

## **Rayonnement thermique : quelques aspects d'ordre théorique**

La note : « Rayonnement thermique et Thermodynamique » a pour but de montrer que la notion de température de rayonnement permet de décrire de façon plus intuitive les échanges d'énergie entre rayonnement thermique et couches atmosphériques, et par là, d'aboutir à une meilleure compréhension de la physique de l'effet de serre, en conduisant au rejet d'interprétations fausses, ou encore en suggérant des points de vue nouveaux.

Le mécanisme de l'effet de serre, selon les présentations courantes, paraît se ramener, schématiquement, à deux modes de fonctionnement principaux. Dans l'un, qu'on pourrait considérer comme manifestant la « conservation de l'énergie radiative », l'énergie radiative absorbée par des gaz à effet de serre (GES) est égale à l'énergie à l'énergie radiative émise par ces mêmes gaz. Dans l'autre, « l'équilibre thermique local (LTE) » est supposé réalisé. La transmission d'énergie entre rayonnement et gaz GES est beaucoup moins rapide qu'elle ne l'est, par chocs, entre les gaz GES et les autres gaz de l'atmosphère. L'équilibre thermique entre ces différents gaz peut donc être considéré comme pratiquement maintenu, malgré les échanges avec le rayonnement. Dans le bilan énergétique du rayonnement entre en ligne de compte l'énergie échangée avec l'atmosphère.

La conservation de l'énergie radiative s'observe, par exemple, dans les expériences dites de « résonance radiative », sur des vapeurs métalliques, dans le visible. L'énergie de rayonnement émis par des atomes provient de leur excitation préalable par un rayonnement de même nature. Un gaz 'parasite' peut atténuer, étouffer cette émission par désactivation de ces atomes. Il paraît difficile d'admettre que, étant donnée la faible concentration des gaz GES dans l'atmosphère, ce mode de fonctionnement puisse s'appliquer à l'effet de serre. Cependant, certaines présentations du mécanisme de l'effet de serre reposent sur cette hypothèse de conservation. « L'effet de serre se comporterait alors comme un dispositif autonome totalement indépendant du reste de l'atmosphère.

Sous l'hypothèse LTE, on peut considérer qu'un échange d'énergie entre rayonnement et gaz GES est équivalent à un échange d'énergie entre rayonnement et atmosphère proprement dit. Le mécanisme de transmission d'énergie y est analogue à celui d'un échangeur de température, les gaz GES jouant le rôle de transmetteur ; augmenter leur concentration facilite les échanges d'énergie entre rayonnement et atmosphère. L'hypothèse LTE est à la base des 'équations de transfert radiatif', équations qui sont considérées comme décrivant de manière la plus précise le rôle des gaz à effet de serre.

Les hypothèses physiques fondamentales sur lesquelles se fonde cette note sont celles, à des formes de présentation près, sur lesquelles sont établies les équations de transfert radiatif. Cependant, le mode d'exposition choisi, visant, avant tout, à présenter les phénomènes de base le plus simplement possible, ne semble pas permettre, malgré les quelques rappels d'ordre technique qui y sont adjoints, de faire une liaison commode avec les conceptions les plus communément admises. Les rappels et remarques qui suivent ont pour objectif d'assurer cette liaison.

### **1- Rayonnement thermique**

Conçue initialement comme un prolongement du visible à l'infrarouge, la présentation de la théorie du rayonnement thermique a conservé les notions de l'optique géométrique : rayon, faisceau de rayons, source 'ponctuelle', brillance (ou luminance), intensité. Le rayonnement transporte de l'énergie incohérente. Il n'est pas question d'interférences, de diffraction. Cependant, la notion de fréquence de rayonnement, (de longueur d'onde), joue un rôle important.

## Guy Convert

Dans le vide, le rayonnement thermique peut être considéré comme formé par la superposition d'ondes planes électromagnétiques, chacune d'elle caractérisée par sa fréquence, sa constante de propagation dans une direction de l'espace, et l'énergie qu'elle transporte. En régime permanent, les constantes de propagation des ondes traversant un volume donné doivent satisfaire à des conditions aux limites de ce volume. Les équations de propagation étant linéaires, on peut définir un ensemble d'ondes de propagation de base, les 'modes', chacun d'eux indépendant des autres, tout rayonnement du volume pouvant être représenté par une combinaison linéaire de ces modes. Ces modes forment une suite discrète lorsque les dimensions du volume sont de l'ordre des longueurs d'onde considérées, leur distribution couvre un spectre continu lorsque le volume est très grand.

Suivant un schéma fréquemment utilisé, le calcul du nombre de ces modes peut être fait en assimilant l'espace à un cube de grandes dimensions, de volume  $L^3$ , et en leur assignant des conditions de périodicité aux limites de l'espace, conditions qui restreignent les valeurs du vecteur  $\vec{k} = (k_x, k_y, k_z)$  par les relations :

$k_x L = 2\pi n_x ; k_y L = 2\pi n_y ; k_z L = 2\pi n_z$  ; où les  $n$  sont des nombres entiers positifs, nuls, ou négatifs. Le nombre de modes dont les vecteurs de propagation sont compris dans l'intervalle  $d^3k = dk_x dk_y dk_z$  est ainsi donné par la

relation :

$$dN = \left(\frac{L}{2\pi}\right)^3 dk_x dk_y dk_z$$

En définissant la direction du vecteur de propagation  $\vec{k}$  par ses coordonnées polaires  $\theta, \varphi$  on trouve que le nombre d'ondes planes dans l'intervalle de fréquence  $d\nu$  et dans l'espace angulaire  $d\theta d\varphi$  de la direction  $\vec{k}$  est donnée par

$N = 2 \left(\frac{L^3 \nu^2}{c^3}\right) \sin\theta d\theta d\varphi d\nu$  .L'amplitude de la constante de propagation  $\gamma$  est donnée par  $k = \frac{2\pi\nu}{c}$  Et on a tenu

compte du fait qu'une onde de direction donnée est susceptible de deux états de polarisation.

Le résultat précédant est obtenu par un passage à la limite où le volume occupé par le rayonnement est très grand en comparaison de la longueur d'onde, ou autrement dit, que la longueur d'onde est infiniment petite, ce qui suggère la notion de 'source ponctuelle'.

2-

3-Interaction entre rayonnement thermique et matière. Probabilités d'absorption et d'émission.

Les échanges d'énergie entre ondes électromagnétiques ne peuvent se produire qu'à travers leur interaction avec des éléments matériels. S'agissant d'un rayonnement thermique, ses échanges avec des molécules de gaz à effet de serre se décrivent par la simple addition des échanges individuels de photons entre chacun des modes qui composent ce rayonnement et chacune des molécules du gaz en interaction avec lui.

-a) La mécanique quantique calcule la probabilité par unité de temps d'échange d'un photon entre une molécule d'un gaz à effet de serre soumise à un mode transportant une densité de  $n$  photons de fréquence  $\nu$  . Selon son état initial, la molécule peut absorber ou, au contraire, émettre un photon.

-La probabilité, par unité de temps, pour qu'une molécule non excitée, d'énergie  $E_1$  dans son état initial, passe à l'état excité, d'énergie  $E_2 = E_1 + h\nu$  , en absorbant un photon fourni par le mode, est proportionnelle au nombre de photons  $n$  transportés par ce mode.

## Guy Convert

- La probabilité, par unité de temps, pour qu'une molécule passe de l'état excité  $E_2$  à l'état non excité  $E_1$  en cédant un photon à un mode est proportionnelle à  $(n+1)$ , où  $n$  est le nombre de photons transportés par ce mode.

Le facteur de proportionnalité  $K$ , qui est une caractéristique de la molécule de gaz à effet de serre considérée, reste le même, qu'il s'agisse du cas de l'absorption  $Kn$ , ou du cas de l'émission  $K(n+1)$ .

La probabilité d'émission comprend deux termes : l'un, proportionnel au nombre de photons transportés par le mode, concerne l'émission dite « induite ou stimulée », l'autre est relatif à l'émission « spontanée », décrite fréquemment comme induite par les « fluctuations du vide ». On note que l'émission spontanée peut transmettre un photon à un mode ne transportant initialement aucune énergie.

-b) La probabilité par unité de temps d'échange d'un photon entre une molécule et un rayonnement complexe est égale à la somme des probabilités d'échange avec chacun des modes qui le compose.

Soit un rayonnement thermique émis dans la direction  $\vec{k}(\theta, \varphi)$ . La densité des modes dans l'angle solide  $d\Omega$  y est donnée par la relation  $dp(\nu) = 2 \frac{\nu^2}{c^3} d\Omega$ , avec  $d\Omega = \sin \theta d\theta d\varphi$ . Dans l'hypothèse où chacun de ces modes transporte une même densité moyenne  $n$  de photons, les probabilités par unité de temps d'absorption d'un photon par une molécule non excitée, ou émission d'un photon d'une molécule excitée vers le rayonnement, seront obtenues en multipliant respectivement  $Kn$  et  $K(n+1)$  par le facteur  $2 \frac{\nu^2}{c^3} d\Omega$ . En particulier, la probabilité d'émission spontanée, dans le vide, dans une quelconque direction de l'espace, d'une molécule excitée caractérisée par le facteur  $K$ , est donnée par l'expression  $8\pi \frac{\nu^2}{c^3} K$ .

c)-

3- Atmosphère et rayonnement thermique.

En l'absence de rayonnement thermique, « l'atmosphère », bien que soumise à l'attraction de la pesanteur, doit être, à l'équilibre, à température uniforme.

En régime stationnaire, le rayonnement thermique doit émettre vers l'espace, en moyenne, l'énergie reçue du soleil (et une énergie, beaucoup moins importante, traduisant le refroidissement de la Terre). Dans ces conditions, la température de l'atmosphère, comprenant des gaz à effet de serre, ne peut être uniforme. L'uniformité de température suppose, en effet, un flux de rayonnement ascendant égal au flux descendant au sommet de l'atmosphère. En fait, le flux descendant transporte une énergie très faible au sommet de l'atmosphère ; il reçoit de l'atmosphère une quantité d'énergie supérieure à celle à celle que lui apporte le flux ascendant ; le rayonnement refroidit le sommet de l'atmosphère