

# LP17 - RAYONNEMENT D'ÉQUILIBRE THERMIQUE

Année : 2020-2021

Correcteurs : Nicolas Perez et Léo Mangeolle

**Contenu de ce rapport :** Quelques remarques sur les questions qu'on s'est posées pendant et après la leçon.

**Première question :** A priori, les photons sont émis par des processus discrets de transition entre orbitales atomiques, on s'attend donc à ce qu'une source lumineuse émette un spectre de raies discret et pas du tout un spectre continu ; alors comment se fait-il qu'on observe quand même d'honnêtes corps noirs dans la nature ? En clair, d'où vient l'élargissement spectral ?

Par exemple, dans les lampes spectrales, on a effectivement un spectre de raies, et les raies sont un peu élargies par effet Doppler, mais on est très loin d'un spectre de type Planck - donc il faut un autre mécanisme pour expliquer les spectres vraiment continus.

En fait, les processus discrets entre orbitales atomiques, ça compte surtout dans les isolants ou les gaz neutres, où les charges sont liées aux atomes (de fait, les LED, les lasers et les lampes spectrales sont d'assez piètres corps noirs).

Les spectres continus, eux, sont généralement dus à des charges libres, dont les énergies - cinétiques principalement - décrivent un continuum. C'est le cas dans le soleil qui est (schématiquement) une grosse boule de plasma, et dans les filaments des ampoules type tungstène où vit un gaz d'électrons. Les processus d'émission impliquent notamment le *bremsstrahlung* dans le métal (et plus généralement le rayonnement dipolaire), et font donc appel au fait qu'une charge accélérée rayonne (avec un spectre continu parce que les accélérations subies par les charges peuvent prendre n'importe quelle valeur a priori). Dans le soleil, ce sont plutôt des collisions fortement inélastiques avec ionisation ou recombinaison qui sont à l'oeuvre ; ce n'est donc pas tellement l'existence de charges accélérées qui intervient, mais plus simplement le fait que les énergies cinétiques peuvent prendre n'importe quelle valeur a priori. Dans les deux cas, on obtient un spectre continu qui prend, à l'équilibre, la forme donnée par la loi de Planck.

**Deuxième question :** Est-ce qu'il vaut mieux parler de rayonnement d'équilibre thermique ou de rayonnement du corps noir ?

Sans hésitation, rayonnement d'équilibre thermique ! Déjà, il faut voir que les lois de Planck et Wien ne sont pas des lois à propos d'un corps, ce sont des lois à propos d'un gaz de photons à l'équilibre thermodynamique, le fameux "rayonnement d'équilibre thermique". Donc n'importe quel corps, du moment qu'il est à l'équilibre thermodynamique (sous-entendu : avec le gaz de photons), *fera en sorte d'être entouré par* (j'évite volontairement de parler d'émettre et d'absorber, voir ci-dessous) un spectre décrit par la loi de Planck - et donc en particulier vérifiera la loi de Wien. De même, la loi de Stefan décrit simplement la puissance lumineuse qui traverse une surface fermée (donc munie d'un intérieur et d'un extérieur), sous la seule hypothèse que l'intérieur est à l'équilibre thermodynamique avec l'extérieur. Ça ne suppose même pas qu'il y a effectivement un corps à l'intérieur de la surface fermée, d'ailleurs : il faut vraiment comprendre la loi de Stefan juste comme un genre de théorème de Gauss, où au lieu d'avoir une densité de charge on a une densité de gaz de photons i.e. d'énergie lumineuse. Le fait que n'importe quel corps, à l'équilibre thermodynamique, est entouré d'un gaz de photons identique à celui qui entoure un corps noir, est en fait imposé par le second principe de la thermodynamique : si on met ce corps en contact avec un corps noir à la même température, il est nécessaire que les gaz de photons qui les entourent aient exactement la même distribution d'énergie (sinon il y aurait un transfert d'entropie entre deux corps à la même température ce qui contredit les fondements de la thermo). Ce raisonnement aboutit à la loi de Kirchhoff, qui dispose que l'émissivité et l'absorptivité d'un corps sont égales (cf DGLR, complément VI.F).

**Troisième question :** Du coup quelle différence entre un corps noir, un corps gris, et un corps coloré ?

Ils n'ont pas la même émissivité  $\epsilon_\nu$  (ou absorptivité  $\alpha_\nu$ ). Un corps noir a  $\epsilon = \alpha = 1$  ; un corps gris a  $0 < \epsilon = \alpha < 1$  ; un corps coloré a  $\epsilon_\nu = \alpha_\nu$  dépendantes de la fréquence  $\nu$ . On ne peut pas accéder à ces grandeurs simplement en regardant le corps à l'équilibre thermique (puisque justement, cf la question ci-dessus, on mesure alors un spectre de corps noir) : il faut se placer hors de l'équilibre.

D'ailleurs, un exemple de corps quasi-blanc : les couvertures de survie, qui ont  $\alpha = \epsilon \simeq 0.03$  et qui donc réfléchissent presque tout le rayonnement vers l'intérieur pour nous garder au chaud, et ne réémettent elles-mêmes quasiment rien puisque  $\epsilon$  est toute petite. Ce n'est pas en contradiction avec ce qu'on a dit plus haut, à savoir que tout corps à l'équilibre thermique rayonne exactement comme un corps noir, puisque justement une couverture de survie avec quelqu'un à l'intérieur et la nuit hivernale à l'extérieur n'est pas vraiment un bon exemple d'équilibre thermique ! Si vous prenez une couverture de survie et que vous la mettez au four thermostat 7 pendant un certain temps puis que vous braquez un spectroscope sur la couverture, là vous verrez un parfait spectre de corps noir - simplement, 97% de la lumière que vous verrez sera juste celle du four réfléchi sur la couverture, et

3% de la lumière sera le rayonnement thermique de la couverture elle-même.

Tant qu'on y est, il faut faire très attention dans l'application avec la Terre et le Soleil, où on dit souvent un peu légèrement "on suppose l'équilibre thermique". Ben non justement ! Si la Terre était à l'équilibre thermique avec le Soleil, il ferait pas froid dehors. Ce qu'il faut dire, c'est que la Terre est à l'équilibre thermique avec le gaz de photons qui l'entoure (i.e. ceux qui arrivent depuis le Soleil, et ceux que la Terre émet) et le Soleil pareil de son côté, mais les deux ne sont pas à l'équilibre du tout. Ce serait le cas si on prenait la Terre, le Soleil, et qu'on les enveloppait ensemble dans une (très) grande couverture de survie ; alors les photons rebondiraient sans arrêt sur les parois et finiraient par atteindre un équilibre thermique où tout le monde serait à  $T_S$ .



FIGURE 1 – Vous quand on vous posera la question : "Considérez-vous le Soleil et la Terre comme deux corps noirs à l'équilibre thermodynamique ?"