

Le Soleil

Introduction

La boule de feu qui illumine aujourd'hui nos jours, le Dieu des anciens rayonnant de vie et d'énergie n'est plus aujourd'hui qu'une étoile éblouissante au point de nous incommoder lorsque nous l'observons en face. Le Soleil n'a pas pour autant détourné le regard des astronomes. L'astre du jour, nous l'oublions quelquefois, est en effet une étoile, la plus proche que nous pouvons observer sans aucun problème particulier, sur un laps de temps indéterminé et sous tous les aspects.

En raison de la distance astronomique qui nous sépare des étoiles, celles-ci apparaissent pour la plupart comme de simples petits points scintillants, sans surface appréciable, à l'exception de quelques étoiles géantes qui illuminent le firmament (Betelgeuse, Mira, Sirius). Résigné mais non découragé les astronomes ont étudié les étoiles d'une manière détournée en prenant le Soleil comme exemple. En extrapolant l'activité du Soleil aux autres étoiles, les astronomes peuvent aujourd'hui décrire l'évolution de la plupart d'entre elles, des naines blanches aux géantes rouges ou bleues.

Le Soleil apparaît ainsi comme le seul représentant du monde stellaire, le pont vital qui nous relie au monde des étoiles et à la diversité des phénomènes qui se produisent dans leur atmosphère.

Depuis le XVI^e siècle, grâce à Copernic le Soleil est considéré comme le "centre du Monde", même si d'un point de vue purement astronomique, chacun d'entre nous sait aujourd'hui - ou devrait savoir - que le Soleil n'est qu'une banale étoile perdue dans un bras extérieur de la Galaxie. Point essentiel reconnu par tous, le Soleil est notre unique chance de vie : sans sa force d'attraction la Terre s'échapperait dans l'espace, sans sa lumière et sans sa chaleur toute évolution serait condamnée.

L'attraction du Soleil est tellement forte qu'elle se ressent bien au-delà de l'orbite de Pluton, jusqu'à quelques dizaines de milliards de kilomètres de distance, emprisonnant dans sa sphère d'influence quantité d'objets : les planètes bien sûr mais également les astéroïdes, les comètes, la poussière interplanétaire et des particules atomiques libres.

Le Soleil participe également aux interactions gravifiques avec les étoiles proches et dans une moindre mesure avec tout l'univers (principe de Mach). Rien d'étonnant alors que les astronomes tentent d'expliquer sa nature et son comportement.

L'étude scientifique du Soleil remonte aux travaux d'Arthur Eddington, considéré aujourd'hui comme le "père de l'astrophysique". Laissant aux philosophes la question de l'origine de l'univers, les astrophysiciens formulaient l'espoir de comprendre l'origine de l'énergie du Soleil. Leurs découvertes conduisirent directement à élucider les premières étapes de la création et l'origine du rayonnement des étoiles.

A la même époque les physiciens trouvèrent le moyen de faire exploser le cœur des atomes et de contrôler l'énergie nucléaire. Dans son laboratoire, l'Homme était capable de créer des étoiles.

Nous savons aujourd'hui que le Soleil émet sur toutes les fréquences, tant visibles qu'invisibles des rayonnements formés suite à différents processus, mais dont la cause est unique : la matière est excitée électroniquement. Cette agitation est fonction de la température, de la pression et du champ magnétique régnant localement.

L'agitation des particules engendre une série de rayonnements, émissions nécessaires pour la survie du Soleil et pour que les atomes excités retrouvent leur stabilité, c'est un principe physique universel.

Cette émission peut-être un rayonnement radio, lumineux, X ou gamma. Une "lumière" isolée ou radiation monochromatique transporte donc une énergie tributaire des conditions physiques qui règnent dans l'enceinte du Soleil. C'est la raison pour laquelle, en présence d'un corps inconnu et inaccessible, l'analyse spectrale de son rayonnement permettra de déterminer son état physique et chimique, et donc de proposer des modèles qui expliqueront sa formation.

De nos jours l'astrophysique solaire ne peut plus se contenter d'observations faites au sol. Depuis l'avènement de l'exploration spatiale, les missions Luna, Mariner, Skylab, Helios, Voyager, Soho, Trace, Yohkoh, Ulysses et consorts ont apporté des données très précieuses sur le rayonnement et le comportement capricieux du Soleil.

Ces recherches intensives souvent conduites en dehors du spectre visible ne furent possibles qu'en combinant le développement d'instrumentations électroniques et d'outils informatiques. En moins de 20 ans nous avons appris plus sur le Soleil que durant les 2 siècles précédents. Comme nous allons le découvrir ces observations ont profondément modifié l'astrophysique solaire permettant aux scientifiques de mieux comprendre la nature de cette étoile unique à nos yeux, notre Soleil.

L'astrophysique solaire

Que nous dit aujourd'hui l'astrophysicien solaire ? Avant tout chose, il faut savoir que la coloration jaune du Soleil est liée à plusieurs phénomènes. Ce sont les effets combinés de la diffusion et de la réfraction atmosphérique de la lumière solaire sur les électrons et les poussières présents dans l'atmosphère terrestre ainsi que l'inégalité de la sensibilité rétinienne qui donnent au Soleil sa coloration jaune.

En fait le Soleil rayonne autant en lumière visible qu'en infrarouge. Le restant (8%) se partageant un spectre allant de l'infrarouge lointain aux ondes radios.

Si nous comparons le Soleil à un corps qui serait en équilibre thermodynamique, en gommant en première approximation le fait qu'il s'entoure d'un champ magnétique et qu'il perde de l'énergie en irradiant dans l'espace, nous pouvons travailler sur ce que l'on appelle un "corps noir" et calculer sur base de la loi de Planck sa température superficielle. Mais définissons tout d'abord ce qu'est un "corps noir".

Imaginez comme le fit Wilhelm Wien à la fin du siècle dernier, un four totalement hermétique dans lequel on a percé un petit trou. Cet orifice permet de mesurer tout le spectre de rayonnements qu'il émet quand on le chauffe.

Pour obtenir un corps noir qui rayonne comme le Soleil en-dehors de l'atmosphère terrestre, nous devons le porter à une température d'environ 5780 K (ajouter 273,15 K pour obtenir la valeur en

degrés Celsius) et la matière doit se trouver à l'état de plasma, les gaz étant très fortement ionisés. La loi de Stephan précise que la puissance totale rayonnée par le corps noir par unité de surface doit être proportionnelle à la quatrième puissance de sa température absolue. En d'autres termes, à surface égale, si la température du Soleil avait été de 8000 K (1,33 fois plus élevée) il rayonnerait 3 fois plus d'énergie.

Cela dit le rayonnement du Soleil n'est pas exactement celui d'un corps noir, car le Soleil n'est pas un corps séparé du monde extérieur. Il n'absorbe pas toute l'énergie qui l'atteint et utilise une partie de celle qu'il produit. En outre les particules chargées qu'il émet interagissent avec le champ électromagnétique, l'ensemble de ses émissions contribuant à dissiper son énergie. La radioastronomie viendra confirmer cette approche.

Mais le Soleil est surtout une approximation du corps noir du fait que son atmosphère devient de plus en plus opaque à mesure que l'on s'enfonce dans les profondeurs, présentant une structure bien plus détaillée que celle qu'on imagine à partir de la loi du corps noir.

Le Soleil représente plus de 99% de la masse du système solaire, soit quelque 1.99×10^{30} kg. Il se compose d'atomes ionisés par la température et d'électrons libres. Sa densité moyenne est 1.4 fois celle de l'eau et il est constitué de 92% d'hydrogène et d'environ 7.8% d'hélium. Reste quelques traces de métaux récoltés dans le processus protostellaire et surtout élaborés dans la nucléosynthèse, mécanisme qui sera détaillé un peu plus loin.

Anatomie d'une étoile

A partir de la masse du Soleil et de son rayon estimé à 696000 km, on peut en déduire que la température qui règne dans son noyau est de 15.43 millions de degrés sous une pression voisine de 145.7 g/cm^3 . Cette partie active du noyau n'occupe toutefois qu'un centième de son volume total. Selon les modèles, le "feu nucléaire" est pratiquement éteint à 25% de la distance de la surface ou 175000 km du centre. A cet endroit la température a chuté de moitié et la densité est tombée à environ 20 g/cm^3 , équivalente à celle de l'or ou du plomb. A 75% de la distance au centre, la densité n'est plus que de 0.2 g/cm^3 , le cinquième de celle de l'eau et nous nous trouvons en lisière de la zone de convection. Sur ces 380000 km la température a chuté de 7000000°C à environ 2000000°C . Pour finir la température atteint 5780 K sur la surface, où la densité n'est plus que de 10^{-7} g/cm^3 , dix mille fois inférieure à la densité de l'air qui règne sur Terre en bordure de mer, une valeur comparable au vide.

L'intérieur du Soleil se subdivise en quatre régions dans lesquelles se produisent des réactions bien différentes. Ainsi que nous venons de le voir, en raison de sa densité et de sa température, son noyau dégage beaucoup d'énergie suite aux réactions de fusions nucléaires qui s'y déroulent de façon continue. Cette intense énergie irradie vers l'extérieur principalement sous forme de rayons gamma, de rayons X et de neutrinos.

Ces rayonnements traversent ensuite la zone radiative puis se transforment en chaleur en formant des courants fluides convectifs dans les derniers 100000 km, c'est la zone convective (mouvement bouillonnant) qui s'étend jusqu'à la surface solaire. Cette convection déclenche des mouvements turbulents qui produisent des ondes gravitationnelles, acoustiques et magnétohydrodynamiques. On pense aujourd'hui que la fine zone de transition entre la zone radiative et la zone convective est le siège du champ magnétique du Soleil, son activité majeure, sur laquelle nous nous attarderons un peu plus loin et qui semble transformer le Soleil en une véritable dynamo magnétique.

La surface du Soleil émet également des particules énergiques qui forment le "vent solaire". Tout ce flux d'intense énergie percute la Terre quelques minutes ou quelques heures plus tard, perturbant les télécommunications et formant les aurores polaires. Toute cette énergie, comme nous venons de l'expliquer, est surtout condensée dans la lumière.

Le Soleil reste une petite étoile. Sa magnitude visuelle est de -27, il brille d'un éclat éblouissant, mais repoussé à 10 parsecs il n'est plus qu'une banale étoile de magnitude absolue 4.83.

Ce résumé est séduisant allez-vous me dire, mais comment connaissons-nous les mécanismes qui régissent l'activité du Soleil ? Nous devons considérer trois problèmes : pourquoi brille-t-il, quelle est la source de son énergie et comment a-t-il créé les éléments ? Ce greffe sur ces questions les problèmes liés à son activité de surface et électromagnétique. Ils seront développés séparément.

L'évolution du Soleil

Si nous connaissons de mieux en mieux la structure actuelle du Soleil, que pouvons-nous présager de son avenir ?

La durée de vie du Soleil est estimée à quelque 10 milliards d'années, comptées entre le moment de sa formation au sein du nuage protosolaire et sa disparition comme étoile naine.

Durant les trois prochains milliards d'années sa luminosité augmentera graduellement de 33%, l'augmentation de sa température superficielle accroissant son rayon de 13%. Bien avant d'arriver à ce stade, sa luminosité sera intolérable. On peut en effet considérer que durant les 600 millions d'années qui vont suivre sa luminosité augmentera de 10%, provoquant l'évaporation de la surface des mers. Les océans disparaîtront lorsque sa luminosité aura atteint 40% de plus, ce qui devrait se produire d'ici 3.5 milliards d'années. Sur l'échelle des temps cosmiques cette catastrophe n'est pas très éloignée de nous.

Le véritable cataclysme solaire surviendra beaucoup plus tard. Dans 4.8 milliards d'années la combustion de son hydrogène cessera; son cœur alors stabilisé contiendra de l'hélium et des éléments plus lourds. Durant 1.6 milliards d'années sa structure interne s'épaissira, portant sa luminosité à 2.2 fois celle qu'il a aujourd'hui. Cent millions d'années plus tard, ce qui nous porte dans 6.5 milliards d'années, le Soleil aura alors une réaction surprenante : en accord avec la loi des gaz parfaits, la contraction du noyau provoquera une élévation substantielle de la température et de la pression qui déclenchera la fusion de l'hydrogène dans les couches supérieures jusque là épargnées. Cette chaleur provoquera une dilatation démesurée de son enveloppe et sa luminosité augmentera rapidement. Ce processus transformera physiquement le Soleil. Sa surface gonflera rapidement sur une période de 700 millions d'années et il deviendra dix mille fois plus volumineux qu'aujourd'hui; son rayon décuplera.

Durant cette phase instable l'atmosphère supérieure étant très éloignée de l'influence des forces gravitationnelles, le milieu se raréfie et se dissipe dans l'espace. Le Soleil s'entourera alors d'un halo riche en éléments enrichis par la transformation de l'hydrogène et de l'hélium en éléments plus lourds.

Au bout d'un milliard d'années, les effondrements successifs auront provoqué une augmentation de la pression et de la température au cœur du Soleil. La température centrale atteindra 100 millions de degrés et là où l'Univers primordial n'avait pu franchir la fusion de l'hélium, l'étoile a réussi. Il est vrai que cet astre dispose de millions d'années pour réunir par hasard les hélions

alors que l'on n'accorda pas plus de trois minutes à l'Univers primordial, l'expansion de l'Univers ayant éparpillé tous "ses enfants" dans ce délais de temps.

Le Soleil commencera lentement à brûler l'hélium qui entoure son cœur. L'énergie libérée va transformer les atomes d'hydrogène non encore employés dans les couches superficielles de son atmosphère, provoquant une réinitialisation de l'étoile. La fusion de l'hélium est tellement rapide qu'on l'a baptisée le "flash de l'hélium". Cette réaction est instable il lui faudra 160 millions d'années pour retrouver son calme. Le Soleil devrait connaître 5 flashes d'hélium successifs après lesquels il tentera de se stabiliser, provoquant une nouvelle contraction du noyau pour éviter d'exploser.

Le Soleil étant une petite étoile de masse très faible, les astrophysiciens estiment qu'après être passé par le stade de géante rouge et connu les flashes de l'hélium, il retrouvera une certaine jeunesse. Après s'être dilaté jusqu'à l'orbite terrestre sa taille diminuera à nouveau, il deviendra moins chaud et retrouvera un léger hâle jaune-orange. A ce stade le Soleil aura perdu quelque 28% de sa masse. Mais son insouciance fera long feu. Le cycle proton-proton, essentiel à son activité, sera rapidement privé de combustible dans le noyau, aussi la fusion de l'hélium se poursuivra dans les couches périphériques avec pour conséquence de gonfler démesurément l'enveloppe du Soleil.

Certains scénarios prédisent que le résultat de cette réaction portera son enveloppe jusqu'à l'orbite de Jupiter, grillant la Terre sur son passage
Notre planète sera engloutie dans l'atmosphère solaire et finira dans son noyau dans un long mouvement spiralé.

Avec un peu d'imagination on peut se représenter l'aspect qu'aura le Soleil à cette époque, sachant qu'il brillera 2349 fois plus fort qu'aujourd'hui et sous-tendra un angle de 69° à la surface de la Terre.

Quoi qu'il en soit, après cette phase cataclysmique le Soleil aura perdu les couches externes de son enveloppe et en son sein ne subsisteront que des cendres nucléaires.

Le Soleil terminera sa vie environ 50 millions d'années plus tard. Son noyau se contractera pour devenir une naine blanche toute auréolée de gaz formant une nébuleuse planétaire qui accrochera le regard d'éventuels observateurs.

Le cœur central porté à température d'environ 10000 K se refroidira graduellement pour finalement disparaître et devenir un corps sombre et inerte.

Le transport de l'énergie

Comment le Soleil dissipe-t-il son énergie ? Son atmosphère est-elle homogène ou y a-t-il des zones de gradients ? Ces questions ont soulevé bien des controverses depuis le développement de l'astrophysique solaire. Les astronomes ne savent pas encore précisément comment le Soleil transporte son énergie vers la surface. On sait toutefois que sa structure répond à l'état de la matière et aux processus qui se développent dans son noyau.

Pour assurer son équilibre, à l'image d'une bouilloire, le Soleil est obligé de libérer l'énergie qu'il produit dans son noyau. Ce rayonnement se propage jusqu'à la surface et se dissipe dans l'espace. Cette fonction de "ventilation" est très importante car si la chaleur interne ne pouvait s'échapper, la pression interne augmenterait et le Soleil exploserait rapidement. Cette chaleur doit donc être

dissipée et si possible sans faire obstacle au développement du Soleil, c'est-à-dire sans contraindre les réactions thermonucléaires. Ainsi que nous en discuterons un peu plus loin, cette énergie est transportée selon deux modes :

- Le **transport par rayonnement**, qui est un processus par lequel l'énergie centrale est transformée par les successions d'émissions et d'absorptions atomiques à mesure qu'elle monte vers la surface. L'énergie est ainsi diffusée sur tout le spectre. Ce mode de transport se développe dans la zone radiative qui s'étend entre la limite du noyau et la couche interface située à la base de la zone convective, soit entre 25 et 74% de la distance du centre à la surface solaire. Dans cette zone de radiation règne un calme plat fort différent de l'activité convective qui règne au-dessus

En théorie le libre parcours moyen d'un photon dans le noyau est de quelques millimètres. C'est ce qui explique pourquoi le rayonnement émis par la surface solaire s'est formé il y environ deux millions d'années au centre de l'étoile dans les mécanismes de fusion précités et ne s'échappe qu'aujourd'hui de son atmosphère à travers de multiples processus de transferts d'électrons à électrons. Seul le neutrino ne subit pas l'influence des forces électromagnétiques et gravitationnelles et parvient à la surface du Soleil à la vitesse de la lumière, environ deux secondes après son émission. Il faut ainsi 8 minutes et 2 secondes aux neutrinos pour arriver sur Terre.

- Le **transport par convection**, qui assure également le transfert de l'énergie du noyau vers la surface. L'équipe de W.Fowler de Caltech estima que dans le modèle solaire, la distance à partir de laquelle le transfert d'énergie par convection dépassait le transfert par rayonnement se situait à 74.1% du rayon solaire (R_{\odot}), à un niveau de température encore proche de 2 millions de degrés. Pourquoi cette zone présente-t-elle des mouvements convectifs et semble bouillir ?

A partir de 0.86 R_{\odot} et dans une zone large de 100000 km environ la température est suffisamment "froide" pour que les ions lourds (tels le carbone, azote, oxygène, calcium et fer) retiennent quelques uns de leurs électrons. Ce phénomène rend la matière solaire plus opaque ce qui a pour conséquence de piéger la chaleur et de ralentir la progression du flux d'énergie ascendant. Le milieu devient plus dense et absorbe plus facilement l'énergie. Ici le gaz est déjà 10 fois plus froid que dans la zone interface et atteint 500000°C. A présent l'énergie voit son parcours semé d'embûches, nous sommes dans la zone de convection dans laquelle les courants transportent rapidement la chaleur vers la surface. Mais à mesure qu'ils montent les fluides s'étendent et ils se refroidissent, si bien que les mouvements convectifs sont interrompus et le rayonnement ne peut atteindre la surface et se dissiper. Le plasma a donc tendance à s'enfoncer dans la zone de convection.

Plus haut encore, lorsque la température est suffisamment basse pour que l'hydrogène et l'hélium se recombinent avec les électrons libres, l'énergie est piégée dans les atomes. Le gaz n'absorbe pas le rayonnement mais au contraire il ralentit le refroidissement ce qui provoque une amplification des mouvements convectifs.

La convection s'entretient tant que le gaz est plus chaud que le milieu ambiant et la densité suffisante pour absorber l'énergie. Ces mouvements convectifs s'étendent jusqu'à la photosphère, la surface visible du Soleil en lumière blanche. Dans un processus similaire au développement des cellules de Bénard, des nuages cumuliformes ou de l'huile que l'on chauffe sur une plaque, ces mouvements convectifs se rassemblent pour former des cellules que l'on peut décrire comme une juxtaposition de petits tubes convectifs. Ils apparaissent dans la photosphère sous la forme de petits "grains de riz" que l'on appelle la "granulation".

Cela nous conduira à décrire cette première enveloppe gazeuse, la photosphère visible en lumière blanche et les niveaux qui l'entourent, la chromosphère, siège des émissions de l'hydrogène-alpha ainsi que la couronne source de ses émissions de rayons X.