

Annexe 5 - Le Rayonnement

1. Rappels sur les ondes électromagnétiques :

Elles ont des propriétés fort diverses selon leurs fréquences et sont cataloguées comme :

Rayons gamma : de fréquences supérieures à 30 ExaHertz ($30 \cdot 10^{18}$ Hz), longueur d'onde moindre que 1 picomètre ou 10^{-12} mètre, produits par des désintégrations à l'intérieur des noyaux atomiques ; leur énergie est d'au moins $h \nu = (6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J/Hz}) (30 \cdot 10^{18} \text{ Hz}) = 123 \text{ kilo Electron Volt ou keV}$; 1 eV vaut $1,6 \cdot 10^{-19}$ Joule

Rayons X : de fréquences entre 30 PetaHertz ($30 \cdot 10^{15}$ Hz, longueur d'onde de 10 nm ou 10^{-8} mètre) et 30 ExaHertz voire 300 ExaHertz ($3 \cdot 10^{20}$ Hz et 999 fm ou longueur d'onde de 1 pm) ; énergie $h \nu$ des photons entre 124 eV à 30 PHz et 124 keV à 30 EHz

Rayons UV ou Ultra-Violet :

- UV extrême de longueurs d'onde 10 nm à 121 nm ou de fréquences 30 PetaHertz à 2,5 PetaHertz
- Raie Lyman Alpha de l'hydrogène à 121,567 nm ou 10,18 eV ou 2,46 PetaHertz (PHz) produite par la retour de l'atome d'hydrogène de son premier état excité à son état fondamental¹
- UV lointain de 122 nm à 200 nm (soit 1,5 PetaHertz ou 1500 TeraHertz (Tera = 10^{12})).
- UV-C de 100 à 280 nm ; les UV de longueur d'onde inférieure à 240 nm décomposent les molécules d'oxygène en atomes d'oxygène qui réagissent avec une molécule d'oxygène pour former de l'ozone O_3
- UV entre 240 nm et 280 nm qui détruisent l'ozone
- UV-B de 280 à 315 nm absorbés par les molécules d'ozone
- UV-A de 315 à 400 nm qui arrivent en surface, pénètrent dans les océans et servent aussi de lumière noire.

Des insectes, des oiseaux et certains mammifères ont une vision en UV avec des cônes sensibles aux UV-A². Des lasers excimères ArF à 193 nm sont employés en lithographie pour la production de semi-conducteurs, avec, en cours de développement, des systèmes à 13,5 nm³ dits Extreme UV (EUV)

Visible : entre 380 nm (789 THz) limite du violet et la limite du rouge à 750 nm ou 400 THz

Des sources à laser semi-conducteurs sont présentes dans les produits grand public tels qu'enregistreur Blue ray à laser bleu vers 405 nm, graveur DVD à 690 nm ou lecteur de Compact Disc à 780 nm.

¹ Les fréquences des raies de l'hydrogène sont en $(1 - 1/n^2) 3,289842 \text{ PetaHertz}$, avec $n=2$ pour la première raie, 3 pour la seconde etc. Ce rayonnement correspond à l'émission d'un photon quand un électron passe d'une orbite éloignée du noyau à l'orbite la plus proche du noyau de cet atome, noyau aussi appelé proton.

² R. H. Douglas, G. Jeffery *The spectral transmission of ocular media suggests ultraviolet sensitivity is widespread among mammals*, 2014 <http://rspb.royalsocietypublishing.org/content/281/1780/20132995>

³ https://en.wikipedia.org/wiki/Extreme_ultraviolet_lithography

Infrarouge proche : de 400 THz à 75 THz il fait plus de 40% du rayonnement solaire.⁴ (Les télécommunications par fibre optique emploient la bande entre 190 THz et 200 THz).

Infrarouge thermique : de 75 THz aux fréquences radio (qui commencent ou vers 1 THz avec une longueur d'onde de 300 μm , ou vers 300 GHz où la longueur d'onde est de 1 mm) ; cet infrarouge thermique est rayonné par des corps aux températures usuelles de la surface et de l'air entre 200 K (tropopause, Antarctique, ...) et 350 K : voir les températures de la peau à la figure 1.

La production, la détection et l'utilisation en imagerie et analyse de matériaux d'ondes TeraHertz ont considérablement progressé depuis quinze ans⁵.

Ondes millimétriques permettent l'observation par satellites⁶ des températures de l'air, par mesure de rayonnement des molécules d'oxygène à plusieurs fréquences entre 50 GHz et 60 GHz correspondant à différents niveaux de la troposphère et de la stratosphère ; la quantité de vapeur d'eau est observée à partir de rayonnements à quelques fréquences entre 20 GHz et 50 GHz et vers 183 GHz ; le rayonnement reçu vers 89 GHz dit la température du sommet des nuages.

Les ondes radio centimétriques (de 30 GHz ou 1 cm à 300 MHz ou 1 mètre) : sont d'un usage constant : télévision radiodiffusée, communications fixes et mobiles (satellites, faisceaux hertziens, mobiles), radars, Wi-Fi, et vers 2,45 GHz (12,2 cm) fours micro-ondes où le rayonnement tend à aligner les molécules d'eau qui sont freinées par leur environnement, ce qui réchauffe les aliments.

L'observation de signaux GPS (à 1575,42 MHz et 1227,60 MHz) permet de retrouver les profils d'humidité de l'atmosphère qui modifient l'indice de réfraction de l'air et la vitesse de propagation des ondes.

⁴ Les classifications sont fort variables selon les disciplines : par exemple la Commission Internationale de l'Eclairage dit : IR-A 430 THz à 215 THz, IR-B 215 THz à 100 THz, IR-C 100 THz à 0,3 THz

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Infrarouge>

⁵ S.S. Dhillon et al. The 2017 Terahertz science and technology roadmap Phys. D: Appl. Phys. 50 043001 (49 pages) (<http://iopscience.iop.org/0022-3727/50/4/043001>)

https://www.researchgate.net/publication/310673624_The_2017_Terahertz_Science_and_Technology_Roadmap

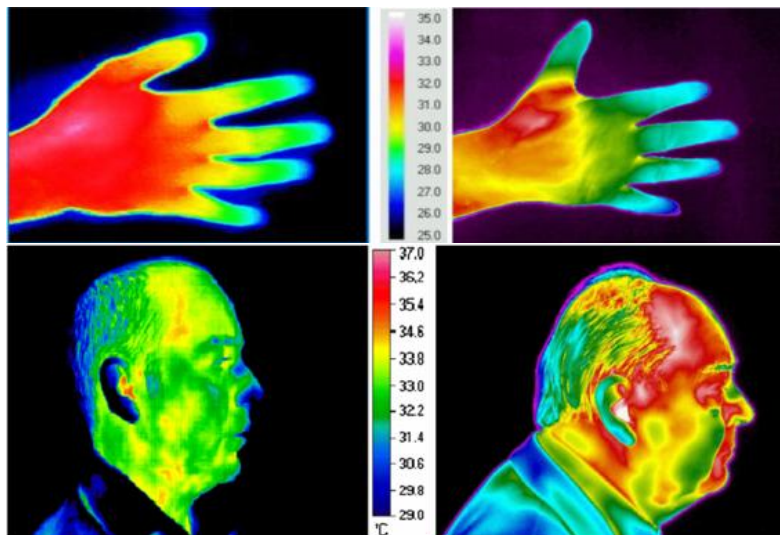
⁶ https://en.wikipedia.org/wiki/Advanced_microwave_sounding_unit

2. Rayonnement thermique :

Un corps qui absorbe à une fréquence rayonne à cette fréquence mais à sa température propre comme pour la peau humaine à la figure 1.

Figure 1 L'infrarouge thermique observé par une caméra : le flux rayonné par une peau (ou un vêtement) indique sa température

Figures from Infrared thermal imaging in medicine E F J Ring and K Ammer 2012 Physiol. Meas. 33 R33 doi:10.1088/0967-3334/33/3/R33



Un transfert de chaleur par rayonnement thermique entre deux corps est **comme un transfert d'argent entre deux comptes bancaires** :

« flux rayonné par A et absorbé par B » moins « flux rayonné par B et absorbé par A ».

C'est un point essentiel : les flux unidirectionnels ne réchauffent ni ne refroidissent ; seule compte la différence des flux de sens opposés.

Pour un corps idéal appelé « corps noir » le flux émis est $B(\nu, T)$ fonction de la fréquence ν du rayonnement et de la température T du corps, avec les constantes physiques

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J/Hz}$$

$$c = 2,997924 \cdot 10^8 \text{ m/s},$$

$$k_B = 1,380658 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$$

$$B(\nu, T) = 2 (h/c^2) \nu^3 / (\exp [h \nu / (k_B T)] - 1) = 1.4745 \cdot 10^{-50} \text{ a}^4 \nu^3 / (\exp[4.779 \cdot 10^{-11} \text{ a} \nu / T] - 1)$$

où : $a = 1$ si ν est en Hertz,
 $a = 10^{12}$ si ν est en THz,
 $a = 29,97924 \cdot 10^9$ si ν est en cm^{-1} ; (le cm^{-1} est l'unité de fréquence des spectroscopistes, ~ 30 GHz.

$B(\nu, T)$ est appelé fonction de Planck. Le maximum de cette fonction est atteint à $\nu (\text{cm}^{-1}) = 1,93145 \text{ T(K)}$ ou à $\nu (\text{THz}) = 0,0588 \text{ T(K)}$, soit 17,6 THz à 300 K.

La fonction $B(\lambda, T)$ en fonction de la longueur d'onde est la densité d'énergie à intégrer en $\lambda = c / \nu$, λ exprimé en unités de longueur.

Son maximum en longueur d'onde est à $\lambda = 2897 (\mu\text{m}) / T(\text{K})$ qui est très différent de la position en fréquence du maximum de $B(\nu, T)$.⁷

Le rayonnement d'un **corps réel** est le produit de la fonction de Planck par l'émissivité qui dépend de l'angle du rayon émis avec la normale à la surface, et de la fréquence ; cette émissivité est très variable selon les fréquences et les types de matériaux, de liquides ou de gaz.

Le rayonnement à la fréquence ν vers un demi-espace d'une surface idéale plane corps noir est $\pi B(\nu, T)$.

Le facteur π vient de l'intégration de ces flux sur toutes les directions : un flux faisant un angle a par rapport à la normale à la surface émettrice, sera en $\cos(a)$ ⁸, à intégrer sur l'angle solide $d\Omega = \sin(a) da db$ avec les angles a entre 0 (la normale à la surface) et $\pi/2$ et b entre 0 et 2π : en effet :

$$\left(\int_0^{2\pi} db \right) \left(\int_0^{\pi/2} \sin(a) \cos(a) da \right) = (2\pi) (1/2) = \pi$$

L'intégration sur tout le spectre du flux rayonné par une surface idéale corps noir donne le flux total en σT^4 .

Par exemple $389,5 \text{ W/m}^2$ à 288 K , avec $\sigma = 5,67051 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ dite constante de Stefan-Boltzmann.

On verra plus loin que la formule en σT^4 sert beaucoup pour donner un air « scientifique » à des raisonnements faux ou ineptes où l'on veut ignorer l'existence et le rôle de la vapeur d'eau dans l'atmosphère de la Terre.

Cette formule simple en σT^4 peut servir à estimer l'ordre de grandeur de la température d'une surface plane qui **dans le vide** recevrait par exemple 1360 W/m^2 du soleil et serait à la température qui lui permet -si elle était un corps noir- de rayonner la même puissance : il vient $393,5 \text{ K}$ ou $120,4^\circ\text{C}$ température voisine de celles que l'on aurait observé sur la Lune soleil au zénith.

Figure 2 Exemples d'émissivité moyennes de surfaces terrestres en infrarouge thermique : océans, avec végétation, déserts, neige et glace Source : Daniel Feldman PNAS 2014

En abscisse unité en cm^{-1} de 30 GHz ou $0,03 \text{ THz}$; une longueur d'onde de $10 \mu\text{m}$ correspond à 1000 cm^{-1} et 30 THz , une longueur d'onde de $100 \mu\text{m}$ correspond à 100 cm^{-1} et 3 THz

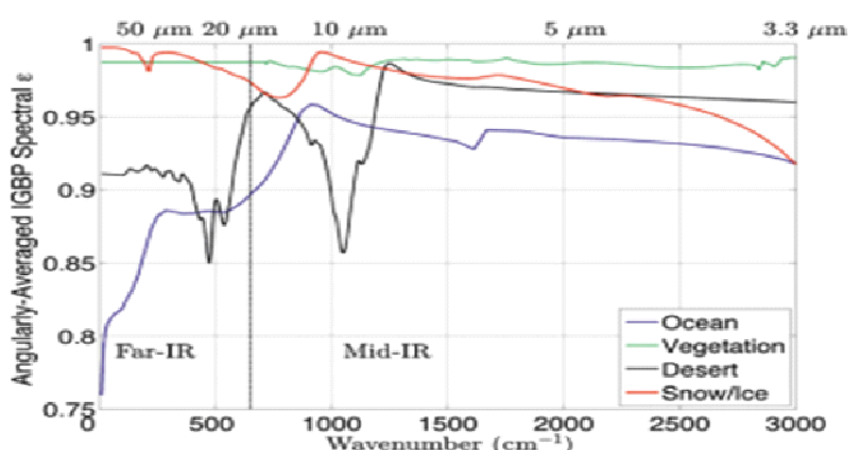


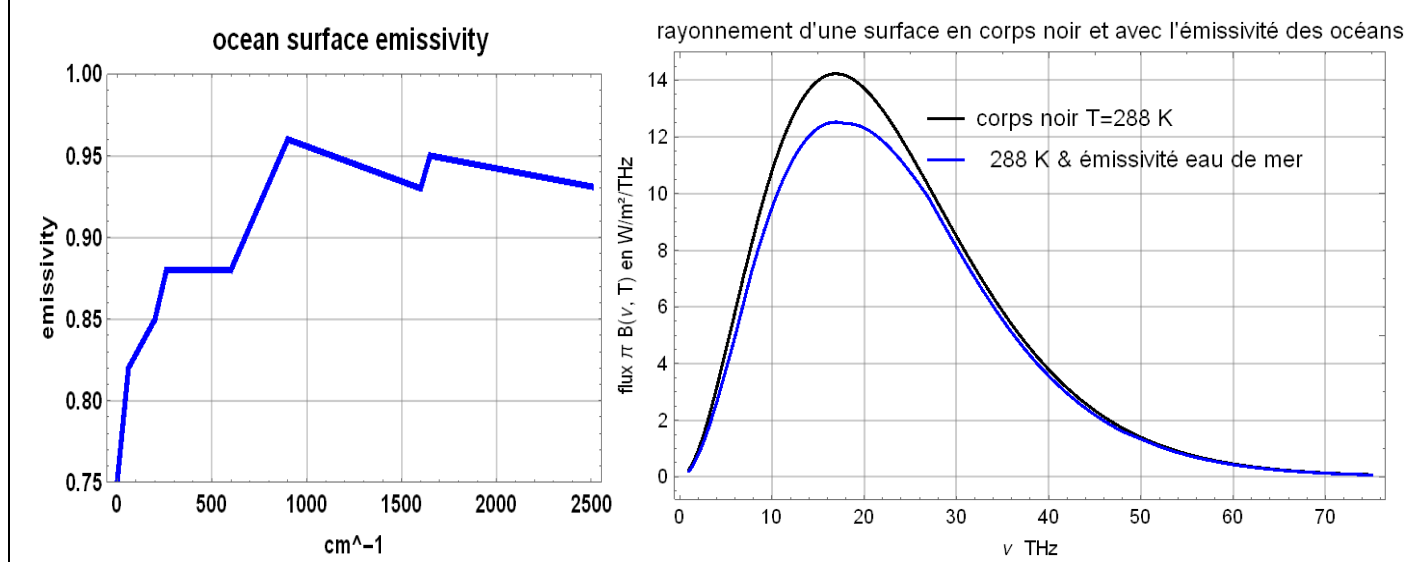
Fig. 3. Angularly averaged, spectrally resolved far-IR surface emissivity for four IGBP land types (ocean, vegetation, desert, and snow) based on 3D radiative transfer calculations and published indices of refraction.

⁷ En effet $B(\lambda, T) d\lambda = B(\nu, T) d\nu = B(c/\lambda, T) c d\lambda / \lambda^2 = 2 h c^2 / \lambda^5 (\exp [h c / (\lambda k_B T)] - 1) d\lambda$; $B(\lambda, T)$ est une fonction très différente de $B(\nu, T)$

⁸ Hypothèse d'une source dite lambertienne : voir https://fr.wikipedia.org/wiki/Loi_de_Lambert

Pour la surface des océans (71% de la surface du globe) le calcul avec la courbe simplifiée de la figure 3 conduit, par rapport au corps noir, à une diminution du maximum du flux infrarouge thermique émis par la surface des océans de 14 W/m²/THz à 12 W/m²/THz ; la surface intégrée sous la courbe passe de 389,5 W/m² à 354,8 W/m². Cette importante correction (-10% !) invalide la plupart des schémas en flux en W/m² qui prétendent illustrer ou justifier un « effet de serre » (voir Partie II).

Figure 3 A gauche, émissivité de l'eau de mer, courbe simplifiée. 1 cm⁻¹ = 0,02997 THz (presque 30 GHz) A droite : rayonnement vers un demi-espace d'une surface à 288 K (14,85 °C) de type corps noir (courbe noire) et avec l'émissivité de l'eau de mer (courbe bleue).



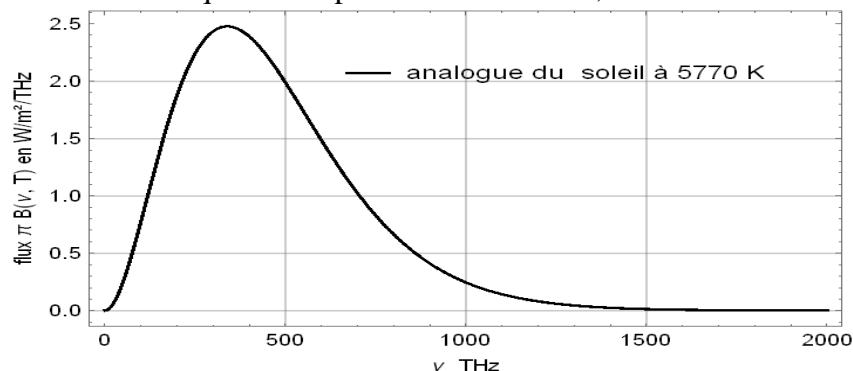
3. Rayonnement solaire

Si le soleil était un corps noir à 5770 K on aurait, à la distance d'une unité astronomique du centre du soleil un flux, réduit dans le rapport du carré du rapport du rayon du soleil 696 Mm à l'unité astronomique 149,59 Gm.

Ce flux est à la figure 4 représenté en W/m²/THz.

Les flux en infrarouge (moins de 400 THz), dans le visible (400 à 789 THz) et en UV (789 THz à 2000 THz) seraient respectivement de 630 W/m², 595 W/m² et 135 W/m² dont 56 W/m² pour les UV au-delà de 952 THz (UV en dessous de 315 nm), ceux qui agissent sur l'oxygène et l'ozone.

Figure 4 Allure du rayonnement solaire à une unité astronomique du soleil en W/m²/THz. Total 1360 W/m². Les ultraviolets sont aux fréquences supérieures à 789 THz, le visible entre 400 THz et 789 THz.



Sur la plage de l'infrarouge thermique aux températures terrestres, aux fréquences en dessous de 75 THz, le flux solaire ne fait que 13 W/m² sur un total de 1360 W/m².

4. Transfert de chaleur

Comme déjà dit, un transfert de chaleur par rayonnement thermique entre deux corps est comme un transfert d'argent entre deux comptes bancaires :

« flux rayonné par A et absorbé par B » moins « flux rayonné par B et absorbé par A ».

Si deux surfaces en vis-à-vis sont séparées par du vide ou par un milieu transparent en infrarouge thermique, et si ces surfaces sont assimilées à des corps noirs, le transfert de chaleur de A à B vaudra $\sigma (T_A^4 - T_B^4)$.

Par exemple, la main droite à 33°C émet 500 W/m² vers la main gauche placée à quelques centimètres d'air de la droite et reçoit autant de la main gauche : la main droite ne réchauffe pas la main gauche ni la gauche la droite puisque 500 – 500 = 0.

Aux températures usuelles et si T_A et T_B sont proches on aura un transfert radiatif de chaleur en

$$4 \sigma T_{\text{moyen}}^3 (T_A - T_B) \text{ qui pour } T_{\text{moyen}} = 280 \text{ K (soit } 6,85^\circ\text{C) vaut } 5 (T_A - T_B)$$

... à comparer à l'effet de la convection sur une façade souvent pris à 4 W/m²/K en calcul thermique des bâtiments.

La chaleur transférée de la paroi de l'immeuble à T_A à l'air supposé « corps noir à T_B » est alors :

$$(4 + 5) (T_A - T_B) \text{ W/m}^2.$$

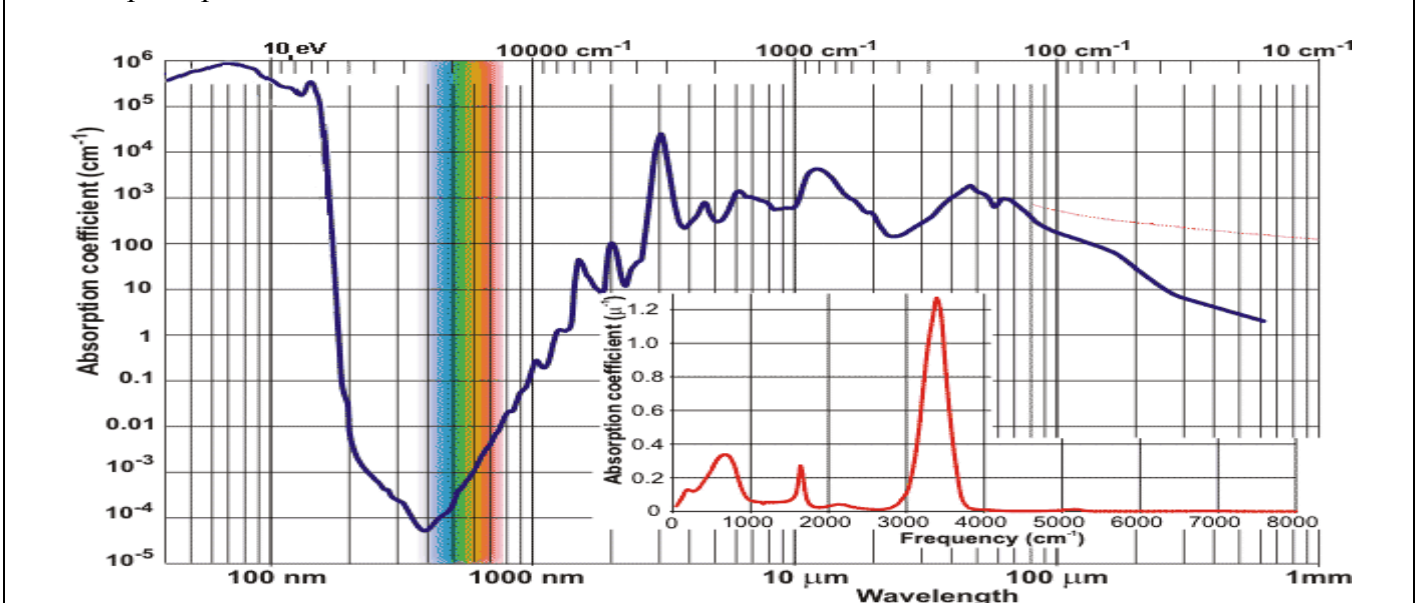
Pour 10 m² de vitrage et une différence de température de 11°C : 10 m² x 9 W/m²/°C x 11°C = 990 W/m².

La conductivité thermique, quotient du transfert de chaleur en W/m² par la différence des températures entre les deux faces du mur ou du vitrage, est pour un mur épais ou isolé vers 0,5 W/m²/K, pour un vitrage simple vers 6 W/m²/K (intérieur à +20°C, extérieur à -5°C, vitrage à 2°C), pour un double vitrage à 2,7 W/m²/K avec une vitre intérieure à 10°C.

5. Absorption des rayonnements électromagnétiques par l'eau liquide

L'infrarouge est absorbé par de l'eau liquide, très fortement au-delà de 1 μm (1000 nm ou 300 THz) ; sont aussi absorbés les UV en dessous de 200 nm, de fréquences supérieures à 1500 THz.

Figure 5 Absorption par l'eau liquide exprimée en cm^{-1} , des ondes UV aux ondes millimétriques
 Le coefficient d'absorption u en cm^{-1} correspond à une transmission $\exp[-u z]$ à la traversée de z cm d'eau (loi de Beer) ; par exemple on lit, à la longueur d'onde de 1 μm (300 THz), $u = 0,1 \text{ cm}^{-1}$ d'où
 $1/u = (1/0,1) (0,01 \text{ mètre}) = 0,1 \text{ mètre} = \mathbf{10 \text{ cm}}$ donc une transmission en $\exp[-z(\text{cm})/10]$
 A 9000 cm^{-1} (270 THz), $u = 100 \text{ cm}^{-1}$, transmission de $1/e = 37\%$ au bout d'une distance
 $z = (1/100) (1/100) \text{ mètre} = \mathbf{100 \mu\text{m}}$
 A la longueur d'onde de 15 μm (raie du CO_2 à 666 cm^{-1} ou 19,9 THz), $u = 1000 \text{ cm}^{-1}$
 $1/u = (1/1000) (1/100) \text{ mètre} = \mathbf{10 \mu\text{m}}$ est la **profondeur au bout de laquelle 63% du flux infrarouge à 20 THz aura été absorbé par l'eau.**
 L'absorption est, en gros, de 2/3 plus forte pour un rayonnement diffus (cas de l'infrarouge thermique).
 La transmission s'exprime encore par 10^{-A} où A est l'absorbance = $\epsilon c z = u z / 2,303$;
 ϵ = absorption par mole en litre/mole/ cm^{-1} ; c = concentration molaire = 55,345 mole/litre @ 25°C.



Noter la relative transparence de l'eau entre 200 nm et 800 nm (1500 THz à 380 THz) qui laisse passer plus de 37% à 1 mètre de profondeur (u plus petit que $0,01 \text{ cm}^{-1} = (100 \text{ cm})^{-1}$).

L'infrarouge thermique vers 15 μm est entièrement absorbé par quelques dizaines de microns d'eau liquide.

Le rayonnement infrarouge thermique de l'air vers la surface, entre 1 THz (33 cm^{-1}) et 70 THz (2333 cm^{-1}) est sur 75% du globe (mer, plans d'eau, forêts humides) absorbé par les premiers vingt microns d'une surface d'eau liquide alors que le solaire visible et ce qui reste des UV de longueur d'onde supérieure à 315 nm (non absorbés par l'oxygène ou l'ozone) pénètrent et chauffent les premiers mètres de l'océan.

Plus ou moins de CO_2 et de « back radiation » de l'air vers la surface n'a sur presque les trois quarts de la surface du globe pas d'effet « réchauffant » puisque compensé par l'évaporation de la couche d'eau liquide superficielle.

6. Diffusion par des aérosols, les gouttelettes et les molécules

Il y a diffusion quand une onde rencontre une molécule, ou une particule ou une gouttelette de taille comparable à la longueur d'onde. Une partie de l'onde est renvoyée vers l'arrière, voire sur les côtés.

Les molécules d'azote et d'oxygène diffusent les UV et les fréquences visibles avec une efficacité croissant en ν^4 : le bleu du ciel vient de la diffusion $(750 \text{ THz} / 400 \text{ THz})^4 = 12$ fois plus forte du bleu solaire que du rouge.

Les gouttelettes de brouillard diffusent et absorbent dans le visible et le proche infrarouge

7. Visibilité en météorologie :

Il y a une distance à laquelle un objet noir devient à peine perceptible sur l'horizon, avec un rapport de contraste C de seulement 0,02 entre le rayonnement visible I_{objet} de l'objet et celui le fond I_{fond} : $C = (I_{\text{fond}} - I_{\text{objet}}) / I_{\text{fond}}$.

A une distance z le contraste (défini à 550 nm ou 545 THz) diminue en $\exp(-\text{ext } z)$ où ext est le coefficient d'extinction dû à l'absorption par les gaz et à la diffusion par les aérosols.

La distance limite de visibilité est $z = 3,912 / \text{ext}$. qui sauf brouillards est entre quelques km et quelques dizaines de km.⁹

Le fog est défini par une visibilité inférieure à 1 km, le brouillard entre 1 et 2 km, la brume entre 2 et 5 km.¹⁰

Il a été trouvé que le réchauffement observé depuis 1980 en Europe occidentale est en relation avec une meilleure transparence de l'air ou une meilleure visibilité¹¹ avec une division par disons deux entre 1980 et 2010 du nombre de jours de visibilité limitée à moins de 2 km, 5 km et 8 km.

La comparaison de stations météo proches suggère une augmentation des températures à 15 heures de 2°C quand la visibilité est de 15 km -et plus- par rapport au cas où elle n'est que de 2 km.

Cette meilleure visibilité découlerait d'une très forte diminution de la quantité de dioxyde de soufre dans l'air de l'Europe occidentale depuis les années 1980.

⁹ Pour une analyse récente voir : Zhong Ping Lee, Shao Ling Shang *Visibility: How Applicable is the Century-Old Koschmieder Model?* Journal of atm. sc. Nov. 2016, pp. 4573-4581

L'emploi de capteurs embarqués sur des véhicules « autonomes » pour détecter des conditions de mauvaise visibilité est décrit dans : Hazar Chaabani et al. *A Neural network approach to visibility range estimation under foggy weather conditions* Procedia Computer Science 113, 2017, pp. 466-471

¹⁰ Des imageurs ou caméras à des longueurs d'onde vers 10 μm pénètrent mieux les brouillards formés de gouttelettes de petit diamètre que les caméras dans le visible ou l'infrarouge proche.

¹¹ Robert Vautard, Pascal Yiou & Geert Jan van Oldenborgh *Decline of fog, mist and haze in Europe over the past 30 years.* Nature Letters, 18 jan. 2009