

La classe au Soleil

Jean-Claude Pecker

suite et fin

ARTICLE DE FOND

Le Soleil sphère gazeuse

Donc le Soleil nous apparaît d'abord comme une sphère gazeuse, d'une certaine température (en moyenne 5770 K) dans les couches superficielles. Observation : (car on peut faire des images grossières du Soleil avec un carton percé d'un trou plaqué sur la fenêtre d'une chambre obscure...) le disque du Soleil est assombri à son bord. Qu'est ce que cela veut dire ? Que la température augmente quand on s'enfonce dans le Soleil ; en effet, au bord du disque solaire, le regard pénètre tangentiellement, donc pas profondément ; au centre du disque, il pénètre plus profondément. De plus, cette énorme boule pèse sur ses régions centrales ; elles sont tassées, denses et chaudes.

La physique des sphères gazeuses est connue depuis un siècle. On peut calculer température et pression au centre du Soleil ; et on en déduit le taux des réactions thermonucléaires, pour peu qu'on examine en détail (fig. 6) celles qui permettront effectivement à 4 noyaux d'hydrogène de se fondre en un noyau d'hélium. Les calculs ne sont pas simples, pas pour les élèves de lycée en tout cas... ; mais ils n'impliquent que de la physique très classique. Et on trouve ainsi, au centre du Soleil, une masse volumique de 160 g.cm^{-3} , une température de 15 millions de degrés. Et on calcule,

entre centre et surface, un "modèle" solaire (fig. 7). Cette masse sphérique est dominée par l'écrasement imposé par les forces de gravitation qui tassent en quelque sorte la matière du Soleil autour de son centre... Dans ces régions intérieures du Soleil, ce sont les seules forces qui agissent réellement.

Le Soleil magnétique et nous

Le modèle du Soleil est dominé, nous l'avons dit, par le tassement qu'entraînent les forces de gravitation, au sein de l'énorme masse solaire. Mais cette masse n'est pas une simple boule de gaz en train de s'effondrer. Le rayonnement issu du centre la soutient, la stabilise... Elle tourne autour de son axe en 27 jours environ.

De plus, l'énergie, produite seulement en ses régions centrales, là où la température est assez grande, à l'intérieur d'une sphère de rayon assez faible, (1/10 du rayon solaire environ : le "noyau" central) est évacuée vers l'extérieur de différentes façons :

Sous forme d'abord de rayonnement : ce rayonnement de très haute énergie d'abord, successivement absorbé, réémis, absorbé, réémis, ... par les atomes, des milliers et des milliers de fois, finit par sortir, non pas diminué en quantité, mais fortement dégradé.

En effet, la lumière, (au sortir du noyau central : rayons γ et rayons X) s'est progressivement appauvrie en rayonnements de haute énergie, et enrichie en rayonnements ultraviolets, visibles, infrarouges, et émerge finalement comme le rayonnement (observé) du Soleil, source de grande surface (100 fois celle du noyau)

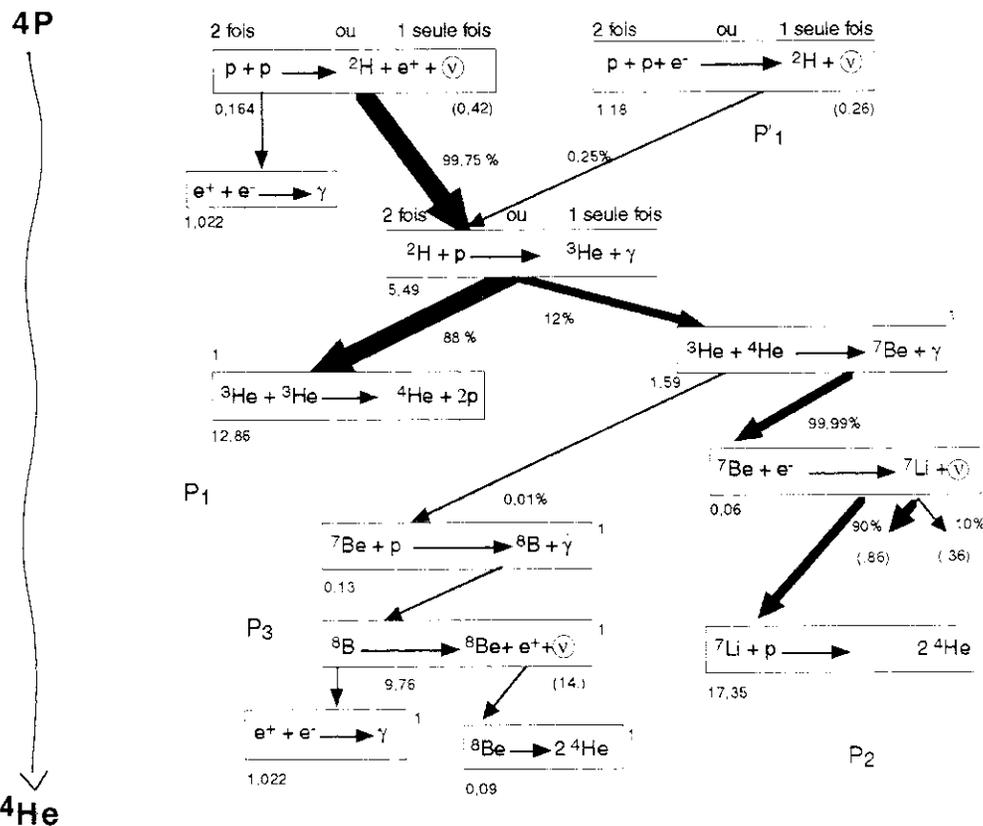
mais de température assez basse, 5770 K. (fig. 7).

Sous forme mécanique : en effet, certaines régions du Soleil, dont on peut démontrer l'instabilité, sont en mouvement constant, entre environ 70 % du rayon et l'extérieur : une partie de l'énergie véhiculée se trouve alors sous forme de mouvements con-

vectifs de matière, bien décelables sur les clichés de la granulation solaire.

Sous forme magnétique : enfin, comme, semble-t-il, tout astre en rotation, le Soleil est un énorme aimant, et possède un champ magnétique, dont on peut mesurer l'intensité en tous points de la surface solaire.

Fig. 6
Les diverses chaînes de réactions thermonucléaires se déroulant dans le coeur solaire



La fig. 2 (c.f. CC 80) décrit schématiquement la seule chaîne P1 de réactions. Mais si c'est la plus fréquente des chaînes de réaction se produisant, ce n'est pas la seule. Les flèches sont d'autant plus épaisses que la probabilité (indiquée en %) de la réaction est plus forte. Si le mélange stellaire contient déjà des noyaux d'hélium, la réaction P2 ou la réaction P3 peuvent se produire aussi, P2 étant beaucoup plus probable que P3. P1 peut aussi avoir lieu à la place de P1 avec une probabilité minimale (0,25 %). Les nombres qui sont indiqués autour des différents rectangles représentant les collisions et leurs effets désignent :

- en haut : le nombre de fois où la réaction intervient dans une chaîne (ceci est pour P1 explicité sur la fig. 2)
- en bas à gauche : l'énergie produite (véhiculée par les photons et les neutrinos) exprimée en MeV
- en bas à droite : l'énergie véhiculée par tel neutrino particulier.

On voit que P2 et P3 produisent des neutrinos beaucoup plus énergétiques que P1.

La mesure des flux de neutrinos de différentes énergies est donc une façon de sonder la région thermonucléaire de l'étoile et de vérifier que les probabilités indiquées sont correctes (elles dépendent de l'âge du Soleil, de sa température et de la densité du cœur solaire).

Champ magnétique, convection, rotation, et même rotation différentielle (on observe que la surface du Soleil tourne plus lentement aux pôles qu'à l'équateur, comme si le Soleil se tordait, à l'image d'un linge qu'on essore) sont autant de phénomènes qui ont peu à voir avec l'énergie de gravitation. Plus on s'éloigne du centre solaire, plus ces phéno-

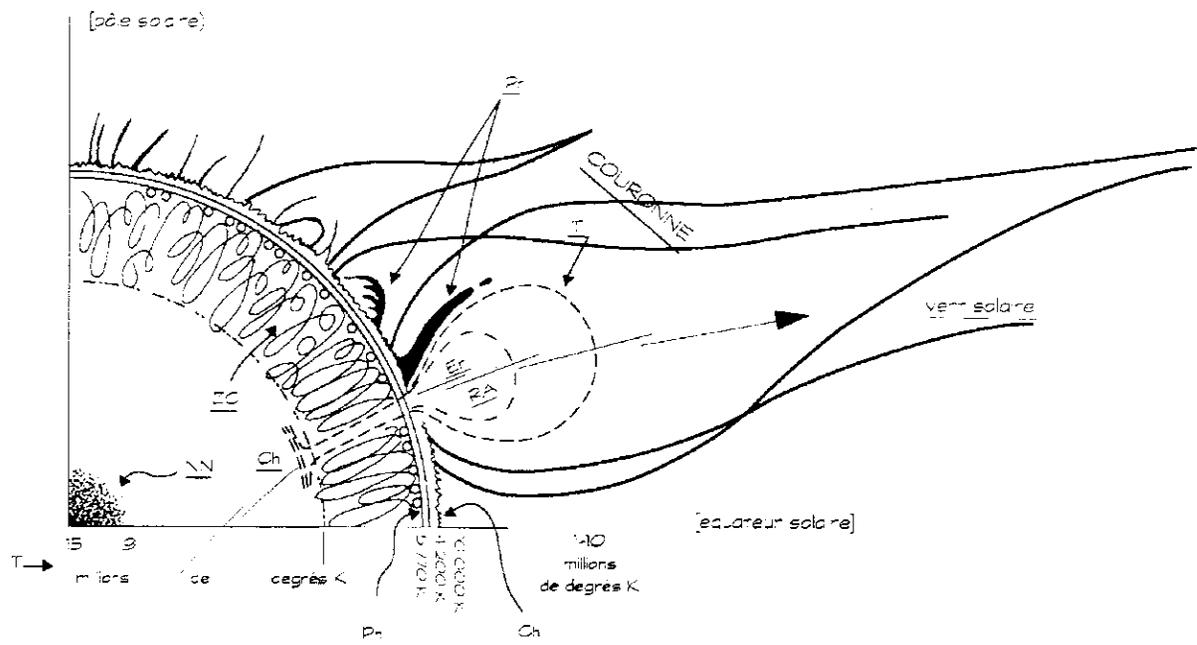
mènes prennent de l'importance.

A l'extérieur de la surface visible, s'étendent encore des couches gazeuses, la **chromosphère**, avec ses protubérances et ses éruptions, et la **couronne**, avec ses immenses arches, ses gigantesques jets. Ceux-ci sont visibles pendant les éclipses totales de Soleil, ou grâce au coronographe, ou encore depuis un satellite, en rayons UV

ou en rayons X, ou mieux encore depuis la Lune, ou depuis la surface d'un quelconque Pluton.

La couronne, animée d'un mouvement constant vers l'extérieur (contre la gravitation), se prolonge enfin dans le "**vent solaire**", qui inonde Terre et planètes de ses jets de particules de toutes énergies (fig. 7).

Fig. 7
Modèle schématique du Soleil



En abscisse : l'échelle des températures.

On note le minimum de température à 4200 K, à la surface apparente du Soleil. A l'extérieur, les couches de matière, transparentes aux rayonnements visibles, sont chauffées par la dissipation des ondes mécaniques et magnétiques, jusqu'à des millions de degrés. Au centre du Soleil, la température atteint 15 millions de degrés.

Sur ce schéma ont été représentés de l'intérieur vers l'extérieur :

- le noyau nucléaire (NN)
- la zone convective (ZC), au dessous de laquelle une forte concentration de champ magnétique (pointillés) est parfois "draguée" vers la surface où elle émerge en une région active (RA) bipolaire (avec un pôle magnétique "nord" et un pôle magnétique "sud"), groupe de "taches" dont le champ magnétique s'étale en grandes arches (T).
- la photosphère (Ph) dans laquelle on peut observer les effets des mouvements de brassage qui animent la zone convective.
- la chromosphère (Ch) dans laquelle l'énergie mécanique commence à se dissiper et la température remonte. Des protubérances (Pr) et des éruptions violentes donnant lieu à des jets de particules rapides (Er), s'y manifestent associées aux champs magnétiques et à leur évolution.
- les grands jets de la couronne solaire et le vent solaire, qui atteint les planètes et notamment la Terre, prolongent ces régions dominées par l'activité magnétique du Soleil.



Fig. 8 : Le Soleil est notre Soleil !

Le Soleil joue avec nous ; il se joue de ses planètes, environnées de vent solaire, plongées dans les flots de rayonnement et de particules plus ou moins énergétiques qu'il nous envoie. Nous, Terre, Jupiter, Pluton... nous appartenons, humbles planètes, au système solaire ; nous faisons partie du Soleil !

Dans la chromosphère, et plus encore dans la couronne, ce sont les forces associées au champ magnétique qui commandent, et qui peu à peu l'emportent sur celles associées au champ gravitationnel.

Cet épanouissement extérieur du champ magnétique est associé à la formation des **taches magnétiques**, le plus souvent bipolaires, (petit aimant assez intense dans le grand aimant solaire). Ces taches sont elles-mêmes en quelque sorte amenées à la surface par les mouvements convectifs, à partir d'une région interne où le champ magnétique est très élevé... Mais restons encore à la surface : les taches, leur épanouissement, à la surface solaire (facules), dans la chromosphère (éruptions, protubérances), dans la couronne (structures magnétiques), manifestent en quelque sorte l' "**activité**" du Soleil. Or, si le flux de rayonnement est pratiquement constant, l'activité magnétique est extrêmement variable.

Cette activité, mesurée autrefois par le nombre de taches solaires visibles, mais aujourd'hui par une quantité d'indices d'activité, liés aux observations (en satellite) du rayonnement corpusculaire, ou à l'intensité de la couronne, est variable sur plusieurs échelles de temps.

Rapide, au voisinage d'une tache, c'est l'explosion brutale d'une éruption. En une heure, le gaz est devenu incandescent, sur des dizaines de milliers de kilo-

mètres, ses structures se tordent : c'est le champ magnétique, qui, dans le passage d'une situation instable à une autre plus stable, a libéré une grande quantité d'énergie. Des protons, des électrons, sont éjectés souvent à de grandes vitesses, parfois accélérés encore par les champs magnétiques ou la couronne.

Si les éruptions sont associées à une libération d'énergie magnétique, les protubérances, en revanche, ne sont qu'un marqueur du magnétisme, en quelque sorte. Matière éjectée par la surface solaire, au voisinage des taches, cette matière est guidée par les arches du champ magnétique. Les protubérances sont associées à une énergie assez faible, bien plus faible que celles des éruptions. Elles servent en quelque sorte de marqueur des champs magnétiques de la couronne, où elles évoluent gracieusement.

Dans les régions de la couronne, où les champs magnétiques accélèrent les particules chargées, électrons ou protons, et produisent des jets ionisés très rapides (1/3 de la vitesse de la lumière parfois !), c'est l'observation en rayons X, ou dans le domaine de la radioastronomie qui permet d'observer toutes sortes de sursauts rapides du rayonnement radioélectrique, du millimètre au décimètre de longueur d'onde... Ces sursauts sont aussi des indicateurs de l'activité solaire rapide...

Mais l'ensemble de phénomènes actifs, à commencer par les taches, sont sujets à une variation dont la période est d'à peu près onze ans, tantôt plus, tantôt moins. Et deux "**cycles**" successifs nous montrent des polarités différentes ; une fois le Soleil est un aimant dont le pôle positif (signe "+") est voisin du pôle de rotation nord ; onze ans après, c'est un signe "-" qui caractérise le magnétisme de l'hémisphère nord du Soleil. Les lois en sont bien connues depuis plus d'un siècle...

Ce qu'il est important de noter, c'est que cette activité solaire variable, qui n'affecte qu'une faible fraction de l'énergie produite par le Soleil affecte beaucoup la vie sur Terre. Les particules de moindre énergie, mettent deux à trois jours pour nous parvenir ; elles s'enroulent sur les lignes de force du champ magnétique de la Terre, et produisent les aurores bipolaires, les variations du champ géomagnétique... Les plus énergétiques percent le casque magnétique qui protège la Terre, et partout arrivent au sol, et provoquent des orages géomagnétiques. L'activité solaire influence le climat, et même la météorologie semble-t-il... On retrouve cette influence à travers les statistiques de pluviosité, ou la structure de régions terrestres à haute et basse pression, ou encore les anneaux de croissance des arbres...

Il nous faudrait bien sûr, décrire le cycle d'activité, avec ses aspects solaires (migrations de la zone d'apparition des taches solaires vers l'équateur, évolution de la distribution d'intensité sur la surface, etc...), et sous ses aspects terrestres, géomagnétisme, aurores, climat... (fig. 8 et 9). Il nous faudrait ...20 à 22 ans, la durée d'une "migration" ! Venons-

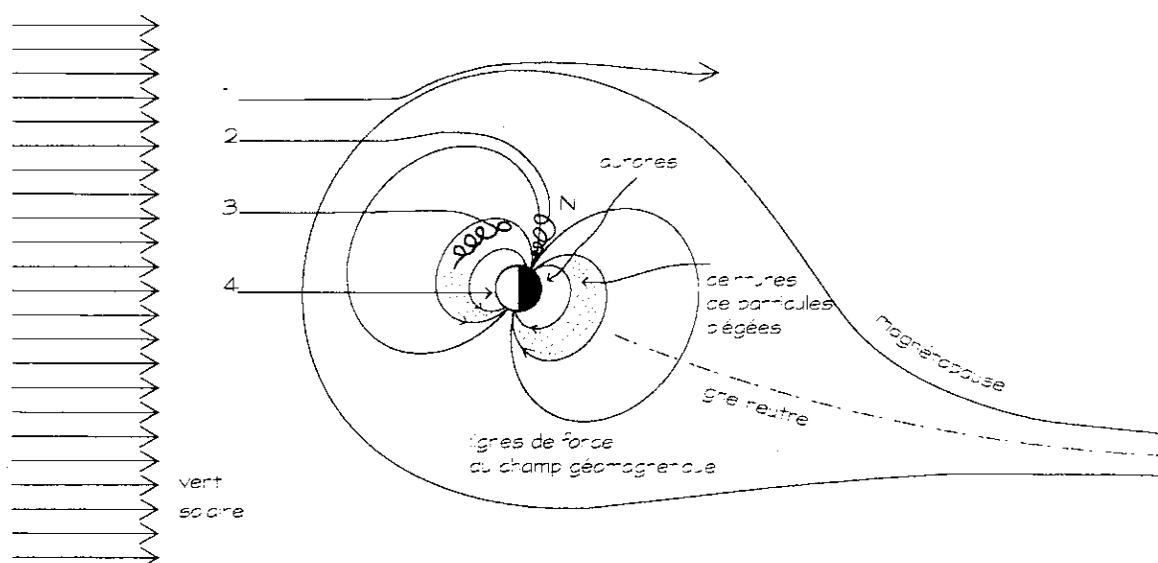
en à des aspects plus modernes de la physique solaire.

Sonder l'intérieur du Soleil ?

Il semble parfois que le Soleil soit une étoile trop bien connue pour justifier les travaux de nombreux astronomes. On parle beau-

coup plus (notamment dans la presse), du Big-Bang, ou de la Grande Unification, ou plus modestement des titanesques explosions des quasars... Or, de nombreuses recherches, dans les vingt ou trente dernières années ont ouvert deux domaines totalement nouveaux : l'héliosismologie, d'une part ; et d'autre part la neutrino-astronomie.

Fig. 9
Le Soleil et le champ magnétique de la Terre



Le vent solaire se caractérise par la variété d'énergie des particules qu'il nous envoie, protons et électrons pour la plupart. Ce flot de particules varie avec le temps, souvent très rapidement, en fonction de l'activité de la surface solaire. On décèle des sursauts brutaux, mais aussi une variation régulière d'une périodicité de 11 ans environ qui sépare deux maxima successifs d'activité magnétique du Soleil.

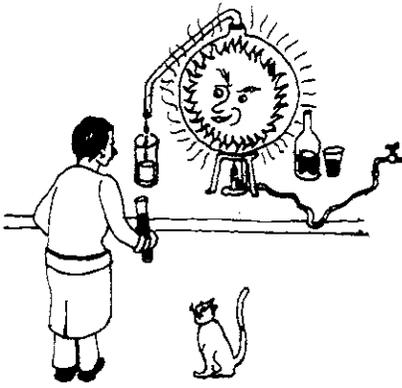
Les particules les moins énergétiques (1), les plus lentes, sont détournées par le "bouclier" magnétique (magnétopause) de la Terre (lié au champ magnétique terrestre).

Les particules d'énergie moyenne (2) s'enroulent sur le champ terrestre, et arrivent sur Terre au voisinage des pôles magnétiques. Leur arrivée dans l'atmosphère terrestre provoque deux zones aurorales, celle des aurores boréales, celle des aurores australes. La lumière y est produite vers 80 km d'altitude, par la recombinaison des électrons du vent solaire avec les ions de l'atmosphère terrestre, ions d'azote ou d'oxygène. Elles sont aussi à l'origine des fluctuations du magnétisme terrestre, et probablement de variations météorologiques et climatiques, à plus long terme. Ces particules mettent deux à trois jours pour parcourir la distance entre le Soleil et la Terre.

Les particules d'énergie un peu plus faible (3) n'arrivent pas au sol. Elles sont piégées par les zones ionisées de Van Allen, ou "ceintures de particules piégées", à très haute altitude au-dessus du sol.

Enfin, les particules très énergétiques (4) liées aux éruptions les plus violentes mettent moins d'un jour, parfois seulement une ou deux heures pour arriver au voisinage terrestre. Elles pénètrent sans mal l'atmosphère et ont des effets immédiats sur le géomagnétisme, sur certaines conditions météorologiques aussi sans doute.

Fig. 10



Le Soleil est un laboratoire idéal

Idéal ! et sans danger pour l'astronome, le physicien, le géophysicien.

Si bien que le Soleil, comme il l'a toujours été, reste un laboratoire idéal de physique, d'astro-physique, de géophysique même (fig. 10).

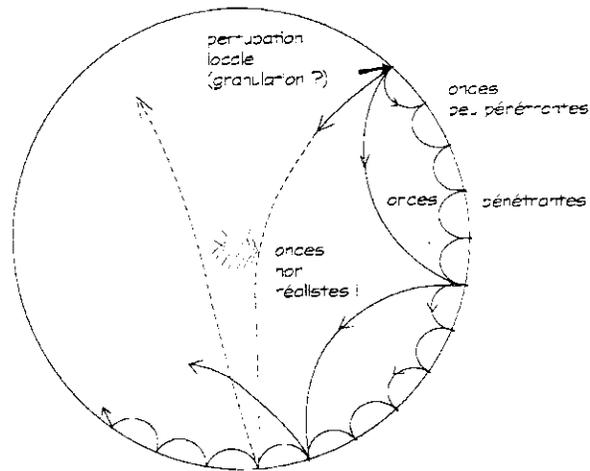
Les événements qui affectent la surface solaire (simplement la granulation, symptôme de mouvements convectifs aboutissant aux régions de la surface), comme les craquements locaux de la croûte terrestre, engendrent des **ondes sismiques**, qui se propagent à la vitesse du son dans la masse solaire (fig. 11), comme dans la Terre. De même que l'analyse des signaux sismiques nous renseigne sur la distribution de la densité à l'intérieur de la Terre, sur les discontinuités de structure de notre globe, les signaux sismiques du Soleil, où l'on peut détecter par analyse harmonique, des dizaines de milliers (!) de modes oscillants, nous renseignent sur la vitesse du son dans les régions profondes, d'autant plus profondes que l'on étudie des harmoniques d'ordre plus bas. Et de cette donnée, on déduit la profondeur de la zone convective. Les "modes" d'oscillation sont affectés par la rotation de l'astre : là aussi, l'analyse per-

met de montrer que, au-dessous de la zone convective, (environ 70% du rayon solaire), il n'y a pas de rotation différentielle ; le Soleil profond tourne comme un solide, la zone convective seule est affectée par la rotation différentielle. Cette nouvelle discipline exige une observation continue du Soleil, donc des réseaux internationaux associant des équipes de différents pays en différents sites bien distribués en longitude.

Les ondes sismiques se réfléchissent sur les couches profondes du Soleil ; les harmoniques d'ordre le moins élevé se réfléchissant sur les couches les moins profondes... Mais elles n'atteignent pas le noyau de l'étoile et ne permettent donc pas de le "sonder".

La neutrino-astronomie en revanche, permet d'accéder au noyau de l'étoile Soleil. Les réactions thermonucléaires, qui, au bout du compte, transforment 4 noyaux d'hydrogène en un noyau d'hélium, produisent, on l'a dit, de l'énergie. Une partie de cette énergie est véhiculée par des "photons de lumière" (rayons gamma), une autre par des particules de masse très faible, les **neutrinos**, prédits naguère (Pauli, 1930) par la théorie, qui sont très difficiles à observer (on les découvrit en 1956 seulement) car ils traversent pratiquement tout sans se manifester. La réaction la plus fréquente dans le Soleil produit, à partir de quatre noyaux d'hydrogène, un noyau d'hélium, 4 photons et deux neutrinos (fig. 6).

Fig. 11 : Sismologie solaire



A la surface du Soleil, la matière solaire monte, descend... Ici et là, des ébranlements sont provoqués et se propagent dans la masse solaire, à la vitesse du son. En raison de la forte densité des couches profondes, les ondes ainsi produites s'y réfléchissent. Selon l'ordre de ces ondes (à plus ou moins grande longueur d'onde, plus ou moins petite fréquence) elles pénètrent plus ou moins profondément. L'étude de la surface solaire, qui vibre comme une peau de tambour, nous informe sur les propriétés de toutes ces ondes, donc, indirectement, sur la variation de la vitesse du son dans la masse solaire, et par suite sur la distribution des densités et des températures dans le Soleil. La sismologie solaire permet de sonder l'intérieur du Soleil comme la sismologie terrestre permet de sonder l'intérieur de la Terre.

En réalité, les choses sont un peu moins simples, car plusieurs réactions peuvent en fait se produire impliquant notamment les atomes d'hélium déjà formés. Mais le compte ci-dessus est à peu près exact. L'énergie véhiculée vers l'extérieur du Soleil par les neutrinos est du même ordre de grandeur que celle véhiculée par les photons de lumière. Chaque seconde, ce sont des milliards de neutrinos solaires qui traversent ma main tendue...

Mais les neutrinos ne s'arrêtent pas. Ils mettent 8 minutes, pour venir du Soleil, pratiquement à la vitesse de la lumière. Nous pouvons mesurer leur flux, grâce à des réservoirs immenses, enterrés pour les protéger des autres rayonnements corpusculaires, d'origine cosmique ou terrestre. Ces réservoirs contiennent en effet des atomes, (chlore par exemple), dont certains isotopes, sensibles à l'impact d'un neutrino d'énergie suffisante, produisent d'autres isotopes détectables par divers moyens ; ainsi le ^{37}Cl , l'isotope principal du chlore, devient-il un isotope de l'argon après avoir été heurté par un neutrino ; cet argon, gazeux, est dosé, dans un courant d'hélium qui l'entraîne, en sortie du réservoir de composant chloré. On en déduit le nombre de neutrinos qu'un cm^2 de surface terrestre exposée reçoit en un mois.

Ces mesures se font depuis une trentaine d'années par différents procédés. Les premières mesures indiquaient un déficit de 2/3 par rapport aux quantités de neutrinos produits par le noyau solaire, selon des calculs du taux des réactions nucléaires, dans le cadre du "modèle" usuel du noyau solaire ; cette énorme différence a diminué un peu avec de nouvelles mesures, et de nouveaux modèles du noyau solaire. Mais elle existe encore. Faut-il l'attribuer en partie

à certaines propriétés du neutrino ? ... C'est bien possible... Mais c'est une des questions qui restent un peu mystérieuses. N'en doutons pas ; que ce soit du côté de la physique des neutrinos ou de l'astrophysique du modèle solaire, la solution de ce genre de problèmes est proche.

Et la suite ? Soleil et étoiles

Toute une série de développements de la physique solaire est en cours. Mais les résultats des observations sont étonnants et souvent encore incompréhensibles. Donnons-en, simplement, quelques exemples.

Le cycle solaire ne s'est pas toujours comporté comme il semble aujourd'hui. Ainsi, au XVII^{ème} siècle, a-t-on noté l'absence presque complète d'activité pendant plus de 50 ans. C'est ce qu'on appelle "le minimum de Maunder", qui a semblé-t-il, entraîné un petit âge glaciaire sur la Terre. D'après les archives historiques (laissées par Picard, La Hire et d'autres astronomes du XVII^{ème} siècle), la rotation du Soleil était plus lente, la rotation différentielle moins accentuée, le diamètre solaire plus grand. Ces mesures anciennes semblent assez convaincantes, même en faisant la part de la difficulté de calibration de ces mesures.

La luminosité du Soleil, observée à travers "la constante solaire" (quantité d'énergie reçue par cm^2 de surface normale aux rayons solaires et par seconde) est variable. Elle est en phase avec l'activité mais en opposition de phase, semble-t-il, avec le seul rayonnement infrarouge. C'est sans doute à cause de la redistribution sur la surface solaire de l'énergie lumineuse rayonnée, qui évite les taches magnétiques, voire les ré-

gions de magnétisme notable comme les régions polaires. Or, nous sommes presque localisés dans le plan de l'équateur solaire : les régions polaires, vues par nous de biais, ont donc un "poids" très faible dans le rayonnement global que nous observons alors qu'elles pèsent plus dans le rayonnement global du Soleil. Mais encore faut-il confirmer ces données et affiner l'interprétation théorique.

Pourquoi le diamètre solaire semble-t-il, comme le suggèrent fortement les mesures de Francis Laclare, être corrélé avec l'activité solaire ?

Pourquoi le flux de neutrinos (observé par Davis aux USA) semble-t-il associé aussi à l'activité solaire ? Comment les régions responsables de l'activité influencent-elles les régions centrales du Soleil, ce "noyau" où sont générés les neutrinos ?

L'aérosismologie, toute jeune, a déjà montré des oscillations dans diverses étoiles, les δ Scuti par exemple. Elles ne sont pas complètement interprétées.

Des étoiles, trop lointaines, il ne faut pas s'attendre à observer les neutrinos. Pourtant l'explosion, observée en 1987 dans le Grand Nuage de Magellan a entraîné un flux intense de neutrinos, que les observateurs terrestres pensent avoir décelé et mesuré. Là encore, la théorie est loin d'être achevée.

Soleil et étoiles sont en vérité des machines fort compliquées. Il y a là un immense champ de recherche pour les jeunes chercheurs, physiciens et astronomes...

Note de la rédaction

Cet article est l'occasion de lire ou de relire les ouvrages de Jean-Claude Pecker sur le Soleil :

"Sous l'étoile Soleil", Fayard (c.f. CC 28)

"Le Soleil est une étoile"

Explora-Press Pocket

"L'avenir du Soleil", Hachette (c.f. CC 52)

