les taches sont la manifestation la plus évidente des **champs magnétiques** solaires. Mais le cycle magnétique n'est pas de 11 ans, il est du double !

### 5.1 cyclicité magnétique



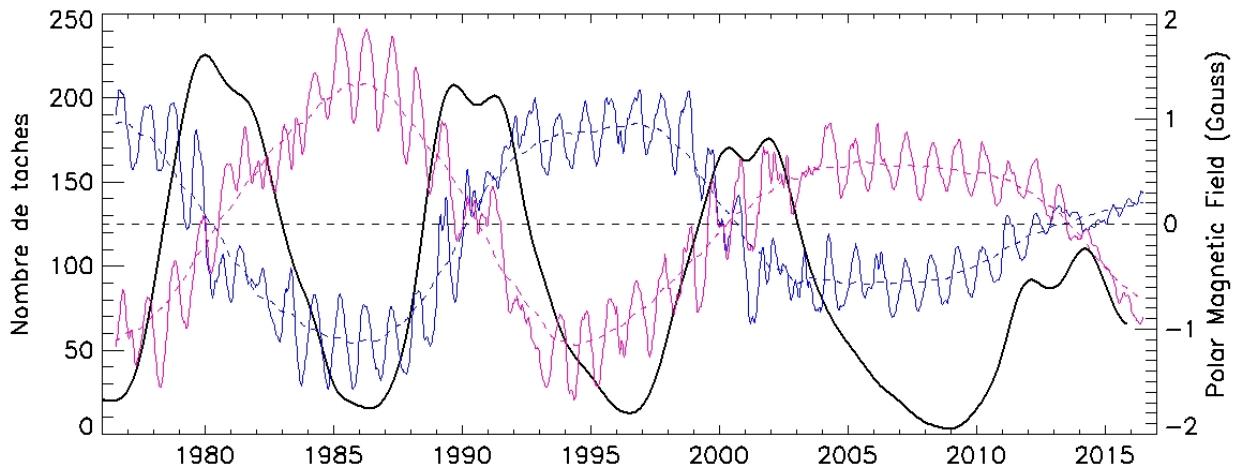
*Observations de SOHO/MDI : à gauche les groupes de taches observés le 23 Octobre 2003, à droite les polarités magnétiques sortantes (en blanc) et entrantes (en noir). Les groupes de taches de l'hémisphère Nord sont bipolaires ; le groupe étendu de l'hémisphère Sud est plus complexe. Remarquer le renversement de l'ordre des polarités entre les deux hémisphères. Au Nord, les polarités sortantes (blanches) sont en tête ; c'est l'opposé dans l'hémisphère Sud. Cette situation se renverse tous les 11 ans. ESA/NASA.*

L'astronome américain George Hale (1868-1938) comprit en 1908 la nature magnétique des taches en y détectant la signature de l'effet Zeeman. Les taches sont le plus souvent organisées en groupes bipolaires (une polarité sortante ou Nord, entrante ou Sud), parfois plus complexes. Hale constata que l'ordre des polarités au sein des groupes bipolaires est toujours inversé entre les deux hémisphères, entre la tache de tête (la première dans le sens de rotation vers la droite) et la tache de queue. Il s'aperçut aussi que d'un cycle à l'autre, cet ordre se renverse, c'est-à-dire que le cycle magnétique du Soleil n'est pas de 11 ans, mais de 22 ans.

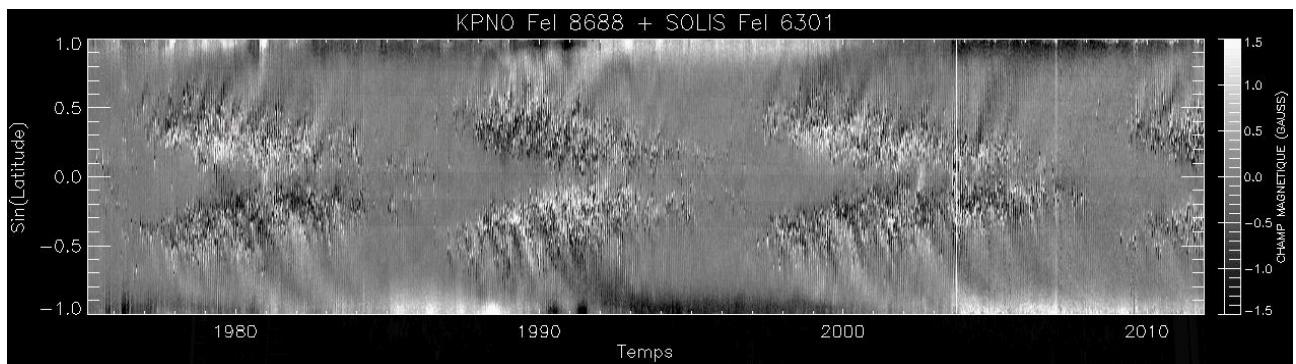


*Magnétogramme à haute résolution du 7 Juillet 2014 (les polarités magnétiques entrantes ou sortantes sont représentées en vert/bleu et jaune/rouge). Les champs les plus intenses sont ceux des taches (bleu/rouge). Autour des taches, on trouve de vastes régions magnétisées, de même polarité, les « plages », où le champ est plus faible (jaune/vert). L'instrument HMI cartographie les champs magnétiques toutes les minutes, ce qui permet de suivre en permanence l'évolution du magnétisme des régions actives (HMI/SDO-NASA).*

Le cycle magnétique magnétique de 22 ans apparaît clairement en examinant les champs polaires mesurés par l'observatoire Wilcox aux USA. Aux pôles, les champs s'inversent toujours lors du maximum d'activité solaire, au moment où le nombre de taches est le plus grand. La dernière inversion remonte à 2013. On remarque aussi une décroissance des champs depuis 30 ans, en même temps qu'un affaissement du cycle des taches (les maxima de 1980, 1991, 2002, 2013 sont de plus en plus faibles), ce qui indique que le Soleil entre dans une période de grand minimum, en accord avec la période plus ou moins centennale de modulation des cycles. L'irradiance, en léger recul puisqu'elle suit le cycle des taches, va à l'encontre du réchauffement climatique actuel.



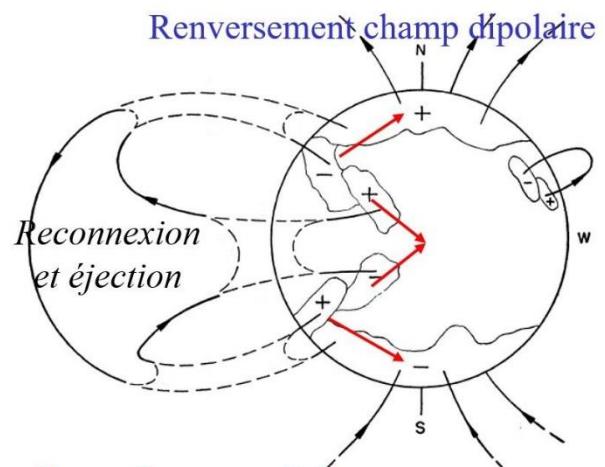
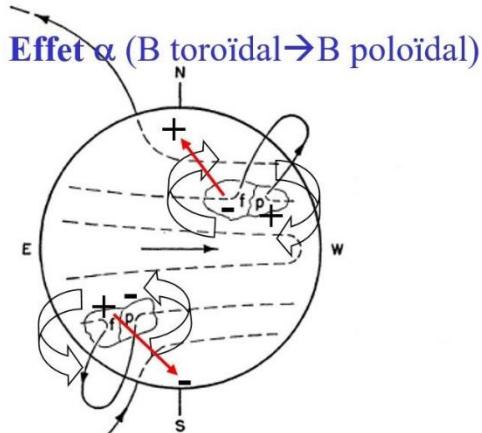
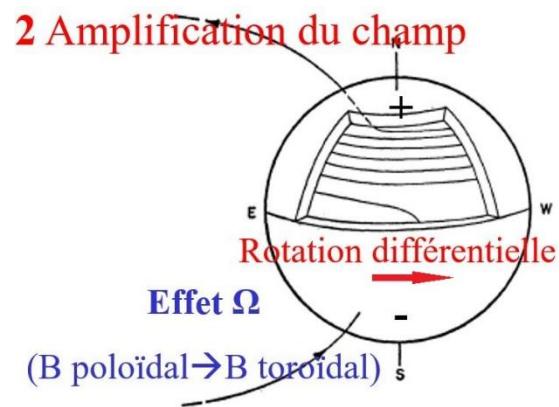
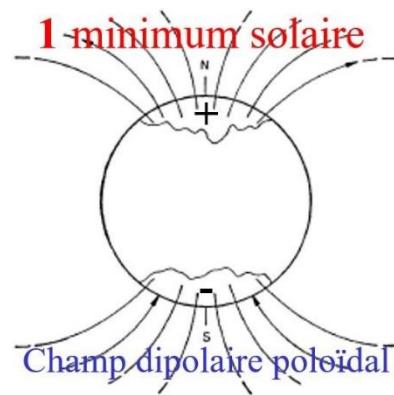
*Champs magnétiques des pôles Nord et Sud du Soleil (en bleu et rouge), et leur corrélation avec le cycle des taches (nombre de taches en noir). Données Wilcox et SIDC/Bruxelles.*



*Carte synoptique (temps en abscisse, sinus de la latitude en ordonnée) des champs magnétiques solaires (données de Kitt Peak National Observatory). Pôle Nord en haut, Sud en bas. Remarquer les polarités opposées des pôles solaires et leur inversion aux maxima solaires (1980, 1991, 2002). Aux latitudes modérées, entre  $-45^\circ$  et  $+45^\circ$ , les « ailes de papillon » sont la signature des taches. Celles-ci naissent aux latitudes élevées dans la phase de montée des cycles, et se forment plus près de l'équateur pendant la descente.*

## 5.2 La dynamo solaire

La dynamo est le mécanisme qui explique les inversions magnétiques du Soleil tous les 11 ans, et donc le cycle de 22 ans. Cette inversion se fait en plusieurs étapes. Au minimum solaire, le champ magnétique général du Soleil ressemble à celui d'un dipôle, par exemple celui d'un aimant d'axe Nord Sud. Le champ entre et sort par les pôles, on dit qu'il est « poloïdal » (étape 1). La rotation différentielle, plus rapide à l'équateur qu'aux pôles, déforme les lignes de champ et génère une composante dite « toroïdale », de type équatoriale Est Ouest. C'est l'effet « oméga » (étape 2). L'étape 3 est plus complexe. Les champs magnétiques accumulés sous la surface subissent la poussée d'Archimède et émergent en formant des groupes de taches bipolaires. La tache de tête (dans le sens de rotation vers la droite) a la même polarité que le pôle de son hémisphère. Ces groupes vont pivoter sous influence de la force de Coriolis dans le sens des anticyclones, orientant les polarités opposées de la tache de queue vers les pôles, vers lesquels elles vont dériver sous l'influence de la circulation méridienne. Au maximum solaire (étape 4), l'annihilation de la polarité des pôles survient, conduisant à un nouveau champ « poloïdal » de sens inverse (effet « alpha »). Le maximum va s'accompagner d'une recrudescence de l'activité avec expulsion de nuages magnétisés nommés « éjections de masse coronale ». Il peut y en avoir plusieurs par jour !



### 3 Émergence du nouveau champ

### 4 maximum solaire

*Principe de l'effet dynamo (OP)*

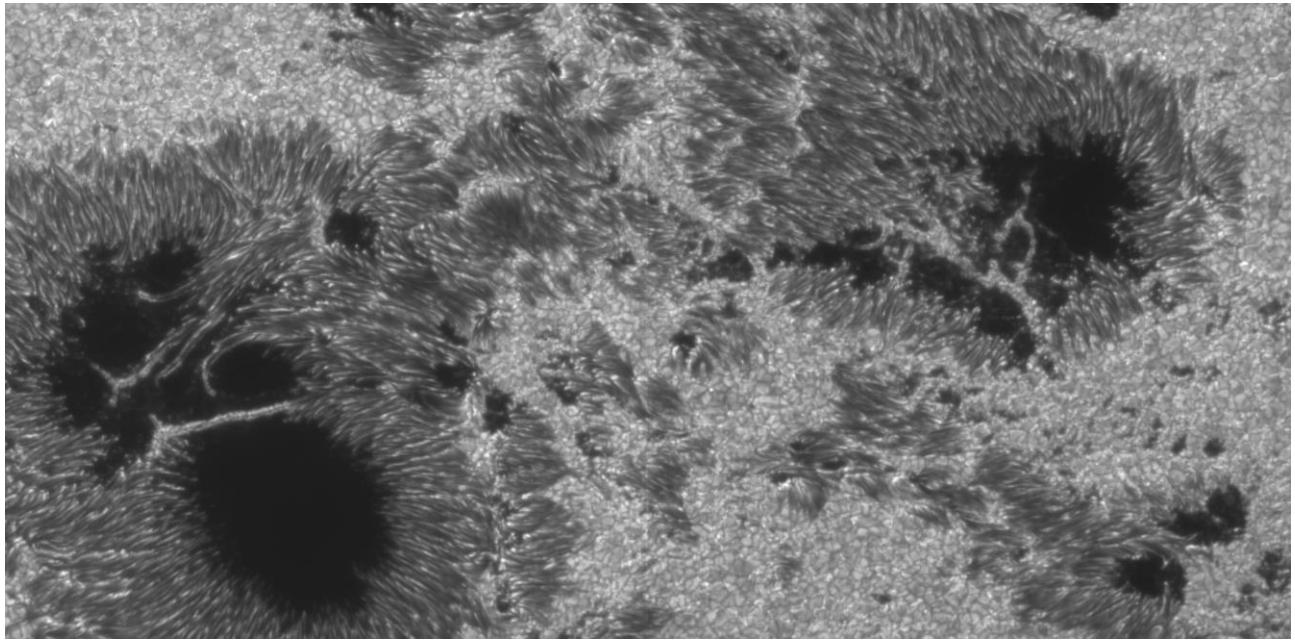
#### La force de Coriolis

Cette force agit sur un objet en déplacement dans un référentiel animé d'un mouvement de rotation, comme l'atmosphère du Soleil, d'une planète ou de la Terre. Sur Terre, la force de Coriolis est responsable du sens des vents autour d'une dépression (zone de faible pression) ou d'un anticyclone (hautes pressions). Dans l'hémisphère Nord, le vent tourne dans le sens horaire autour d'un anticyclone. C'est l'inverse dans l'hémisphère Sud.

## 6 - Les taches et boucles, manifestation du magnétisme

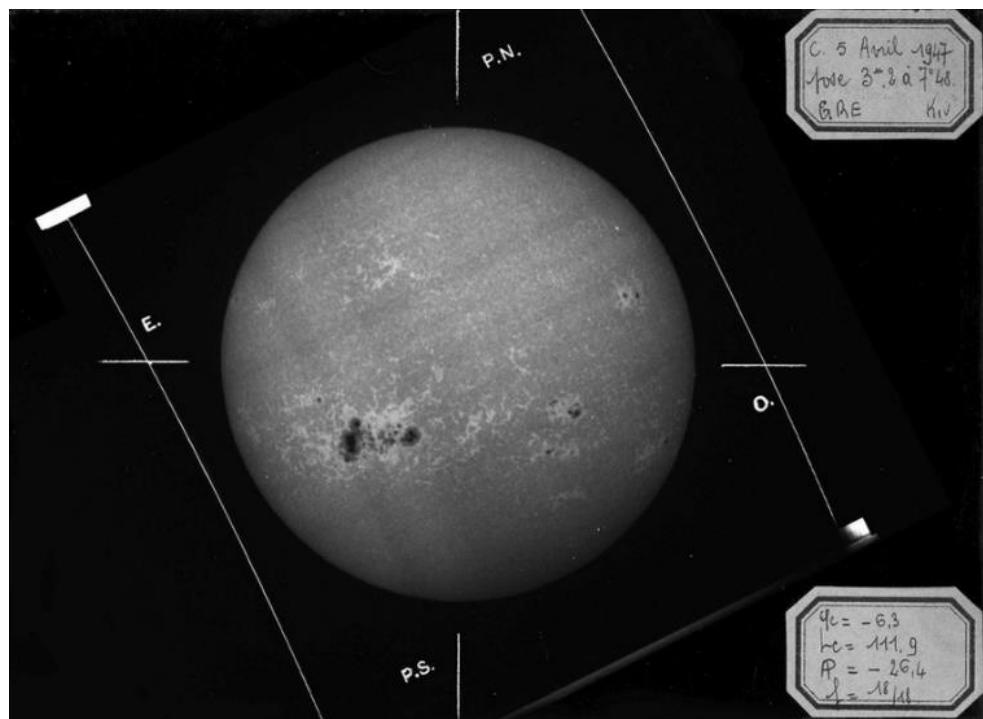
Les taches incarnent le magnétisme solaire de surface. Mais il existe aussi de grandes boucles de champ magnétique en altitude ! Dans les taches, le champ est de 0.1 Tesla en moyenne, avec un maximum de 0.25. Dans « l'ombre » d'une tache, le champ magnétique est proche de la verticale. Comme il isole thermiquement le gaz en formant une « barrière », il y fait plus « froid » que dans le milieu environnant (4500 degrés au lieu de 6000), c'est pourquoi les taches sont plus sombres. Autour de « l'ombre », les champs magnétiques sont plus faibles, très inclinés et forment la « pénombre ». Les taches sont organisées en groupes bipolaires ou plus complexes, qu'on appelle « régions actives ». En altitude, les observations UV révèlent la présence de grandes boucles magnétiques qui les relient et s'élèvent dans la couronne à plus de 100 000 km d'altitude. Le plasma de ces boucles est confiné et chaud (plus d'un million de degrés). Le champ magnétique y joue en quelque sorte le rôle de « tuyaux » canalisant les mouvements de matière : il n'est pas rare d'assister dans ces boucles à des mouvements de vidange ou de siphon notamment lors des éruptions. Les régions actives évoluent au cours du temps, en l'espace de quelques jours à quelques semaines, jusqu'à leur

disparition par diffusion des champs magnétiques. Cependant, leur vie peut être secouée par des phénomènes éruptifs (*chapitre 3*).

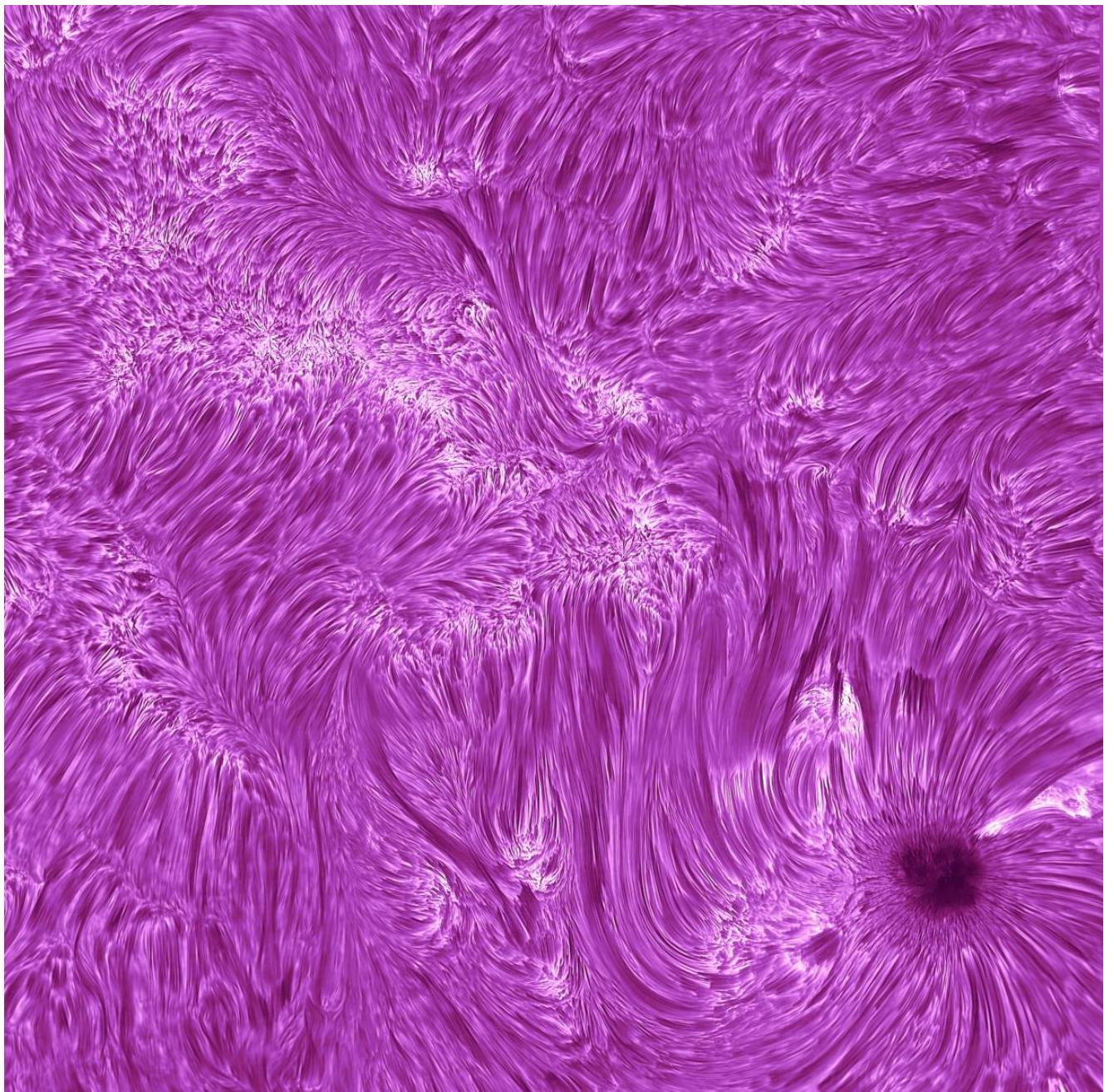


*Taches observées par le satellite Hinode (©JAXA/NASA/ESA) à 388 nm en UV (bande CN). La largeur du champ est ici de 165 000 km, soit 13 fois le diamètre terrestre, ou encore celui de Jupiter. Les champs magnétiques se concentrent dans les zones les plus noires appelées « ombre ».*

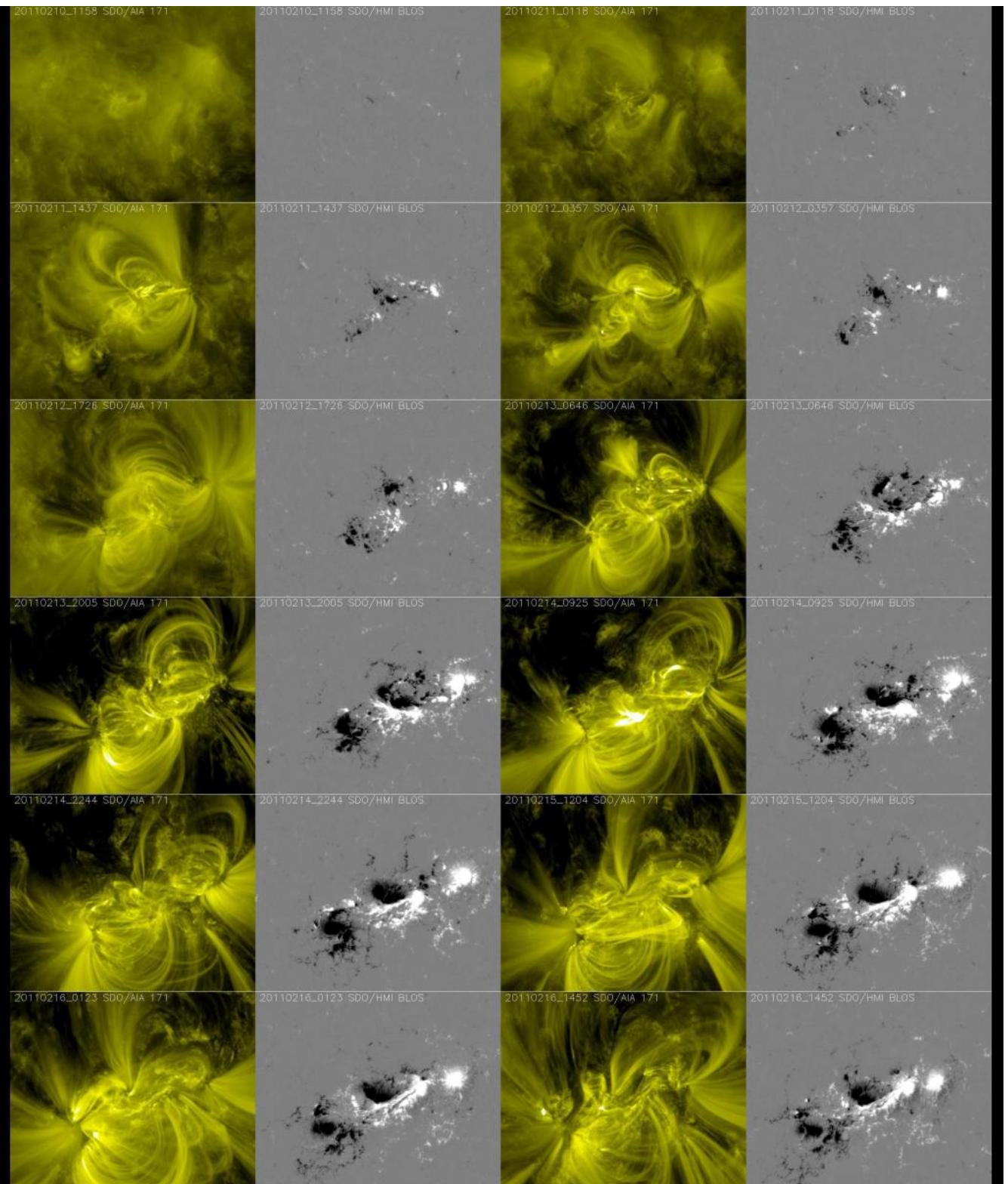
Le plus gros groupe de taches jamais enregistré remonte à Avril 1947, il occupait alors 0.6% de la surface totale du Soleil, alors qu'en moyenne un groupe ne dépasse que rarement 0.2% de la surface. Les taches sont généralement entourées de zones brillantes et plus chaudes que le milieu environnant, les « facules » ou « plages » : ce sont des régions magnétisées étendues, mais les champs y sont 5 fois plus faibles que dans les taches. On les distingue bien sur le cliché 1947 et le magnétogramme du 7 Juillet 2014.



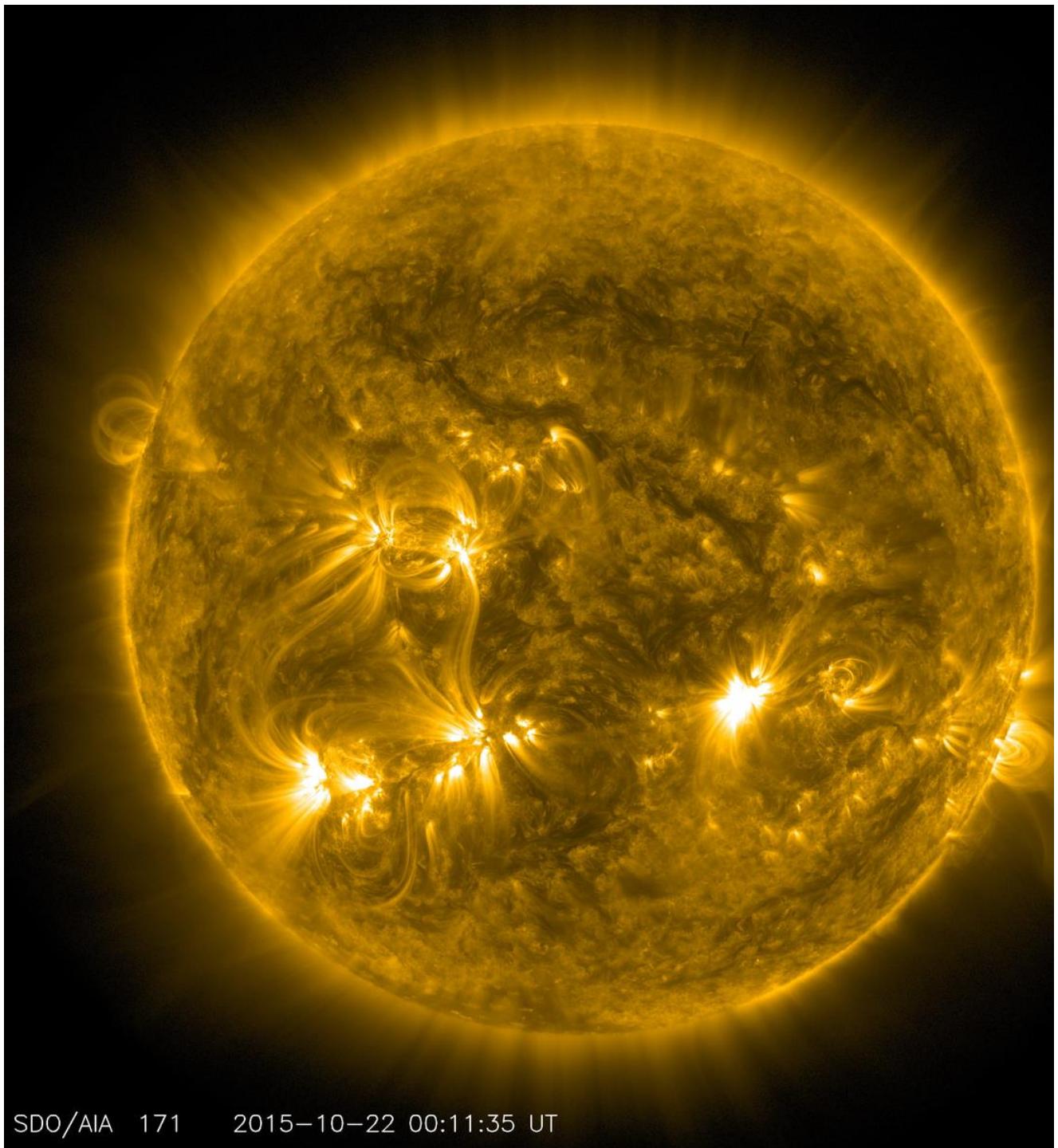
*Cliché du 5 Avril 1947 montrant le plus gros groupe de taches jamais photographié (©OP).*



Tache solaire observée dans la raie H $\alpha$  de l'Hydrogène à 656 nm au télescope américain Dunn de Sacramento Peak (USA) à l'aide du filtre IBIS de l'observatoire d'Arcetri à Florence (©K. Reardon, NSO/INAF, 2011). La tache (en bas à droite) a les dimensions de la Terre. Remarquer la structure filamenteuse caractéristique de la chromosphère au dessus de la photosphère.

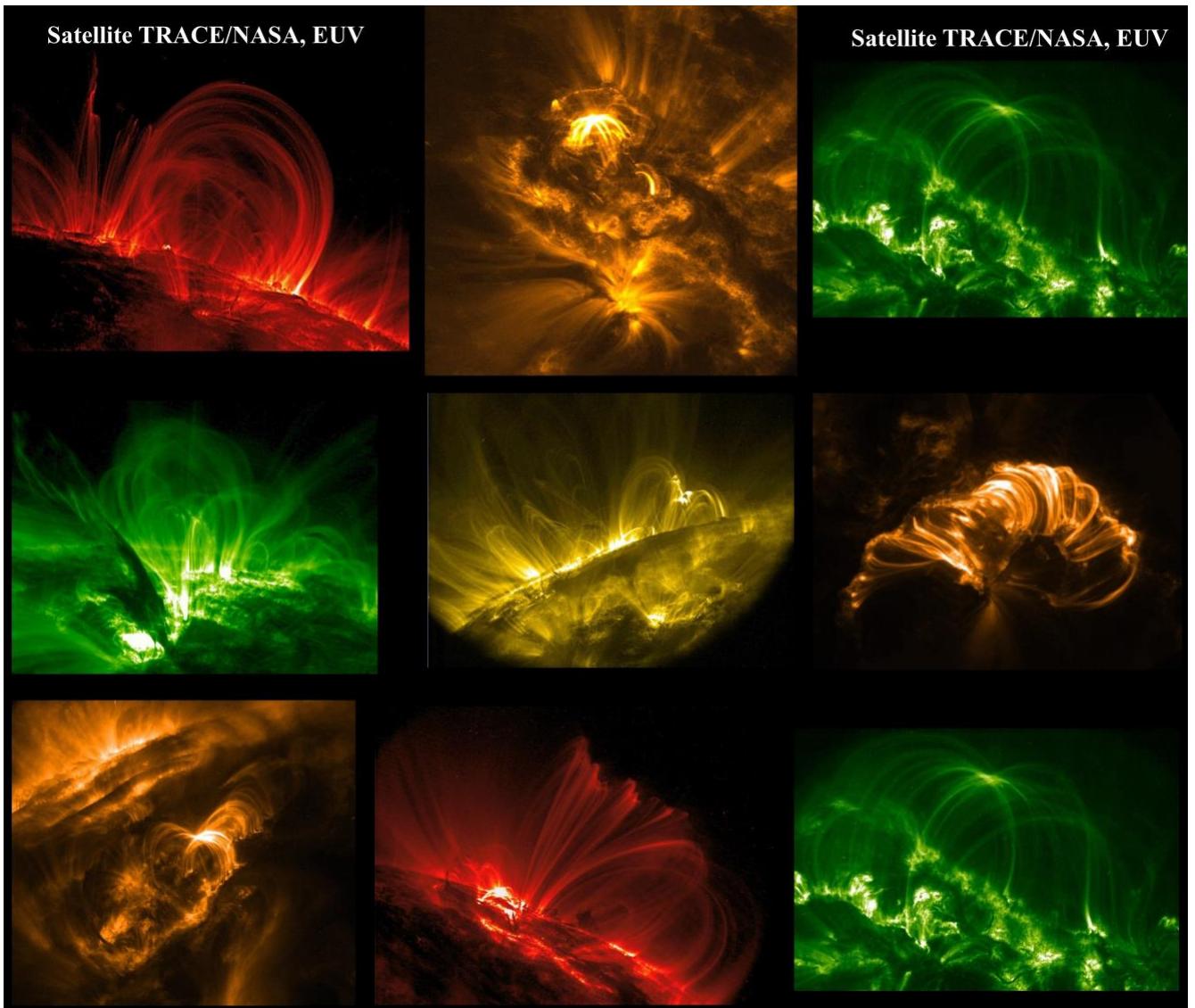


*Le Soleil est hautement dynamique ! La naissance d'une région active solaire entre les 10 et 16 Février 2011 (le temps progresse de gauche à droite et de haut en bas). En noir et blanc, les polarités magnétiques entrantes et sortantes. Au fur et à mesure que les champs magnétiques émergent, sous l'influence de la poussée d'Archimède, les boucles coronales (en jaune, un million de degrés) qui les surmontent se forment. La largeur du champ fait environ 15 diamètres terrestres (200 000 km). Remarquer la complexité magnétique finale avec deux zones bipolaires imbriquées. ©AIA et HMI, SDO/NASA.*



SDO/AIA 171      2015–10–22 00:11:35 UT

*Boucles magnétiques coronales chaudes (1 million de degrés) pouvant dépasser 100 000 km de hauteur. Les boucles relient les polarités magnétiques opposées au sein d'une même région active. Il existe parfois des grandes boucles (300 000 km) interconnectant des polarités opposées entre les deux hémisphères, c'est le cas à gauche de cette image du 22 Octobre 2015 en UV à 17.1 nm (AIA/SDO-NASA).*



**Boucles magnétiques solaires en Ultra Violet, Satellite TRACE / NASA, fausses couleurs**

Variété de boucles magnétiques coronales (1 à 2 millions de degrés), dont la hauteur dépasse 100 000 km. Les champs magnétiques décroissent en altitude, car les boucles s'évasent (11). Observations UV du satellite TRACE de la NASA dont la mission est achevée (Transition Region And Coronal Explorer). Fausses couleurs.

#### L'évasement des boucles magnétiques en altitude

Les champs magnétiques sont gouvernés par les lois de l'électromagnétisme, qui prévoient que le produit de la section d'un tube magnétique par son intensité est constante. Comme les champs magnétiques diminuent avec l'altitude, tout comme la pression gazeuse, la section des tubes augmente quand on s'élève.