

I.1 Introduction

Le soleil est notre principale source d'énergie. Il permet le rythme des saisons, la vie sur Terre, il est nécessaire à la dynamique atmosphérique et océanique. C'est l'étoile la plus proche de la Terre qui permet de comprendre le fonctionnement stellaire et de l'Univers. La Terre est située à 150 millions de km du Soleil. La Terre reçoit **178 millions de milliard de Watt sur sa face éclairée soit 350 Watt par m² à l'équateur**. Le rayonnement solaire est un rayonnement électromagnétique composé essentiellement :

- de lumière visible de longueur d'onde comprise entre 400 nm et 800 nm ;
- de rayonnement infrarouge (IR) de longueur d'onde supérieure à 800 nm ;
- de rayonnement ultra-violet (UV) de longueur d'onde inférieure à 400 nm.

Sur Terre, l'atmosphère (via le dioxyde de carbone, l'ozone, la vapeur d'eau...) absorbe en grande partie les IR et les UV et un peu la lumière visible. Ainsi plus l'épaisseur d'atmosphère traversée est importante, plus la quantité d'énergie solaire reçue par le sol est faible. Quand on se rapproche des pôles, les rayons sont plus inclinés : la même quantité d'énergie se répartie sur une plus grande surface. C'est pourquoi le rayonnement solaire par unité de surface reçu diminue de l'équateur vers les pôles (ceci, avec l'inclinaison de l'axe de la Terre, est à l'origine du phénomène des saisons).

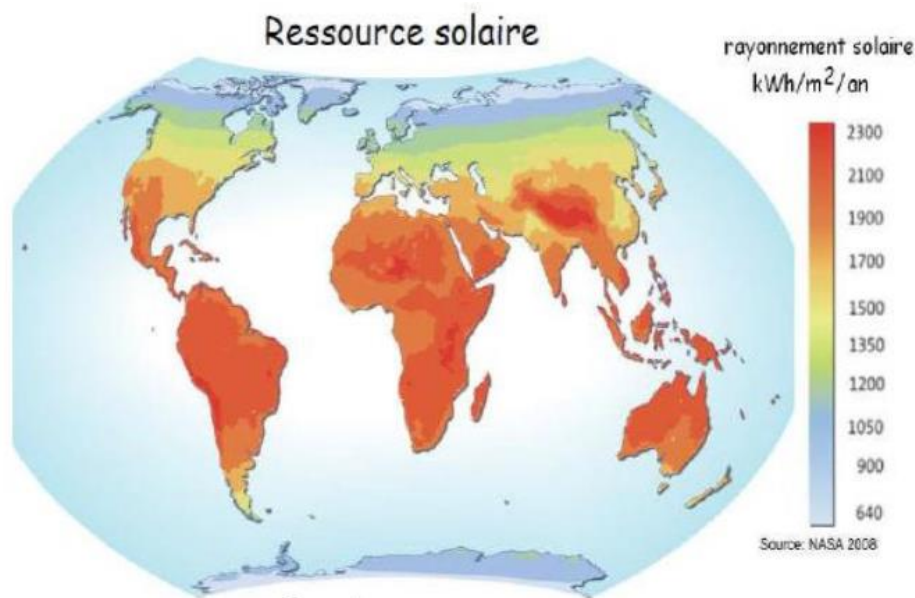
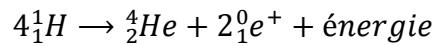


Figure I.1 : Rayonnement solaire annuel en [kWh/m²/an]

C'est essentiellement la réaction de fusion de l'hydrogène en hélium qui est la cause de la libération de l'énergie du Soleil.



Le rayonnement solaire est un rayonnement thermique qui se propage sous la forme d'ondes électromagnétiques. Il produit à la lisière, mais en dehors de l'atmosphère terrestre, un éclairage énergétique à peu près constant et égal à $1\,370\text{ W/m}^2$ (figure I.2), appelé de ce fait : *constante solaire Ics*.

Pour atteindre chaque point de la surface éclairable du globe terrestre, les rayons solaires traversent l'atmosphère qui dissipe une partie de l'énergie provenant du soleil par :

- Diffusion moléculaire (en particulier pour les radiations U.V.)
- Réflexion diffuse sur les aérosols atmosphériques (gouttelettes d'eau, poussières...)
- Absorption sélective par les gaz de l'atmosphère.

L'atténuation correspondante du rayonnement solaire dépend de l'épaisseur de l'atmosphère traversée, celle-ci dépendant à son tour de la latitude du lieu considéré et du temps.

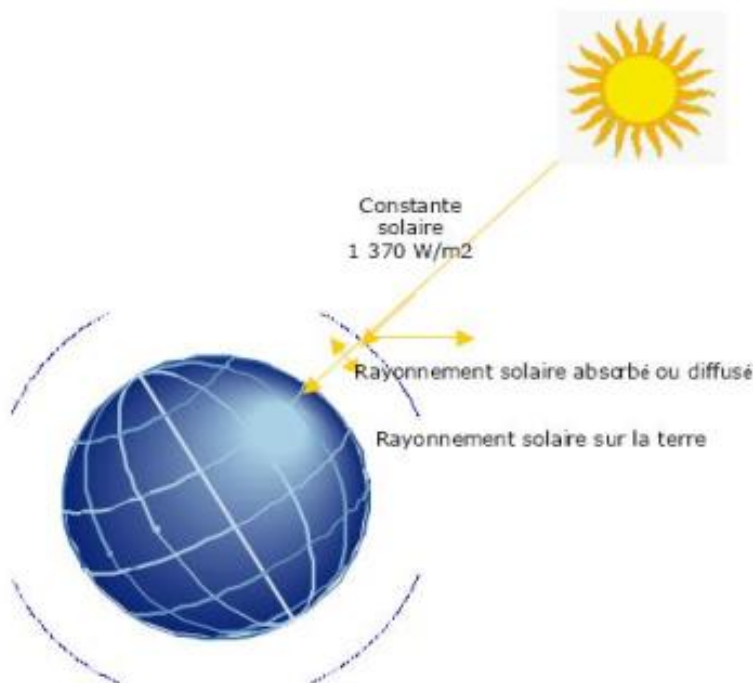


Figure I.2 : Propagation du rayonnement solaire dans l'atmosphère

A la surface de la terre, le rayonnement solaire global est la somme des rayonnements :

- Direct, ayant traversé l'atmosphère,
- Diffus, en provenance de toutes les directions de la voûte céleste.

Une surface exposée reçoit ainsi du rayonnement direct et diffus (Figure I.3), mais elle reçoit en plus une partie du rayonnement global réfléchi par les objets environnants, en particulier par le sol, dont le coefficient de réflexion est appelé « albédo ».

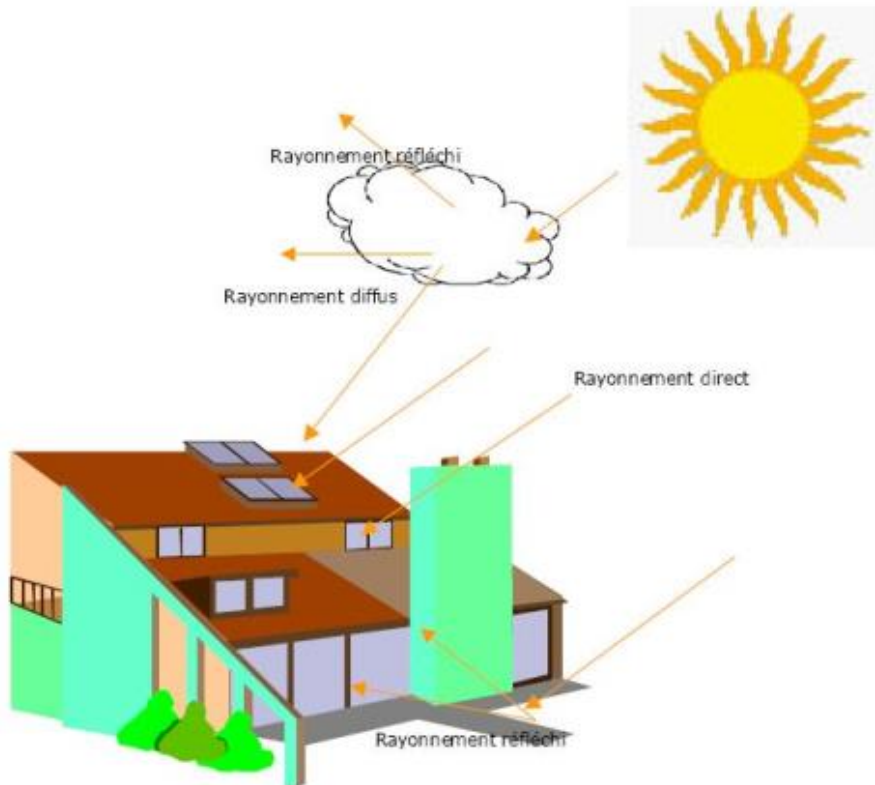


Figure I.3 : Le rayonnement solaire à la surface de la terre.

2. Modes de transmission de chaleur

Lorsque deux systèmes sont à des températures différentes, le système le plus chaud cède de la chaleur au plus froid. Il y a échange thermique ou encore transfert thermique entre ces deux systèmes. Cette situation se rencontre dans de nombreuses situations industrielles (moteurs thermiques ou même électriques, centrales électriques au fuel au gaz, etc..., électronique) ou domestique (chauffage de l'habitat). Un transfert d'énergie donne lieu à un flux de chaleur qui correspond à un déplacement de l'énergie du plus chaud vers le plus froid. Comme on le verra

par la suite, le flux de chaleur dont la densité locale est notée $\vec{\varphi}$ est une grandeur vectorielle, ce qui signifie qu'un flux de chaleur est caractérisé non seulement par son intensité mais aussi par sa direction. Il est défini en chaque point de l'espace et a l'unité d'une densité surfacique de puissance (W/m^2). Il existe trois modes essentiels de transferts de chaleur : la conduction, la convection et le rayonnement.

2.1 La conduction

On sait que la température est une fonction croissante de l'agitation moléculaire dans un corps, qu'il soit solide, liquide ou gazeux. Considérons pour l'instant un corps solide au sein duquel la température varie. L'agitation moléculaire élevée de la zone chaude communiquera de l'énergie cinétique aux zones plus froides par un phénomène appelé conduction de la chaleur. La conduction est un phénomène de diffusion qui permet donc à la chaleur de se propager à l'intérieur d'un corps solide. Il en est de même pour un liquide ou un gaz mais on verra par la suite que pour eux, la convection est un autre mode de transfert de chaleur possible. Notons enfin que la conduction de la chaleur n'est pas possible dans le vide puisqu'il n'y a pas de support moléculaire pour cela.

2.2 La convection

Un débit ou une circulation de liquide ou de gaz peut transporter avec lui une certaine quantité d'énergie thermique. Ce transport de chaleur porte le nom de CONVECTION thermique. Ce transport de l'énergie par un écoulement est analogue au transport d'autres quantités scalaires (non vectorielles) : transport d'une concentration de sel par de l'eau, transport de l'humidité par l'air, ... On retiendra donc que dans la convection, la chaleur se sert du fluide comme véhicule pour se déplacer. Sans entrer dans les détails, notons qu'il existe deux types de transferts convectifs:

- La convection forcée dans laquelle l'écoulement du fluide est forcé par un dispositif mécanique quelconque (pompe ou gravité pour un liquide, ventilateur pour de l'air).
- La convection naturelle : lorsqu'il existe une différence de température entre deux points d'un fluide, le fluide chaud, qui aura une masse volumique plus faible que le fluide froid aura tendance à monter sous l'effet de la poussées d'Archimède.

Il y aura ainsi circulation naturelle du fluide sous l'effet de la chaleur qui, par ailleurs, sera transportée avec lui : on parle de convection naturelle. Si l'on prend l'exemple d'un chauffage domestique, l'eau chaude qui arrive dans les radiateurs circule par convection forcée, entretenue

par le circulateur (petite pompe située dans la chaufferie) tandis que l'air des pièces de la maison circule par convection naturelle depuis le radiateur autour duquel il s'échauffe jusqu'au plafond vers lequel il s'élève avant de redescendre pour former un circuit fermé.

En convection on caractérise le flux de chaleur ϕ qui est extrait par le fluide de température T_0 d'une paroi de surface S à la température T_p par :

$$\phi = h S (T_s - T_0)$$

Où ϕ est en Watt, S en m^2 , T en Kelvin et où h désigne le coefficient d'échange entre la paroi et le fluide en $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$.

2.3 Le rayonnement

La chaleur du soleil frappe pourtant notre planète alors qu'il n'y a aucun support solide, liquide ou gazeux au-delà de l'atmosphère terrestre. Ceci signifie donc que l'énergie thermique peut tout de même traverser le vide. Ce mode de transfert s'appelle le rayonnement. Il correspond à un flux d'ondes électromagnétiques émises par tout corps, quelle que soit sa température. Comme on l'imagine, le rayonnement électromagnétique est d'autant plus élevé que sa température est grande. Comme pour la conduction, ce sont les interactions entre atomes et molécules qui sont à l'origine de ce rayonnement. Elles peuvent le générer, ce qui diminue leur énergie, ou encore l'absorber, ce qui l'augmente. De par sa nature, le rayonnement n'intervient que dans les milieux transparents (gaz, verre, vide) ou semi-opaque (gaz + fumées de CO₂, gaz + vapeur d'eau).

2.3 Combinaison des différents modes de transferts

Dans beaucoup de situations, il y a coexistence de 2 ou même 3 des modes de transferts thermiques décrits précédemment. Fort heureusement, il est fréquent qu'un mode soit prépondérant et simplifie l'analyse. Avant de finir ce paragraphe, signalons que certains échanges de chaleur s'accompagnent d'un changement d'état (vaporisation, condensation, fusion, congélation). Ces phénomènes se comportent alors comme une source (ex. de la condensation) ou un puits de chaleur (ex. de la vaporisation). Le dessin de la figure I.4 qui représente une fenêtre à double vitrage synthétise l'ensemble des exemples cités.

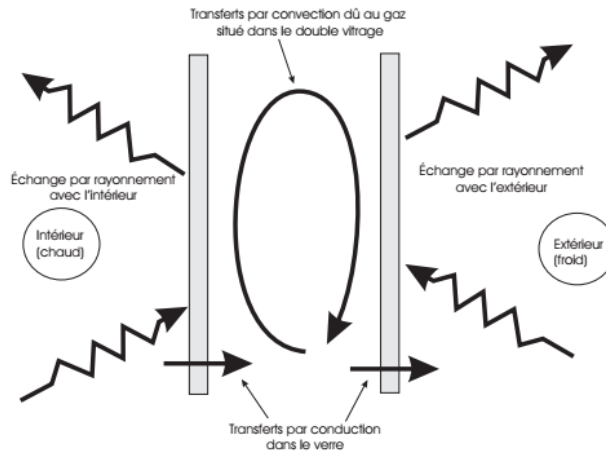


Figure I.4 : Exemple illustrant les différents types de transferts de chaleur.

3. Structure et origine du rayonnement

Le rayonnement est un mode d'échange d'énergie par émission et absorption de radiations électromagnétiques. L'échange thermique par rayonnement se fait suivant le processus :

- **Emission** : une conversion de l'énergie fournie à la source en énergie électromagnétique.
- **Transmission** : la transmission de cette énergie électromagnétique se fait par propagation des ondes avec éventuellement absorption par le milieu traversé.
- **Réception** : à la réception, il y a conversion du rayonnement électromagnétique incident en énergie thermique (absorption).

Le rayonnement est un transfert d'énergie sous forme d'ondes ou de particules, qui peut se produire par rayonnement électromagnétique (par exemple : infrarouge) ou par une désintégration (par exemple : radioactivité α). Par conséquent, le transfert peut se réaliser dans le vide. L'exemple caractéristique de rayonnement est celui du soleil dans l'espace.

En physique, le terme radiation ou son synonyme rayonnement désigne le processus d'émission ou de transmission d'énergie sous forme de particules ou d'ondes électromagnétiques, ou d'ondes acoustiques. Il comprend les radiations électromagnétiques (ondes radio, infrarouge, lumière, rayons X, rayons gamma) ainsi que les rayonnements particuliers (particules alpha, bêta, neutrons).

Le rayonnement trouve son origine lors d'une transition électronique entre deux états d'énergie d'une molécule ou d'un atome (Figure I.5).

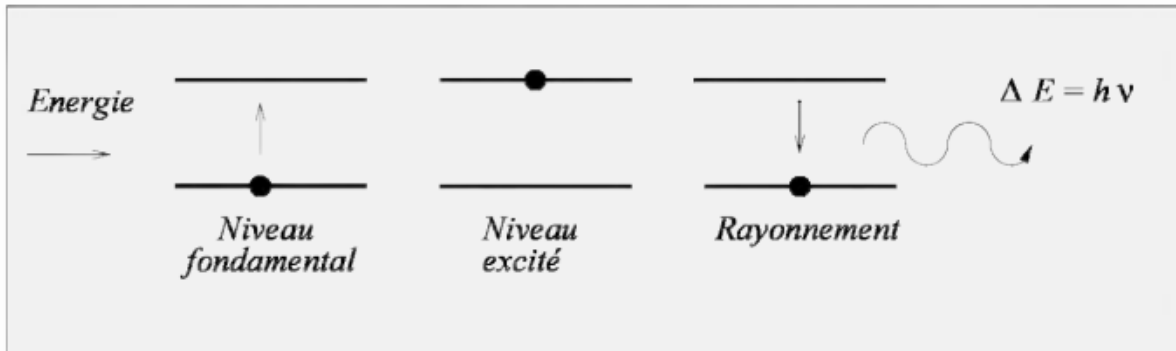


Figure I.5 : Principe de l'émission d'un photon

4.1 Loi de Planck

Le passage du niveau d'énergie E à un niveau d'énergie $E - \Delta E$ s'accompagne de l'émission d'un rayonnement de fréquence ν et d'énergie $h \nu$ où h est la constante de Planck.

$$E = h\nu \text{ avec } h = 6.62 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$$

4.2 Condition de rayonnement d'un corps

A la température du zéro absolu, les électrons ne peuvent se déplacer, par contre tous les corps matériels dont la température est supérieure à $0^\circ K$, sont capable d'émettre de l'énergie sous forme de rayonnement et d'en échanger entre eux.

Un corps à une température T émet des ondes de plusieurs fréquences différentes, et la répartition de cette énergie dépend de la température du corps. La quantité d'énergie émise est liée à la température.

4.3 Vitesse de propagation des ondes électromagnétiques

La vitesse de propagation des ondes électromagnétique dans le vide est : $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$

Dans un milieu d'indice n , la vitesse de propagation : $v = \frac{c}{n}$

4.4 Longueur d'onde

A partir de la fréquence ν (ou de la période $T = \frac{1}{\nu}$), de la vitesse de propagation dans le vide c , on peut déterminer la périodicité spatiale de l'onde λ_0

$$\lambda_0 = cT = \frac{c}{\nu}$$

Dans un milieu homogène d'indice de réfraction n :

$$\lambda = \frac{cT}{n} = \frac{\lambda_0}{n}$$

5. 1 Principe de chauffage par rayonnement

Lorsqu'un rayonnement arrive sur un corps opaque celui-ci peut être transmis, absorbé et réfléchi dans des proportions variables selon la nature du corps.

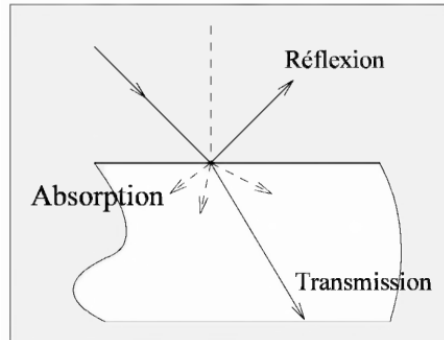


Figure I.6 : Réflexion, transmission et absorption du rayonnement.

5.2 Applications

Dans toutes les applications, le transfert d'énergie se fait par absorption de l'onde électromagnétique ou du photon associé. Le tableau I.1 fournit la correspondance entre la longueur d'onde et la fréquence du rayonnement ainsi que quelques applications.

Tableau I.1 : Applications du rayonnement

10^n	fréquence	longueur d'onde	applications
<i>exa</i> = 10^{18}	300 EHz	1 pm	<div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center; justify-content: center;"> <div style="margin-bottom: 10px;">↑</div> <div style="margin-bottom: 10px;">↓</div> <div style="margin-bottom: 10px;">↑</div> <div style="margin-bottom: 10px;">↓</div> <div style="margin-bottom: 10px;">↑</div> <div style="margin-bottom: 10px;">↓</div> <div style="margin-bottom: 10px;">↑</div> <div style="margin-bottom: 10px;">↓</div> <div style="margin-bottom: 10px;">↑</div> <div style="margin-bottom: 10px;">↓</div> </div>
	30 EHz	10 pm	
	3 EHz	100 pm	
<i>péta</i> = 10^{15}	300 PHz	1 nm	
	30 PHz	10 nm	
	3 PHz	100 nm	
<i>téra</i> = 10^{12}	300 THz	1 μ m	
	30 THz	10 μ m	
	3 THz	100 μ m	
<i>giga</i> = 10^9	300 GHz	1 mm	
	30 GHz	10 mm	
	3 GHz	100 mm	
<i>méga</i> = 10^6	300 MHz	1 m	
	30 MHz	10 m	
	3 MHz	100 m	

6. Classifications des corps soumis à un rayonnement

6.1 Corps transparents

Lorsque un rayonnement ne subit aucune atténuation lors de la traversée d'un milieu, on dit que le milieu est transparent pour ce rayonnement. C'est le cas du vide pour toutes les radiations, de certains gaz (N_2, O_2 notamment) dans le visible et l'infrarouge.

6.2 Corps opaque

La grande majorité des solides et des liquides sont dit « opaques », car ils arrêtent la propagation de tout rayonnement dès leur surface. Ces corps réchauffent par absorption du rayonnement.

6.3 Corps semi-transparentes

Par contre certains corps sont partiellement transparents car l'onde électromagnétique peut se propager dans le milieu considéré. La propagation s'accompagne d'une absorption électromagnétique qui accroît l'énergie du milieu traversé.

Les bandes d'absorption des principales molécules absorbantes de l'atmosphère sont :

Molécule :	CO_2		O_3			H_2O
λ (μm)	4,3	15	9,0	9,6	14,3	6,25

Par exemple, le rayonnement ayant pour longueur d'onde $\lambda = 10 \mu m$ est presque totalement absorbé par les molécules de O_3 contenues dans l'atmosphère.

7. Loi de conservation de l'énergie

Soit ϕ_i le flux incident, ϕ_r le flux réfléchi, ϕ_t le flux transmis et ϕ_a flux absorbé, la conservation de l'énergie s'écrit :

$$\phi_i = \phi_r + \phi_t + \phi_a$$

7.1 Coefficient d'absorption thermique

Posant :

$$\rho = \frac{\phi_r}{\phi_i} \text{ Facteur de réflexion}$$

$$\alpha = \frac{\phi_a}{\phi_i} \text{ Facteur d'absorption}$$

$$\tau = \frac{\phi_t}{\phi_i} \text{ Facteur de transmission}$$

La conservation de l'énergie s'écrit : $\rho + \alpha + \tau = 1$. Ces paramètres caractérisent le comportement d'un corps vis-à-vis du rayonnement reçu. Le coefficient α est important en thermique : il mesure la proportion de conversion du rayonnement électromagnétique incident en énergie thermique.

Remarque

Le coefficient α est faible pour les surfaces métalliques polies et non oxydées. Il augmente pour les corps qui apparaissent noirs mais reste toujours inférieur à l'unité.