

## Les simulations magnétohydrodynamiques du Soleil

Simuler en trois dimensions la machine électromagnétique à l'œuvre au sein du Soleil est désormais à la portée des chercheurs et de leurs supercalculateurs.

Boucles magnétiques dans la couronne solaire. La topologie complexe des structures magnétiques dans la haute atmosphère solaire facilite les reconnections des lignes de champ et génère des éruptions.



Lockheed Martin Solar and Astrophysics Laboratory

De par sa proximité, le Soleil a une influence forte et directe sur la Terre et notre société technologique. En particulier, son activité magnétique et son **vent** de particules chargées perturbent l'environnement spatial autour de notre planète allant jusqu'à endommager nos satellites, voire, dans le cas d'**éruptions solaires** extrêmes, nos centrales électriques. Afin de pouvoir prédire et anticiper de tels phénomènes, il est nécessaire de comprendre l'origine de ces processus physiques. Aujourd'hui, il est admis que ces phénomènes dynamiques sont reliés à une **dynamo turbulente** interne distribuée dans et à la base de la **zone convective** solaire. Une approche prometteuse pour tester cette interprétation consiste à simuler de façon tridimensionnelle cette région du Soleil sur de gros calculateurs comme ceux du CEA au Centre de calcul recherche et technologie (CCRT) de Bruyères-le-Châtel (Essonne).

### Enjeux et défis de la modélisation dynamique du Soleil

Le Soleil est une grosse boule de gaz chaud et **ionisé (plasma)** tournant sur elle-même en 28 jours environ. Les 30 % les plus externes en rayon sont animés en permanence de mouvements **convectifs**. Ces mouvements sont turbulents et chaotiques et ils subissent l'influence des forces de Coriolis et de Laplace (voir les encadrés 2 et 3), ce qui conduit à un large éventail de phénomènes magnétiques. Pour comprendre la dynamique turbulente et l'activité magnétique du Soleil, pouvoir l'anticiper et se protéger de ses incidences sur Terre, il est nécessaire de disposer d'un modèle physique de son **intérieur** et de son **atmosphère** (encadré A, *Toute la lumière sur le Soleil*, p. 13). Le modèle actuel des couches dynamiques

externes repose sur la théorie de la dynamique des fluides et des plasmas (fluides conducteurs), aussi appelée magnétohydrodynamique (MHD). Cette théorie décrit le fonctionnement mécanique, hydrodynamique, thermodynamique et magnétique du plasma turbulent solaire à partir d'équations aux dérivées partielles non linéaires et couplées. Malheureusement, de tels systèmes d'équations n'ont probablement pas de solutions mathématiques exactes (analytiques) permettant de résoudre totalement le problème posé par la turbulence et l'activité solaire, si aucune hypothèse simplificatrice n'est considérée. Cette difficulté persiste depuis plus de 50 ans et constitue un des défis majeurs de l'astrophysique moderne et plus particulièrement de la dynamique des fluides astrophysiques. Il est donc nécessaire de développer des approches complémentaires pour progresser dans notre compréhension de ces phénomènes<sup>(1)</sup>. Il convient tout d'abord de simplifier plus ou moins fortement le système étudié pour pouvoir le traiter analytiquement, ou de développer un programme informatique résolvant le système le mieux possible par approximation numérique. Enfin, il est possible de cumuler ces deux approches pour analyser un à un chaque aspect du problème.

Il est certain que l'apparition de **calculateurs massivement parallèles**, avec une puissance de calculs de plus en plus impressionnante (des dizaines de milliers de milliards d'opérations élémentaires par seconde ou Teraflops), encourage le développement de **codes** performants les plus réalistes possibles décrivant la magnétohydrodynamique des **étoiles** dont le Soleil, voire du système Soleil-Terre.

(1) À ce sujet, voir *Clefs CEA* N° 47, Hiver 2002-2003, pp. 10-12 et 18-19.

Le magnétisme solaire est de nature différente à l'intérieur de notre étoile, où le **champ magnétique** est entraîné par les mouvements, et dans son atmosphère, où le champ magnétique dicte la dynamique. Pour cette raison, la **modélisation** de la magnétohydrodynamique du Soleil a été séparée en physique solaire *interne* et *externe*. Très récemment, des synergies sont apparues afin d'intégrer dans un protocole plus large tous les développements dans le domaine de la simulation MHD du Soleil. Il reste cependant encore beaucoup d'efforts à accomplir avant d'arriver à un modèle complet.

Voici un rapide panorama de l'état actuel des simulations multidimensionnelles en se limitant à la convection turbulente, c'est-à-dire interne, du Soleil. La principale raison de ce choix est que la dynamique atmosphérique du Soleil doit en partie son existence et sa variabilité à son couplage fort avec la dynamique interne. Ceci est particulièrement vrai du **cycle** de 22 ans d'activité magnétique et d'émergence des **taches solaires** (voir plus loin "Propriétés et rôle du champ magnétique").

Pour étudier la convection solaire, deux approches parallèles et complémentaires ont été menées. L'une modélise de façon locale dans une géométrie cartésienne à très haute **résolution** une portion réduite de la convection de surface solaire. L'autre s'attaque à la modélisation globale en géométrie sphérique à résolution plus modeste de l'ensemble de la zone convective (excepté les couches superficielles). La première méthode permet de décrire plus correctement la turbulence solaire et les propriétés microscopiques du plasma, au détriment de l'usage de la bonne géométrie et de la présence d'écoulements moyens globaux. La seconde a l'avantage d'ébaucher un modèle de circulation "générale" dans le Soleil, comme ceux développés pour prédire le climat. C'est cette deuxième approche qui sera décrite ici.

### Simulations numériques globales de la convection turbulente solaire

Le Soleil présente un aspect **granuleux** qui provient des mouvements convectifs turbulents transportant la chaleur vers sa surface (encadré 1 et voir l'illustra-

## La convection thermique

1

C'est le processus de transport de l'énergie thermique par le mouvement d'un fluide. Ce qui est chaud monte et ce qui est froid descend. Un exemple courant est celui d'un récipient d'eau posé sur une source de chaleur (plaque électrique, réchaud à gaz...). L'eau chauffée au fond du récipient est plus légère et monte à la surface, s'y refroidit et retombe, se réchauffe à nouveau, remonte, etc. Ce mouvement **convectif** tend à réduire la différence de température entre le fond et la surface du récipient. Dans le cas des **étoiles**, les mouvements convectifs servent à évacuer l'énergie nucléaire produite en leur centre. La localisation des zones de convection dépend fortement de la masse des étoiles, les plus massives ayant une convection centrale. Quand il y a une forte variation de la densité, comme dans les enveloppes convectives de type solaire, l'entropie<sup>(1)</sup> du fluide devient la variable naturelle pour caractériser l'efficacité de la convection, une convection très efficace étant quasi-**adiabatique** (sans perte de chaleur). Dans la nature, le transport de l'énergie thermique peut également se faire par **conduction** (contact direct entre un corps chaud et un corps froid) ou par rayonnement (énergie transportée par les **photons**). Dans les étoiles de type solaire, la conduction joue un rôle négligeable par rapport au rayonnement, qui domine du centre jusqu'à 0,71 rayon solaire, et à la convection, qui domine entre 0,71 et presque 1 rayon solaire.

(1) L'entropie est la quantité physique qui mesure le degré de désordre d'un système comme, par exemple, la dégradation de l'énergie.

tion page 22). Le large intervalle d'échelles spatiales et temporelles de la zone convective est d'environ 6 ordres de grandeur par dimension. Il rend la modélisation numérique<sup>(1)</sup> de la convection turbulente solaire très difficile même sur les ordinateurs actuels. Il n'est donc pas encore possible de modéliser la granulation solaire avec l'approche globale discutée ici. Cependant, au gré des développements des ordinateurs, la résolution utilisée par les codes hydrodynamiques modernes atteint aujourd'hui un maillage de 4000 km de côté et 1000 km de profondeur, donc s'approchant de plus en plus de l'échelle spatiale de la granulation.

Les résultats de telles simulations numériques sont montrés **figure 1**. Le mouvement convectif (vitesse radiale/verticale) d'une sphère de gaz en rotation est représenté à trois instants successifs. Il apparaît clairement que les lignes de flots descendants (en

(1) À ce sujet, voir *Clefs CEA* N° 47, Hiver 2002-2003, pp. 10-12 et 18-19.

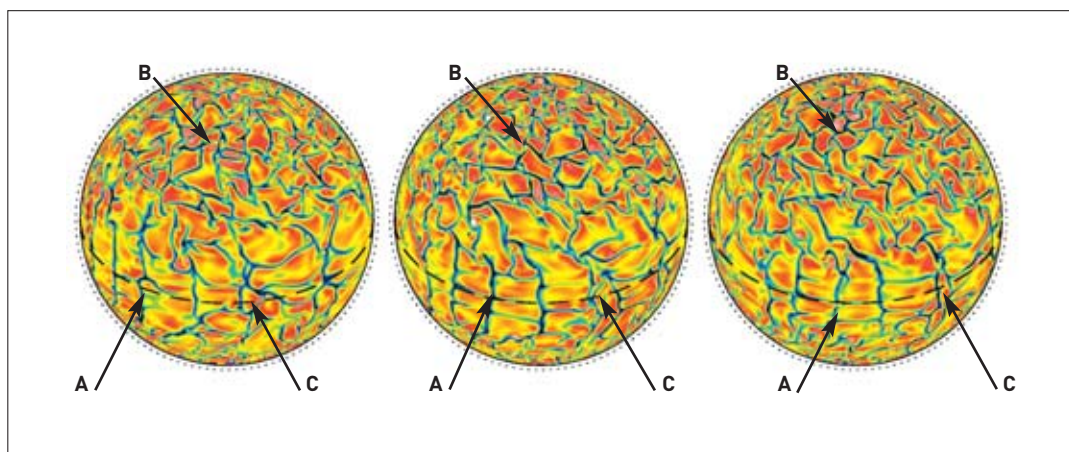
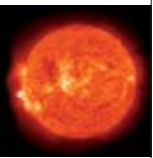


Figure 1. Évolution temporelle de la vitesse radiale dans une simulation globale tridimensionnelle de la convection sous l'influence de la rotation. Sont représentés en bleu les flots descendants et en jaune-rouge les flots montants. Chaque image est séparée de 5 jours. Les marqueurs A, B et C suivent des motifs convectifs particulièrement intéressants.



bleu) sont plus étroites que les larges flots montants (en jaune-rouge). Les cellules à plus haute latitude évoluent, se mélangent entre elles et se disloquent par la formation de nouvelles structures. Aux interstices des lignes de flots descendants, des structures cycloniques, qui tournent dans le sens des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère Sud et inversement dans l'hémisphère Nord, sont visibles. Ces structures, dénommées panaches, correspondent à des tubes de vorticité (de rotation) intense et traversent toute la zone convective en profondeur. Plus près de l' quateur, il faut noter que les motifs convectifs sont moins **isotropes** qu'à plus haute latitude et plus alignés avec l'axe de rotation (direction nord-sud). Ces structures sont également étirées et cisailées par un écoulement horizontal à grande échelle: la *rotation différentielle*.

## Comprendre la rotation différentielle solaire

L'observation du Soleil révèle que sa surface tourne avec une vitesse de rotation qui varie en latitude, de 25 jours à l' quateur jusqu'à 35 jours aux pôles. Les modèles de convection en géométrie sphérique sous l'influence de la rotation permettent d'étudier l'établissement d'un tel profil de rotation différentielle. Sous l'influence de la rotation, les mouvements convectifs s'organisent différemment, par exemple en s'alignant et en s'inclinant en direction de l'axe de rotation (encadré 2). C'est particulièrement vrai

des panaches convectifs qui sont à l'origine de l'accélération équatoriale observée dans les simulations. La figure 2, qui représente la rotation différentielle en profondeur et en latitude accompagnant les mouvements convectifs observés à la figure 1, révèle, d'une part, que toute la bande équatoriale tourne plus rapidement et, d'autre part, que la rotation différentielle ralentit jusqu'à tourner 30 % moins vite aux pôles. Vers 45-70  de latitude, la rotation est constante le long des lignes radiales, comme l'indiquent les lignes les plus horizontales dans le schéma de droite montrant des coupes radiales à latitude fixée de la rotation. Cette rotation différentielle est largement à l'origine de l'**advection** des cellules convectives (vers la droite à l' quateur et vers la gauche aux latitudes plus élevées) (cf. marqueurs de la figure 1). L'accord entre les simulations globales de la convection et les observations **héliosismiques** est raisonnable. Cela démontre que les modèles de convection turbulente tridimensionnels commencent à devenir réalistes pour décrire les mouvements aux grandes échelles observés dans le Soleil. Le profil de rotation est établi par la redistribution continue du moment cinétique<sup>(2)</sup> contenu dans la coquille convective en rotation. En particulier, les corrélations des trois composantes de la vitesse (ou *tenseur de Reynolds*) transportent le moment cinétique depuis les hautes latitudes vers l' quateur, accélérant ainsi cette portion de la zone convective.

Une caractéristique importante du profil de rotation solaire est qu'il devient constant dans l'**intérieur radiatif**, la transition entre la rotation différentielle et la rotation solide se faisant très rapidement dans une zone à très fort cisaillement appelée **tachocline**. Cette *couche limite* est cruciale pour comprendre la dynamo solaire et il est prévu d'adjoindre aux simulations de la zone convective une zone stable la modélisant.

## Propriétés et rôle du champ magnétique

L'activité magnétique solaire est fascinante par sa diversité. Le diagramme d'émergence des taches solaires, présenté à la figure 3, montre une succession de bandes se propageant vers l' quateur et alternant leurs signes tous les 11 ans, formant ainsi comme des ailes de papillons. La conséquence directe d'une telle observation est que l'axe du champ magnétique solaire doit forcément s'inverser tous les 11 ans pour accompagner l'alternance des polarités – le fameux cycle des 22 ans (+/-/+/-), tel un aimant qui se retournerait régulièrement (encadré 3). En outre, dans la haute atmosphère solaire (**couronne**), des **boucles** de champ magnétique apparaissent, se développent et se reconnectent sans cesse, produisant ainsi des éruptions solaires brillantes mais accompagnées de peu d'éjection de matière. Il existe aussi des configurations de champ magnétique très complexes qui sont généralement reliées aux **régions actives** rassemblant plusieurs groupes de taches solaires et possédant de façon prédominante (70 %) une structure en S ou N, selon l'hémisphère considéré. Dans ce cas, les éruptions sont beaucoup plus violentes et éjectent du plasma

## Les effets de la rotation

2

La rotation, de symbole  $\Omega$ , est présente partout dans l'Univers (planètes, systèmes planétaires, ** toiles**, **galaxies**...). Son effet sur un élément donné (objet solide, fluide...) dépend de la force centrifuge et de la force de Coriolis. La première tend à éloigner tout objet du centre. La seconde a pour effet de dévier tout objet en mouvement vers sa droite dans l'hémisphère Nord et vers sa gauche dans l'hémisphère Sud. Plus le système tournera vite, plus la force centrifuge dominera, jusqu'à éparpiller compl tement l'objet si son amplitude dépasse la ou les forces de cohésion internes de celui-ci. Ces forces de cohésion internes sont, par exemple, pour un objet solide les forces ** lectrostatiques** entre **atomes** et pour une masse de fluide, comme une étoile, la **force de gravité**. Le Soleil tourne plutôt lentement (1 tour/28 jours) comparé à la fraise du dentiste (3000 tours/minute) ou même aux autres étoiles dont certaines tournent sur elles-mêmes en moins d'un jour. Ses mouvements **convectifs** sont donc surtout influencés par la force de Coriolis. L'effet le plus frappant de cette force est sans aucun doute la création dans l'atmosphère terrestre de cyclones. Il y a alors balance entre le gradient de pression horizontal et la force de Coriolis: les physiciens parlent d'** quilibre géostrophique**. Dans les étoiles, de tels phénomènes "météorologiques" existent également mais, tout comme sur la Terre où les cyclones ont toujours un rayon supérieur à environ 100 km, ils n'apparaissent qu'à partir d'une certaine extension spatiale, appelée **rayon de Rossby**. Dans la **zone convective** du Soleil, ce rayon se situe entre 10 000 et 30 000 km, ce qui permet de délimiter les échelles ressentant les effets de la rotation de celles ne les ressentant pas. Bien sûr, la nature **turbulente** des mouvements convectifs dans les étoiles altère cet équilibre. Par exemple, la circulation méridienne<sup>(1)</sup> observée dans le Soleil provient d'un tel écart à la géostrophie. Pour les étoiles tournant plus rapidement, la force centrifuge devient importante et elle tend alors à aplatir l'étoile aux pôles, la faisant passer d'une forme sphérique à une forme ovo ide.

(1) Circulation méridienne:  coulement moyen sous forme de cellules dans le plan méridien.

(2) Le moment cinétique, ou moment de la quantité de mouvement, est le produit de la masse par la vitesse et par la distance à l'axe de rotation.



dans le milieu interplanétaire : ce sont des **éjections de masse coronale**. La régularité de l'émergence des taches solaires contraste avec l'imprévisibilité de la dynamique de surface du Soleil. Pourtant, elles sont liées car plus on s'approche du pic d'activité solaire (5 à 7 ans après le précédent retournement), plus la fréquence et l'intensité des éruptions seront grandes. Ces phénomènes magnétiques apparaissent dans le Soleil car son gaz est conducteur. La présence de particules chargées (**électrons**, ions) dans le plasma solaire permet l'induction d'un champ magnétique par les mouvements convectifs. Cet effet dynamo est à l'origine du magnétisme observé (encadré 3). Afin de pouvoir comprendre la diversité des formes que revêt le magnétisme solaire, il est nécessaire de distinguer les événements réguliers de ceux qui ne le sont pas. La théorie actuelle suppose que la dynamo solaire est séparée en dynamos petite et grande échelles. Le cycle des 22 ans, l'ordre des polarités des taches solaires dit *loi de Hale*, l'amplification de larges structures magnétiques parallèles à l'équateur sont reliés à la dynamo grande échelle qui est organisée vraisemblablement dans la tachocline à la base de la zone convective. L'activité irrégulière et le champ magnétique désordonné (éruptions, **points brillants**...) sont par contre le résultat de la turbulence présente dans l'enveloppe convective.

Les astrophysiciens du CEA ont entrepris, depuis quelques années, de prendre en compte les effets du champ magnétique et de l'influence non linéaire de la force de Laplace dans les simulations de convection turbulente en rotation. L'introduction du champ magnétique complique le système d'équations physiques à résoudre et rend les codes numériques plus lents et plus complexes. Ainsi, les modèles magnéto-hydrodynamiques du Soleil se font de plus en plus sophistiqués. La figure 4, qui représente la reconstruction du champ magnétique coronal à partir d'une simulation tridimensionnelle de la zone convective solaire, révèle des structures en boucles resserrées, telles les boucles magnétiques dans la couronne solaire, ainsi que des **lignes de champ** s'ouvrant vers l'extérieur, un peu comme avec les **trous coronaux** solaires. La présence d'un champ magnétique fort, créé par l'effet dynamo, modifie la convection, les courants moyens et la balance d'énergie du système. Dans l'exemple

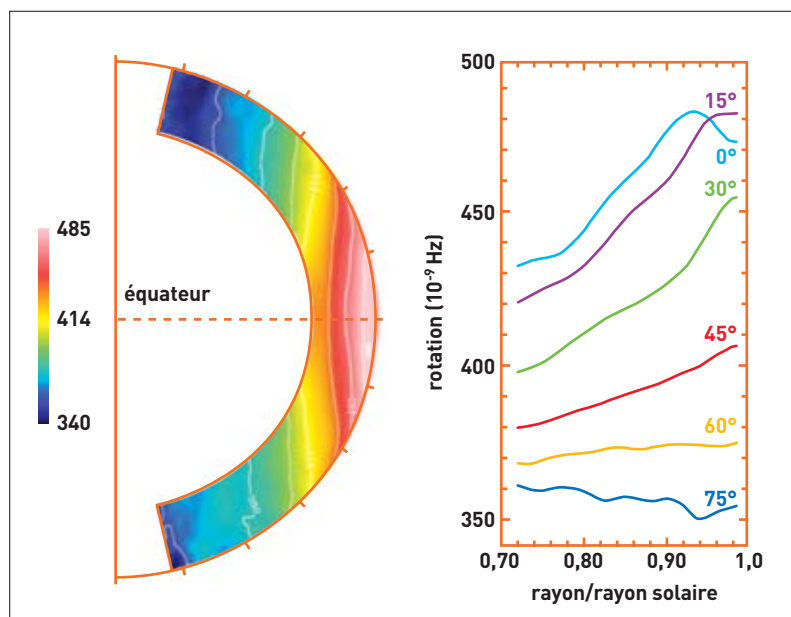


Figure 2. Représentation, dans une coupe dans le plan méridien, de la rotation différentielle en profondeur et en latitude accompagnant les motifs convectifs observés à la figure 1. Les zones de rotation rapide apparaissent en rouge et celles de rotation lente en bleu.

montré figure 4, la rotation différentielle accompagnant la convection "magnétisée" a été réduite de près de 30 % en amplitude. Les champs magnétiques produits apparaissent *intermittents* et leurs composantes fluctuantes dominent par 2 ordres de grandeur les champs moyens globaux. La polarité du champ magnétique poloidal (allant d'un pôle à l'autre) se renverse dans ces simulations mais sur une période trop courte de 500 jours. En fait, le champ moyen toroidal (parallèle à l'équateur) du Soleil est proportionnellement plus important que dans les simulations et le renversement se fait tous les 11 ans. Les calculs confirment l'idée que de tels champs moyens et la régularité du cycle d'activité ne peuvent être générés dans une zone convective turbulente, mais au contraire dans une zone cisailée stable comme la tachocline. La prochaine étape consistera donc à calculer des modèles MHD du Soleil incluant une tachocline et, à moyen terme, une atmosphère plus réaliste. Dans

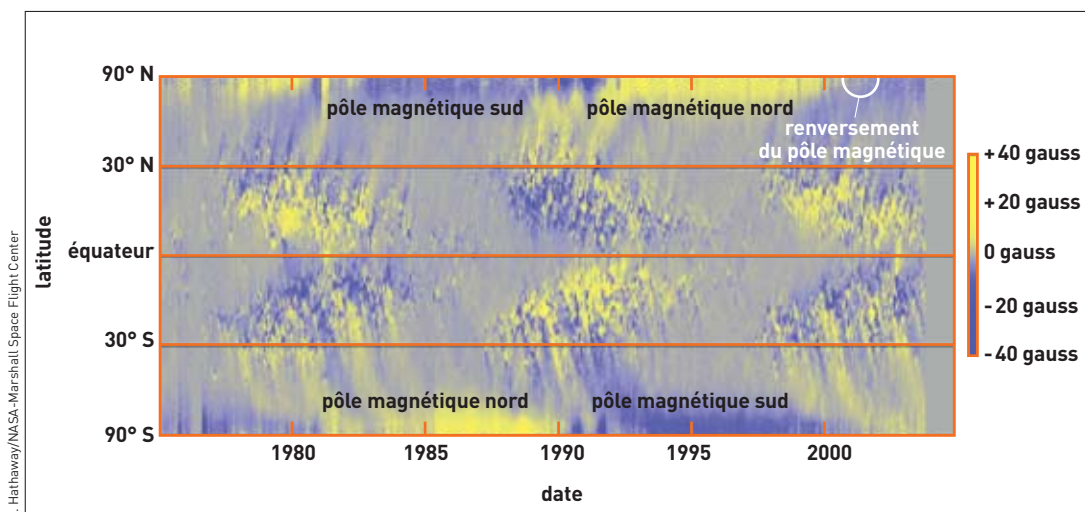
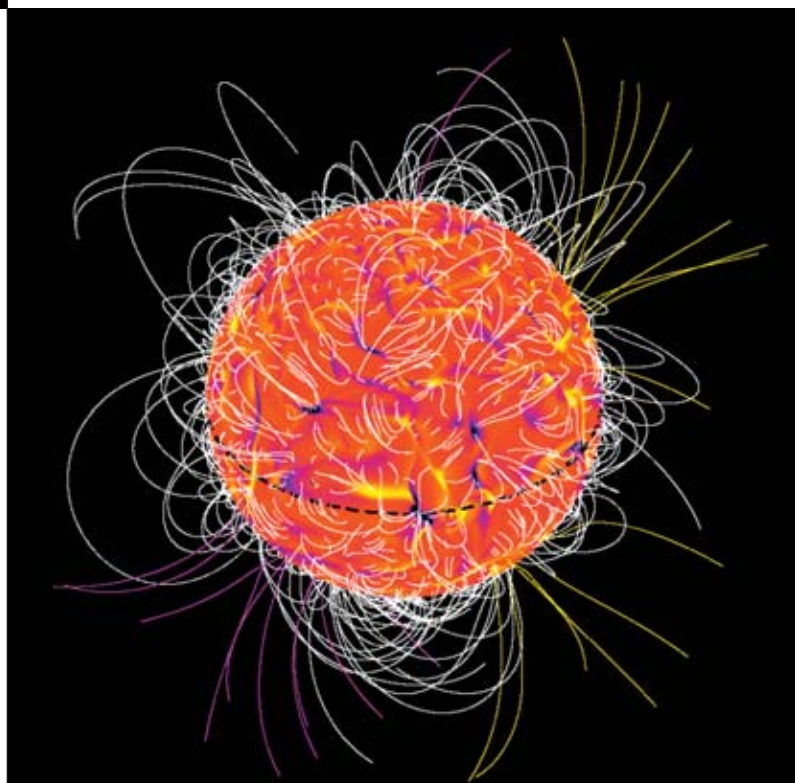


Figure 3. Diagramme papillon d'émergence des taches solaires en fonction de la latitude et du temps au cours des 3 dernières décennies. Il montre clairement la migration équatoriale des taches lors d'un cycle puis le renversement de polarité, le tout faisant un cycle complet de 22 ans (loi de Hale).



A. S. Brun/CEA

Figure 4.

Reconstruction du champ magnétique coronal à partir d'une simulation tridimensionnelle de dynamo turbulente, réalisée au CEA, de la zone convective solaire. Les lignes blanches correspondent aux lignes de champ fermées et les jaunes et les violettes aux lignes de champ ouvertes. L'image de fond représente la composante radiale du champ magnétique à un rayon de 0,95 rayon solaire.

l'avenir, il deviendra possible de calculer en temps réel un modèle "météorologique" du Soleil et ainsi maîtriser plus efficacement les risques liés aux interactions Soleil-Terre. En attendant, les modèles actuels permettent de poser des jalons pour les développements futurs et d'interpréter la grande quantité de données d'observations disponibles.

> **Allan Sacha Brun**

Direction des sciences de la matière  
CEA centre de Saclay

## Magnétisme et effet dynamo

3

Le magnétisme<sup>(1)</sup> est l'étude des phénomènes magnétiques dont la manifestation physique la plus courante s'observe dans les aimants. Les effets du **champ magnétique** se retrouvent dans la plupart des objets célestes. Par exemple sur Terre, c'est le champ dit "géomagnétique" qui agit sur l'aiguille des boussoles et l'oriente sur l'axe nord-sud. Pour le Soleil, le champ magnétique peut être jusqu'à plus de 1 000 fois plus intense, prenant tour à tour la forme de **taches solaires**, d'**éruptions**, de **protubérances**, de **points brillants**... Le magnétisme de la Terre et du Soleil vient de l'**effet dynamo**. Cet effet est la propriété qu'a un fluide conducteur en mouvement de pouvoir générer par induction un champ magnétique. S'il n'est pas entretenu, le champ magnétique diffuse et décroît. Seuls certains écoulements ont la capacité d'amplifier et d'entretenir le champ magnétique, ce qui est le cas des mouvements **turbulents** présents dans le Soleil. En effet, la **convection** turbulente associée à la forte rotation différentielle en profondeur et en latitude dispose des propriétés d'étirement, de cisaillement et d'enroulement nécessaires au développement d'un effet dynamo. À la présence d'un champ magnétique est associée la force de Laplace qui agit sur les mouvements du **plasma** comportant des particules chargées. L'effet de cette force peut être décomposé en une composante reliée à la tension le long des **lignes de champ magnétique** et une autre associée à un gradient de pression magnétique perpendiculairement aux lignes de champ magnétique. Comme pour la rotation, il est possible de trouver des états d'équilibre entre gradient de pression et champ magnétique, voire avec la force de Coriolis dans le cas d'un système tournant comme le Soleil. Les scientifiques parlent alors d'*équilibre magnétostrophique*. Cependant, le fort degré de turbulence présent dans les couches externes du Soleil modifie cet équilibre.

(1) Magnétisme: de Magnes, mot originaire de la ville grecque Magnesia où fut trouvée la pierre d'aimant.

# A Toute la lumière sur le Soleil

**P**lus gros objet du système solaire, le Soleil représente environ 99,8% de sa masse totale. Composé initialement de plus de 70 % d'**hydrogène** et plus de 25 % d'**hélium**, le Soleil est une gigantesque boule de gaz chaud tournant sur elle-même.

La **structure interne du Soleil** est divisée en quatre régions (figure). Le **cœur**, où les conditions de température et de densité sont extrêmes, est le siège de nombreuses réactions nucléaires qui transforment l'hydrogène en hélium. L'énergie libérée se retrouvera sous la forme de **lumière visible** au niveau de la surface.

Dans la **zone radiative**, qui s'étend du cœur à 0,71 rayon solaire, l'énergie est transportée vers la surface du Soleil par l'interaction **photons-matière** (transport radiatif). Les photons sont absorbés et réémis des millions de fois dans de multiples collisions avec les **atomes** rencontrés qui sont très **ionisés**. Il faut plus d'un million d'années pour que les photons atteignent la **tachocline**, fine couche de transition entre la zone radiative et la zone convective et qui joue un rôle essentiel dans le **champ magnétique** solaire.

Dans la **zone convective**, du fait de la diminution de température, le milieu formé d'atomes partiellement ionisés et d'atomes neutres est plus opaque. La progression des photons devient difficile. De plus, la densité y varie d'un facteur un million entre la base et la surface. Ces forts gradients de température et de densité engendrent des mouvements **convectifs** qui sont observables à la surface comme des **granules** (leur durée de vie se chiffre en minutes) ou des **supergranules** dont les dimensions sont respectivement de l'ordre de 1 000 km et 35 000 km.

L'**atmosphère solaire** comporte quatre régions (figure). La surface, ou **photosphère**, épaisse de seulement 400 km et dont la température est proche de 5 800 K, présente donc un aspect granuleux et des zones plus ou moins sombres. Des zones obscures ou **taches solaires**, qui sont isolées ou en groupe, sont à une température de 3 800 K. Elles apparaissent noires du fait de leur différence de température avec les régions avoi-

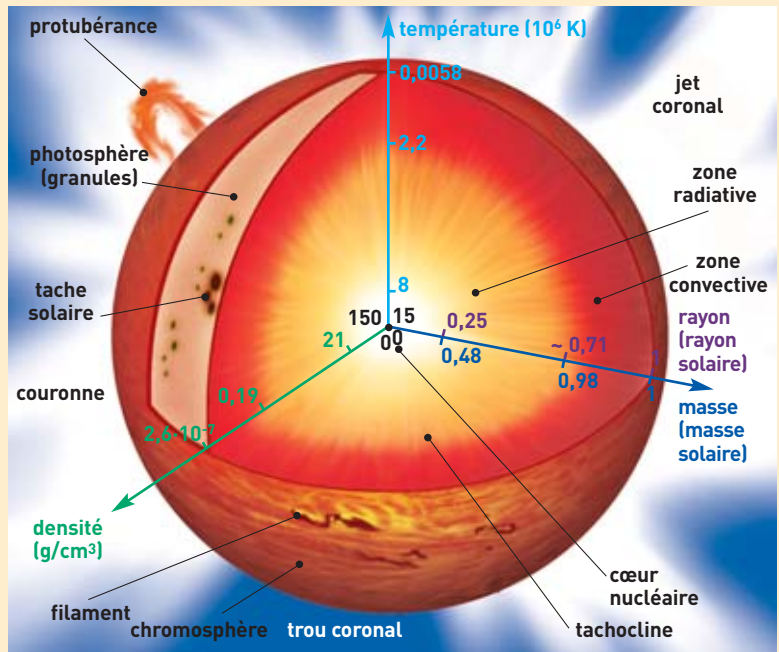


Figure.

sinantes. Elles sont soumises à un **cycle** de 11 ans et sont associées à des régions dont le champ magnétique est beaucoup plus intense (quelques milliers de gauss) que sur l'ensemble du Soleil (1 gauss). Ces taches peuvent atteindre un diamètre de 50 000 km. Leur durée varie de quelques jours à plusieurs mois. Des zones plus claires et plus chaudes ou **facules**, parfois isolées mais généralement situées autour d'un groupe de taches, sont également observées.

Au-delà de la photosphère, s'étendant sur des milliers de kilomètres, se trouve la **chromosphère**, dont la densité continue à décroître rapidement alors que la température atteint 20 000 K. Dans cette zone se trouvent les **plages**, régions brillantes caractérisant les forts champs magnétiques des taches solaires, les **protubérances** ou **filaments** (lorsqu'elles sont vues sur le **disque** solaire), structures magnétiques plus denses et plus froides (10 000 K) que leur environnement, et les **spicules**, petits jets de matière à vie courte (5 à 10 minutes) se dirigeant vers la couronne à une vitesse de près de 20 km/s.

Entre la chromosphère et la couronne se situe la **région de transition**, couche mince et irrégulière dans laquelle la température augmente brutalement.

La **couronne**, peu riche en gaz, s'étend sur des millions de kilomètres et est caractérisée par une température de plus de 1 500 000 K et une densité faible. Elle comporte de nombreuses structures magnétiques ou associées à des structures magnétiques telles que les **boucles coronales**, les **trous coronaux**, les **points brillants**... Dans cette région en perpétuelle évolution apparaissent les protubérances ou filaments, sous la forme de grands **panaches** de gaz chauds, provenant de la chromosphère. L'activité solaire n'est pas constante. Régulièrement, avec une intensité cyclique, des **éruptions** violentes se produisent dans les **régions actives**. Il s'agit de brusques libérations de particules de haute énergie dans le milieu interplanétaire. Ces **éjections de masse coronale** (CME) atteignent parfois 100 000 km de haut et 200 000 km de long. Suivant la direction d'éjection, les particules de haute énergie émises peuvent interagir avec l'atmosphère terrestre.

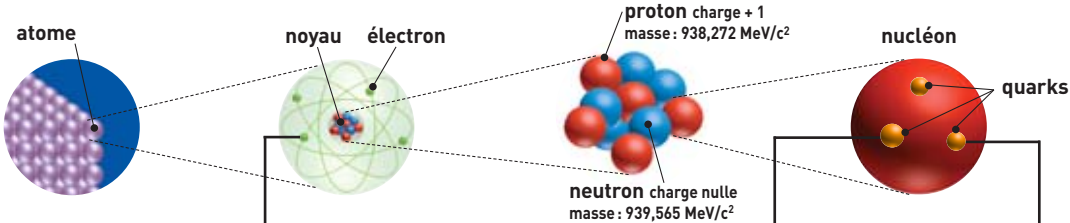
Le Soleil expulse également un flux permanent de particules chargées, principalement des **protons** et des **électrons** formant un **plasma**, appelé **vent solaire**. Celui-ci se propage hors du système solaire à une vitesse d'environ 450 km/s. Le Soleil perd environ un cent millième de milliardième de sa masse par an.

# C Particules élémentaires et interactions fondamentales

Les **neutrinos** sont les plus furtives des particules du **modèle standard de la physique des particules**, cadre théorique qui décrit toutes les **particules élémentaires** connues et les **interactions fondamentales** auxquelles elles participent (tableau).

Les constituants élémentaires de la matière, les **fermions**, se partagent en deux grandes catégories, les **leptons** qui ne répondent pas à l'**interaction forte**, et les **quarks** qui subissent toutes les interactions. Les six quarks forment trois paires (bas/haut, étrange/

charmé et beauté/top). Dans la catégorie des leptons, les **leptons chargés** (**électron**  $e^-$ , **muon**  $\mu$ , **tau**  $\tau$ ) participent à l'**interaction électromagnétique** et à l'**interaction faible** et les **leptons neutres** (**neutrino électronique**  $\nu_e$ , **neutrino muonique**  $\nu_\mu$ , **neutrino tauique**  $\nu_\tau$ ) ne



	leptons peuvent se déplacer librement		quarks prisonniers de particules plus grandes, ils ne sont pas observés individuellement	
<b>Fermions</b> La matière ordinaire est composée de particules de ce groupe.	<b>première famille</b> <b>électron</b> responsable de l'électricité et des réactions chimiques sa charge est -1 masse : 0,511 MeV/c <sup>2</sup>	<b>neutrino électronique</b> sans charge électrique et interagissant très rarement avec le milieu environnant	<b>bas</b> sa charge électrique est -1/3 le proton en contient un, le neutron deux masse : 5 – 8,5 MeV/c <sup>2</sup>	<b>haut</b> sa charge électrique est +2/3 le proton en contient deux, le neutron un masse : 1,5 – 4,5 MeV/c <sup>2</sup>
Pour la plupart, ces particules étaient présentes juste après le big bang. Aujourd'hui, on ne les trouve que dans les rayons cosmiques et auprès des accélérateurs.	<b>deuxième famille</b> <b>muon</b> un compagnon plus massif de l'électron masse : 105,658 MeV/c <sup>2</sup>	<b>neutrino muonique</b> propriétés similaires à celles du neutrino électronique	<b>étrange</b> un compagnon plus lourd du "bas" masse : 80 – 155 MeV/c <sup>2</sup>	<b>charmé</b> un compagnon plus lourd du "haut" masse : 1 000 – 1 400 MeV/c <sup>2</sup>
	<b>troisième famille</b> <b>tau</b> encore plus lourd masse : 1 777 MeV/c <sup>2</sup>	<b>neutrino tauique</b> propriétés similaires à celles du neutrino électronique	<b>beauté</b> encore plus lourd masse : 4 000 – 4 500 MeV/c <sup>2</sup>	<b>top</b> le plus lourd de la famille (observé en 1995) masse : 174 300 ± 5 100 MeV/c <sup>2</sup>
<b>Bosons vecteurs</b> Particules fondamentales qui assurent la transmission des forces de la nature.	<b>photon</b> grain élémentaire de la lumière, porteur de la force électromagnétique	<b>gluon</b> porteur de la force forte entre quarks	<b>W<sup>±</sup>, Z<sup>0</sup></b> porteurs de la force faible, responsables de certaines formes de désintégration radioactive	


**Boson de Higgs ?**  responsable de la "brisure de symétrie électrofaible"

Tableau.  
Constituants élémentaires.



sont assujettis qu'à l'interaction faible. Au sein du modèle standard, les neutrinos sont de masse nulle mais des expériences ont prouvé qu'ils en possèdent une, très faible, dont la valeur exacte reste inconnue à ce jour. La participation des constituants élémentaires aux interactions fondamentales est conditionnée par leurs nombres quantiques, ou charges d'interaction (charge électrique, charge de couleur<sup>(1)</sup>...). À chaque constituant de la matière est associée son **antiparticule**, particule de même masse et de charges opposées. La **force gravitationnelle**, qui n'est pas incluse dans le modèle standard, s'exerce sur tous les fermions proportionnellement à leur masse. Le tableau des constituants élémentaires de la matière montre une autre classification, indépendante de leur participation aux interactions fondamentales, en trois générations ou familles. D'une famille à l'autre, les quarks et les leptons chargés de mêmes charges ne diffèrent que par leurs masses. L'électron, le quark haut et le quark bas, qui appartiennent à la première famille, sont les particules massives les plus légères. Stables, elles sont les constituants de la matière ordinaire. Par exemple, le **proton** contient deux quarks haut et un quark bas ; le **neutron** deux quarks bas et un quark haut. Les particules des deux autres familles sont instables et se désintègrent rapidement en particules stables de première génération. C'est la raison pour laquelle toute la matière stable de l'Univers est faite des constituants de la première famille. D'après la mécanique quantique, pour qu'il y ait interaction, il faut qu'au moins une particule élémentaire, un

**boson**, soit émise, absorbée ou échangée. Le **photon** est le vecteur de l'interaction électromagnétique, les bosons **W<sup>+</sup>**, **W<sup>-</sup>** et **Z<sup>0</sup>** sont les médiateurs de l'interaction faible et les **gluons** les messagers de l'interaction forte.

Les quarks et les leptons chargés échangent des photons mais conservent leur charge électrique après l'échange, le photon n'ayant pas de charge électrique. Comme la masse du photon est nulle, la portée de l'interaction électromagnétique est infinie. Dépourvus de charge électrique, les neutrinos sont les seuls fermions élémentaires à ne pas être sensibles à l'interaction électromagnétique.

Dans la théorie électrofaible (unification des interactions faible et électromagnétique), l'interaction faible présente deux aspects : l'**interaction faible par courants chargés** où les vecteurs de l'interaction sont **W<sup>+</sup>** et **W<sup>-</sup>**, et l'**interaction faible par courant neutre** où le médiateur de l'interaction est **Z<sup>0</sup>**. Ces deux formes de l'interaction faible agissent entre tous les fermions élémentaires (quarks, leptons chargés et neutrinos). La masse de ces bosons étant très élevée (80 400 MeV/c<sup>2</sup> pour **W<sup>±</sup>** et 91 180 MeV/c<sup>2</sup> pour **Z<sup>0</sup>**), la portée de l'interaction faible est infime, de l'ordre de 10<sup>-18</sup> m. Les bosons **W<sup>±</sup>** possédant une charge électrique non nulle, les fermions qui les échangent

changent de charge électrique et également de nature (**saveur**). Par contre, le boson **Z<sup>0</sup>** étant dépourvu de charge électrique, les fermions ne changent pas de nature. En fait, l'interaction faible par courant neutre est assez similaire à l'échange d'un photon. En règle générale, si deux fermions peuvent échanger un photon, ils sont aussi capables d'échanger un **Z<sup>0</sup>**. De son côté, un neutrino a la faculté d'échanger un **Z<sup>0</sup>** avec une autre particule, mais pas un photon.

Seuls les quarks qui possèdent une charge de couleur échangent des gluons, lesquels portent eux-mêmes une charge de couleur. Ainsi, lors d'un échange de gluon entre quarks, ces derniers échangent leurs couleurs respectives. La masse des gluons est nulle, mais étant dotés d'une charge de couleur ils peuvent interagir. La portée de l'interaction forte est donc très courte, de l'ordre de 10<sup>-15</sup> m.

Le **graviton**, vecteur de l'interaction gravitationnelle, n'a pas encore été observé.

La théorie prédit l'existence d'un autre mécanisme d'interaction fondamentale, responsable de la masse des particules élémentaires, dont le messager est le **boson de Higgs** qui reste à découvrir. Le champ de Higgs permet, selon cette théorie, de donner une masse aux fermions élémentaires interagissant avec lui.

(1) Charge de couleur : nombre quantique qui détermine la participation aux interactions fortes. La charge de couleur peut prendre trois valeurs : "rouge", "verte" ou "bleue", ces couleurs n'ayant rien à voir avec les couleurs visibles. Chaque quark porte l'une des trois charges de couleur et chaque antiquark l'une des trois charges d'anticouleur. Les gluons sont dotés de charges doubles couleur-anticouleur (huit combinaisons possibles).

interaction fondamentale	messager	actions
gravitationnelle	graviton ?	fait s'attirer deux masses entre elles et est responsable de la chute des corps
électromagnétique	photon	est responsable de l'attraction entre électrons et noyaux atomiques, et donc de la cohésion des atomes et des molécules
faible	W <sup>+</sup> , W <sup>-</sup> , Z <sup>0</sup>	à la base de la <b>fusion thermonucléaire</b> dans le Soleil, elle assure sa longévité. La <b>radioactivité</b> β <sup>-</sup> et β <sup>+</sup> et les réactions impliquant le neutrino sont des interactions faibles
forte	gluons	assure la cohésion du noyau atomique

Tableau.  
Interactions fondamentales.



La surface du Soleil présente un aspect granuleux. Des millions de granules de gaz portés à une température de plusieurs milliers de degrés s'agitent et induisent des ondes qui se propagent à l'intérieur du Soleil. Dans cette région apparaissent des taches sombres correspondant à des **régions actives**.

