

LE CLIMAT, ENFANT DU SOLEIL

*Je te salue, âme du monde,
Sacré Soleil, astre de feu,
De tous les biens, source féconde...
Malfilâtre*

LE SOLEIL, SOURCE D'ÉNERGIE PRIMORDIALE

Notre étoile, comme la plupart de celles qui émaillent le ciel, est une gigantesque boule gazeuse constituée d'hydrogène principalement et dont le cœur est porté à plusieurs millions de degrés... À cette température, l'hydrogène se transmute en hélium avec une perte de matière d'environ 0,7 % (« défaut de masse ») qui correspond à l'énergie libérée par le *rayonnement solaire*. Dans la phase actuelle de sa vie, le Soleil perd ainsi, chaque seconde, 5 millions de tonnes de sa masse en énergie rayonnante. Cette énergie s'échappe de notre étoile sous la forme d'ondes électromagnétiques qui envahissent l'espace à la vitesse de la lumière (elle parcourt la distance du Soleil à la Terre en un peu plus de 8 mn). L'essentiel de ce rayonnement se situe dans la gamme de longueurs d'ondes s'étendant de 0,1 à 3 μm ¹ et se répartit dans trois plages spectrales : 48 % dans l'*infrarouge* (IR), 43 % dans le *visible* (VIS) et seulement 9 % dans l'*ultraviolet* (UV). Ce prodigieux gisement qui inonde l'espace depuis près de

¹ Micron (μm), unité de longueur égale à un millionième de mètre.

5 milliards d'années n'a pas encore épuisé la moitié de son stock originel. Le Soleil se consume donc « à petit feu » à la manière d'un réacteur thermonucléaire géant. En raison de l'éloignement de ce brasier stellaire et de la surface très modeste qu'elle lui présente, la Terre n'intercepte qu'une fraction infime de ce rayonnement qui correspond quand même à une puissance de 180 000 milliards de kW, soit une moyenne de 1,4 kW/m². Précisons toutefois que cette dernière valeur s'applique à une surface qui serait placée au-dessus des couches denses de l'atmosphère et perpendiculairement aux rayons solaires. Ce flux somme toute modeste mais continu et régulier, appelé « constante solaire », est cependant l'énergie primordiale qui a permis l'éclosion et l'épanouissement de la Vie sur notre planète. C'est aussi le carburant qui fait fonctionner la machine climatique.

LE DESTIN TERRESTRE DE L'ÉNERGIE SOLAIRE

Parvenue à la surface du sol, l'énergie solaire a subi une réduction plus ou moins importante. Trois facteurs sont responsables de cette dégradation :

- Le *filtrage* exercé par l'atmosphère sur le rayonnement qui la traverse dépend des qualités de transparence de l'air, traduites par un coefficient toujours inférieur à l'unité. Celui-ci atteint 0,8 dans des conditions exceptionnelles de limpidité du ciel mais reste compris le plus souvent entre 0,3 et 0,7 selon l'importance du couvert nuageux et la densité des *aérosols* (particules en suspension).

- L'*épaisseur d'atmosphère traversée*, variable en fonction de l'*incidence* du rayonnement (c'est-à-dire de la hauteur du Soleil au-dessus de l'horizon) est évidemment minimale lorsque le Soleil est au zénith (à la verticale d'un point du Globe) et maximale à son lever et à son coucher (où les

rayons rasants la surface de la Terre traversent une couche d'air 35 fois plus épaisse). La déperdition d'énergie au cours de ce trajet atmosphérique est donc proportionnelle à la longueur de celui-ci.

– La *projection sur le sol* du rayonnement solaire résiduel, s'étale sur un espace d'autant plus étendu que l'incidence est faible et pénalise en conséquence l'énergie qui lui est liée par un effet supplémentaire d'érosion. Il est évident que, là encore, les conditions optimales sont réalisées lorsque le Soleil est au zénith, la projection s'effectuant alors verticalement et par suite sans déformation.

Les considérations précédentes s'appliquent à des phénomènes instantanés et ne permettent pas d'appréhender l'apport d'énergie en des points précis de notre planète et au cours d'une durée déterminée (jour, saison, année,...). Pourtant il s'agit là d'une information importante car la distribution spatiale de l'énergie solaire sur le Globe terrestre et ses variations temporelles (à l'échelle saisonnière notamment) constituent la base même de la géographie des climats. Cette distribution est étroitement contrôlée par des facteurs astrophysiques qui déterminent les mouvements de *rotation* et de *révolution* de la Terre.

La valse de la Terre

Un détour vers la mécanique céleste s'impose car parmi les mouvements qui animent la Terre, deux d'entre eux jouent un rôle essentiel dans l'évolution journalière et saisonnière de la répartition de l'énergie solaire sur le Globe :

– La *rotation terrestre* autour de l'axe polaire entraîne l'alternance jour/nuit au cours d'un cycle diurne. On conçoit aisément qu'à chaque instant, la moitié de la surface du Globe terrestre (quasi sphérique) soit éclairée par le Soleil et que les divers points de cette surface n'interceptent pas ses rayons sous le même angle (fig. 1).

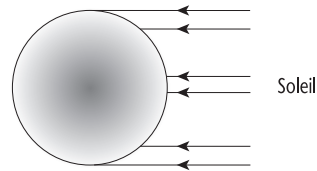


Figure 1. **Variation de l'incidence du rayonnement solaire sur le méridien de midi selon le lieu**

En tout point de la Terre, le Soleil décrit, de son lever à son coucher, un mouvement apparent en forme de courbe qui culmine à « midi solaire » (passage « au méridien »). À cet instant, le rayonnement solaire est évidemment le plus énergétique... si le ciel est clair !

– La *révolution terrestre* autour du Soleil s'effectue sur une orbite approximativement circulaire dans un cycle annuel (fig. 2).

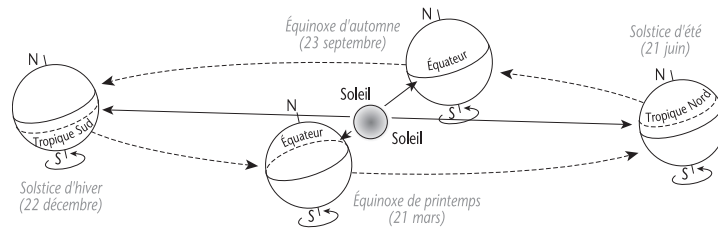


Figure 2. **Positions de la Terre sur son orbite aux solstices et aux équinoxes**

Mais le plan de révolution (ou de l'écliptique) et le plan de rotation (plan équatorial) ne coïncident pas. Leur intersection forme un angle de $23^{\circ}26'$ qui fixe la latitude des tropiques situés de part et d'autre de l'équateur. En conséquence, au cours de ce périple annuel, le Soleil passe successivement au zénith de toutes les régions situées entre le tropique du Cancer ($23^{\circ}26'N$) qu'il atteint au solstice d'été et le tropique du Capricorne ($23^{\circ}26'S$), au solstice d'hiver. Ces singularités astrophysiques expliquent le rythme des saisons, la variabilité de la durée d'illumination (durée du jour) et de la hauteur du Soleil au-

dessus de l'horizon à son passage au méridien. Elles induisent donc des disparités importantes dans la répartition de l'énergie solaire sur le Globe terrestre.

La composition des mouvements de rotation et de révolution entraîne une série de conséquences perceptibles dans la vie courante :

- en un point donné, à midi solaire, la hauteur angulaire du Soleil au-dessus de l'horizon passe par un maximum (*culmination*) ; elle varie chaque jour ; à Paris, elle évolue entre 17°30' le 22 décembre et 64°30' le 21 juin tandis que, sur le cercle polaire arctique, elle passe de 0° à 46°52' ;
- la durée du jour, invariable à l'équateur, augmente ou diminue selon les saisons dès qu'on s'en éloigne (à Paris, elle dépasse à peine 8 heures le 22 décembre pour s'élever à plus de 16 heures le 21 juin) ; on sait qu'aux très hautes latitudes, la nuit comme le jour se prolonge sur plusieurs semaines, voire plusieurs mois. Toutefois, à l'échelle annuelle, l'équité est sauve car tous les points de la Terre totalisent la même durée d'illumination, 4 400 heures !

Les solstices, au comble du déséquilibre énergétique

On constate que si l'on calcule l'apport total d'énergie solaire en un point du Globe sur un jour donné (entre le lever et le coucher du Soleil), *culmination solaire et durée du jour cumulent leurs effets*. Il est curieux de constater qu'au solstice d'été (21 juin), l'énergie parvenant au pôle Nord (jour continu) est supérieure de 10 % à celle reçue par l'équateur dans l'hypothèse très irréaliste, il est vrai, d'un ciel parfaitement limpide ; la tendance s'inverse en effet dès que l'on adopte un coefficient de transparence correspondant à un ciel faiblement nuageux. Néanmoins, la durée d'illumination compense en partie l'effet lié à des rayons solaires très obliques.

Mais à l'échelle annuelle, le pôle ne reçoit que 17 % de l'énergie parvenant à l'équateur ; à 45° de latitude (Bordeaux, Christchurch...), on reçoit environ 58 % de celle-ci et sous les tropiques un peu moins de 89 %. La ceinture inter-tropicale est donc privilégiée tout au long de l'année alors que les calottes polaires (limitées par le cercle polaire situé à 66°34' de latitude dans chaque hémisphère) sont toujours pénalisées malgré la durée importante d'illumination estivale. Les latitudes moyennes reçoivent plus ou moins d'énergie en raison des variations saisonnières de la durée du jour et de l'incidence du rayonnement. Pour fixer les idées, les calculs montrent qu'à 47° N (Nantes, Oulan-Bator ou Québec...), par ciel clair ou peu nuageux, l'énergie solaire parvenant au sol au moment de la culmination solaire (à « midi solaire ») est cinq fois plus importante au solstice d'été qu'au solstice d'hiver. C'est d'ailleurs aux environs de 55° de latitude que cette variabilité est maximale : elle atteint alors un facteur 7 si l'on admet comme précédemment un coefficient de transparence atmosphérique égal à 0,6.

LA GESTION TERRESTRE DE L'ÉNERGIE SOLAIRE

Les variables cosmiques analysées précédemment fixent la répartition spatiale et temporelle de l'énergie interceptée par la surface de la Terre. Elles fournissent déjà les grands traits du champ¹ thermique global mais ne rendent pas compte des réactions spécifiques des divers milieux terrestres vis-à-vis du rayonnement solaire qui les atteint.

¹ En Physique, un champ est un espace où se manifeste un phénomène ou une force.

Le sort réservé aux ondes porteuses d'énergie

Précisons quelques notions essentielles concernant les phénomènes radiatifs. Lorsqu'elles sont interceptées par un corps, les ondes électromagnétiques transportant l'énergie rayonnante peuvent être absorbées, réfléchies ou encore diffusées.

- L'*absorption* est un phénomène qui transforme l'énergie du rayonnement en énergie calorifique et conduit ainsi le corps qui absorbe à s'échauffer. Cet effet s'applique principalement aux radiations visibles (VIS) et infrarouges (IR), partiellement aux UV qui produisent en outre des réactions photochimiques.

- La *réflexion*, à l'inverse, est le rejet du rayonnement incident, à l'instar du miroir qui réfléchit la lumière. La proportion d'énergie réfléchie par rapport à l'énergie incidente est l'*albédo* ; l'albédo de la neige varie entre 0,70 et 0,85.

- La *diffusion* peut être assimilée à une réflexion multiple des rayons dans toutes les directions de l'espace, sans modifier leur longueur d'onde comme dans le cas précédent.

On doit se souvenir aussi que tous les corps (solides, liquides ou gazeux) émettent des rayonnements électromagnétiques dont la longueur d'onde dépend de leur température. Cette relation est importante car elle permet d'estimer la température d'objets lointains (comme les étoiles) en analysant leur spectre¹ de rayonnement. Les satellites d'observation de la Terre, équipés de radiomètres appropriés, donnent de cette façon une image relativement satisfaisante du champ thermique planétaire.

D'un point de vue pratique, il faut retenir principalement que si la Terre est réchauffée par le Soleil en absorbant une

¹ Ici, il s'agit de la distribution des différentes ondes émises par un corps en fonction de leur longueur ou de leur fréquence.

partie de ses rayons, elle devient à son tour une source d'émission d'ondes électromagnétiques. Celles-ci sont comprises exclusivement dans la gamme de l'IR (ce qui est compatible avec les températures terrestres). L'intensité de ce spectre est maximale aux alentours de $10\text{ }\mu\text{m}$, correspondant approximativement à une température de 15°C . En somme, l'énergie reçue du Soleil sous la forme d'un rayonnement de petite longueur d'onde est dégradée en un rayonnement de plus grande longueur d'onde émis par la Terre.

Les réactions radiatives des milieux terrestres

Le rayonnement solaire abondant notre planète rencontre d'abord l'atmosphère puis les divers éléments de la surface terrestre : l'eau principalement (océans, mers et lacs couvrent 71 % de la surface du Globe), les étendues englacées, le sol proprement dit enfin, presque totalement dénudé dans les déserts, vêtu d'une végétation plus ou moins fournie ailleurs. Le rayonnement propre de la Terre (émission tellurique) est confronté lui aussi au milieu atmosphérique.

L'atmosphère exerce une absorption sélective en raison de sa composition hétérogène. Ses principaux constituants gazeux (azote, oxygène) n'interviennent pas dans le domaine climatique. En revanche, certains de ses composants mineurs jouent un rôle important.

Ainsi, la *vapeur d'eau* (en quantité variable selon les régions et les types de temps) absorbe l'IR vers $1,4\text{ }\mu\text{m}$ (elle peut alors capter 1/10 de l'énergie solaire), dans la bande $6\text{--}8\text{ }\mu\text{m}$ et surtout au-delà de $15\text{ }\mu\text{m}$, là où le rayonnement de la Terre est encore important. Ce point est capital car, en retenant une partie de l'émission tellurique, elle évite son évacuation vers l'espace et joue ainsi le rôle d'un clapet thermique, phénomène appelé *effet de serre*, en raison d'une certaine analogie avec le fonctionnement de la serre de l'horticulteur.