

27 juin 2020

LP17 - Rayonnement d'équilibre thermique. Corps noir.

Gauthier Legrand et Francis Pagaud

27 juin 2020

Bibliographie

- H-prépa Thermodynamique MP PT PSI, **Brébec**
- Thermodynamique 1re et 2me année, **Olivier & Gié**
- Mécanique quantique 1, **Aslangul**
- Physique statistique, **DGLR** (Dispensable)
- [Tuto de Thibaut Divoux](#)
- Physique tout-en-un MP-MP*, 2014, **Sanz**

Pré-requis : Niveau L3

- Photon
- Equations de Maxwell, densité volumique d'énergie
- Formalisme grand-canonique, distribution de Bose-Einstein

Table des matières

1	Notion de rayonnement d'équilibre thermique	3
1.1	Etude thermodynamique du rayonnement	3
1.2	Etude d'un couple lumière-matière	3
1.3	Définition du rayonnement d'équilibre.	4

2	Caractérisation énergétique du rayonnement d'équilibre thermique	4
2.1	Flux émis et énergie volumique du rayonnement	4
2.2	La loi de Planck	5
2.3	Déduction du flux émis	6
3	Un cas pratique : le corps noir	6
3.1	Présentation du modèle	6
3.2	Equilibre thermo local	7
3.3	Exemple : l'atmosphère terrestre	8

La leçon est parfaite si elle est illustrée par des ODG sur la caméra IR par exemple distillés un peu partout.

Reste à faire : Le py et y ajouter idéalement la loi de Wien (Olivier p. 473) et de Rayleigh-Jeans (Olivier p. 474)

Commentaires du jury

- 2017** Les bilans radiatifs doivent être traités de manière rigoureuse.
- 2015** Cette leçon ne doit pas se réduire à énoncer des lois historiques sans aucun élément de démonstration.
- 2014** Le/la candidat(e) doit être capable de faire le lien entre la définition du corps noir énoncée pendant la leçon et les exemples choisis pour l'illustrer. S'il/elle choisit de ne pas en faire la démonstration, le/la candidat(e) doit être capable de donner l'origine des différents termes de la loi de Planck et savoir l'énoncer correctement en fonction de la fréquence et de la longueur d'onde.
- 2010** L'intérêt de la notion de corps noir, et son lien avec celle de rayonnement d'équilibre, doivent apparaître clairement. Des bilans radiatifs dans des situations concrètes permettent alors de mettre en oeuvre cette notion. Les lois de base du rayonnement thermique sont établies en situation d'équilibre ; il convient de s'interroger sur la validité de leur application à des situations hors-équilibre.
- 2001** Il convient de distinguer le « champ de rayonnement d'équilibre » du « corps noir ».

Introduction

Exemple introductif : chauffage avec une QI d'un thermomètre.

Mettre ça en lien avec les trois modes de transfert énergétique connus.

Problématique : Comment décrire le rayonnement pour comprendre ce transfert d'énergie ?

1 Notion de rayonnement d'équilibre thermique

1.1 Etude thermodynamique du rayonnement

Source : Aslangul p. 83

But premier : **Définir le bon système**. Définissons un système, de manière logique :

$$\Sigma = \{\text{Rayonnement à la température } T\}$$

C'est un système qu'on peut tout à fait étudier, avec des ondes EM monochromatiques de fréquences données. Une donnée intéressante serait la répartition en fréquence, comme pour la distribution de Maxwell! (J'ai l'impression qu'on peut parler de photon plutôt mais je suis pas sûr à 100% en terme de logique du cours, à discuter. Ça permettrait notamment de poser un peu plus l'analogie avec le gaz parfait.)

Pb : Maxwell c'est totalement linéaire, des ondes à des fréquences oméga ne vont jamais se rééquilibrer. Donc avec que du rayonnement, on n'aura jamais équilibre entre les composantes du système! C'est comme avec le gaz parfait, s'il n'y a pas d'interaction il n'y a pas rééquilibrage des vitesses...

Message clé : Le rayonnement ne saurait être à l'équilibre seul. Il y a nécessité d'analyser un couple lumière-matière de manière à redistribuer l'énergie.

Transition : Considérons l'interaction lumière-matière!

1.2 Etude d'un couple lumière-matière

Source : Hprépa p. 80, Gié p. 460

-Présentation du cadre de l'étude : objet dans une enceinte fermée isotherme, avec un milieu transparent d'indice 1 = vide. L'enceinte n'absorbe donc aucun rayonnement, pas même les parois.

-Rayonnement thermique : La lumière est ré-émise par agitation thermique, à bien distinguer des spectres discret, Hprépa p. 80. **Hypothèse d'un corps ne présentant aucune résonance optique**. Pour continuer l'analogie du gaz parfait, pas de résonance = interactions assez faibles pour être négligées, afin de ne pas masquer les propriétés du rayonnement. En effet les charges accélérées rayonnent. Donc le rayonnement étudié précédemment, c'est le rayonnement thermique. Ce flux émis se voit par caméra infrarouge. Les détecteurs d'entrée des magasins détectent le rayonnement émis, cf. vidéo de la fig 4 <http://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/ressource/Effet-serre-Dufresne.xml>. Je ne suis pas sûr que ces exemples soient situés au bon endroit.

-Beau bilan énergétique comme dans le Gié. (flux en W)

-On peut définir les systèmes opaques et transparents si on veut, comme dans le Hprépa... Si on fait ça, bien préciser que ça dépend de la gamme de fréquence! Exemple avec le verre et la figure 12 de l'article <http://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/ressource/Effet-serre-Dufresne.xml>. Conséquence, pour qu'un thermomètre à mercure indique la bonne température plus vite, il est parfois entouré de noir de fumée qui

absorbe mieux la lumière et chauffe plus vite.

Transition : Parfait, **on a bien défini le système!** Maintenant on va pouvoir se pencher un peu plus sur ce que veut dire "rayonnement à l'équilibre".

1.3 Définition du rayonnement d'équilibre.

Source : Olivier p. 461

Donc okay, on sait analyser l'énergie incidente sur un corps. Mais ça nous dit pas ce que c'est l'équilibre. Le corps sera à l'équilibre radiatif \iff déduit que $\Phi_i = \Phi_p$ donc que $\Phi_a = \Phi_e$, ça semble assez logique comme pour les autres équilibres en thermo. De plus, c'est l'une des composantes de l'équilibre thermodynamique \Rightarrow équilibre radiatif.

Déf du rayonnement d'équilibre thermique : Rayonnement émis par un corps opaque à l'équilibre thermodynamique (et radiatif a fortiori) dans cette enceinte fermée isotherme qui n'absorbe pas.

Transition : On sait parfaitement ce qu'on étudie! Qu'est-ce qu'on peut en dire, comment le caractériser?

2 Caractérisation énergétique du rayonnement d'équilibre thermique

2.1 Flux émis et énergie volumique du rayonnement

Source : Olivier p. 462, Aslangul p. 89

Entre le Aslangul et le Olivier, les définitions et unités sont pas très claires. Je les ai débroussaillées ici, il faut se référer à mon texte.

Cadre de l'étude : corps à l'équilibre radiatif thermique.

-Intérêt : se pencher sur l'énergie absorbée et réémise par le corps pour en connaître un peu plus sur le rayonnement.

-Il y a un flux **partant**, qui contient le flux émis et réfléchi, infinitésimal : $d\Phi_p = F_\lambda(\lambda, T)d\lambda$, avec $F(\lambda, T)$ la puissance par unité de longueur d'onde ($[W/m]$). Mais ça, c'est quand même pas très pratique, car pour décrire le champ EM **on a l'habitude d'utiliser la densité volumique d'énergie**. Donc on a une variation inf $du = u_\lambda(\lambda, T)d\lambda$, avec $u_\lambda(\lambda, T) =$ densité vol d'énergie par longueur d'onde ($[J \cdot m^{-4}] = [W \cdot s \cdot m^{-4}]$). *Par ailleurs, on a tout décrit en longueur d'onde, on peut le faire en fréquence via la relation $u_\nu(\nu, T) = \frac{c}{\nu^2} u_\lambda(\frac{c}{\nu}, T)$*

Comment réconcilier tout ça?

-> Démo Olivier p. 462. J'évoquerais juste le principe je pense. Ainsi, on obtient :

$$F_\lambda(\lambda, T) = \frac{cu_\lambda(\lambda, T)}{4}$$

Bien garder en tête que ça ne parle que de rayonnement, indépendance du corps solide considéré !

Transition : Ca okay ! Mais le coeur du problème, c'est la densité spectrale. Mais comment se répartit l'énergie ?

2.2 La loi de Planck

Source : Aslangul p. 85 pour de la discussion, p. 99 pour les calculs classiques et 108 pour Planck, Diu phystat p. 818 (plus clair, mais utilisation de la densité en fréquence)

Je fais tout en longueur d'onde pour que l'ensemble soit cohérent à ce niveau là, mais on peut très bien le faire en fréquence.

-C'est là que tout le monde s'est cassé les dents ! Jusqu'à 1900 et Max Planck. C'est quoi l'énergie volumique du champ EM ? (ATTENTION le Olivier le fait sur F_λ plutôt que u_λ , ce que je trouve moins évident car on regarde l'énergie vol du champ EM) :

$$u_\lambda(\lambda, T) = \underbrace{\frac{8\pi}{\lambda^4}}_{\text{Nb vol de modes}} \underbrace{\frac{hc/\lambda}{e^{hc/\lambda k_B T} - 1}}_{\text{Energie d'un mode}}$$

On va comprendre comment il en est arrivé là : phystat. Considérons une enceinte fermée de dimension L dans chaque direction. Il y a réflexion parfaite à l'interface, ainsi il n'y a pas d'absorption d'énergie et des ondes stationnaires peuvent s'établir **avec des conditions limites rigides**. Les modes sont donc discrets, et répartis tous les $\frac{2\pi}{L}$ dans l'espace des vecteurs d'onde. Et dans chaque mode on a deux polarisations possible, circulaire droite ou gauche. Passons à la limite continue, très logiquement. On fait le raisonnement avec la sphère, ce qui donne :

$$dN = 2 \times \left(\frac{L}{2\pi}\right)^3 \times 4\pi k^2 dk = \frac{L^3}{\pi^2} k^2 dk$$

En passant en longueur d'onde : $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, et $dk = \frac{2\pi}{\lambda^2} d\lambda$.

$$dN = \frac{L^3}{\pi^2} \times \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 \times \frac{2\pi}{\lambda^2} d\lambda$$

Donc la densité volumique de modes est :

$$\rho = \frac{8\pi}{\lambda^4}$$

Pour ce qui est de l'énergie d'un mode, c'était là le problème (Aslangul p. 108). **Hyp de Planck** : et si l'énergie était quantifiée, aka l'oscillateur à la fréquence ν réémet une énergie proportionnelle à cette fréquence, mais avec un certain quanta. **Version du Diu p. 825** : en fait, ça ce sont les photons, $\epsilon = h\nu = h\frac{c}{\lambda}$. Or, ce sont des bosons (de potentiel chimique

nul), donc il y a un nombre moyen d'occupation de chaque mode : $n_\lambda = \frac{1}{e^{\epsilon/k_B T} - 1}$. A cela on multiplie par ϵ pour avoir l'énergie et on obtient la loi de Planck! **La suite est le raisonnement de l'Aslangul qui utilise une fonction de partition canonique, avec laquelle je suis en désaccord** : Ces oscillateurs à la fréquence ν sont associés à un mode et on l'énergie d'un oscillateur harmonique quantique : $E_n = \hbar\omega(n + 1/2)$. Et puisqu'on est à la température T, on obtient via la fonction de partition canonique l'énergie moyenne de chaque oscillateur.

-Magnifique py.

Discussion :

- Bien se rappeler du cadre de cette loi ! Discussion dans le Diu Phystat p. 826.
- On retrouve la loi de déplacement de Wien (1893, expérimentale puis théorique, on l'écrit Olivier p. 465) + la loi de Wien (1896, expérimentale et on l'illustre par le Py) et Rayleigh-Jeans à haute température (1900, théorique, on n'a plus de catastrophe ultraviolette)
- Cette analyse se veut universelle (on a rien supposé sur la nature du corps dans l'enceinte, ni sur l'enceinte...). Contrainte : l'équilibre + pas de raie d'absorption. Et c'est normal, puisqu'on s'intéresse au rayonnement lui-même, les photons ne sont pas différents s'ils sortent d'un objet ou d'un autre.

ODG Olivier p. 466

Transition : Ce qu'on ressent physiquement, c'est bien l'énergie transmise via le flux, essayons de le déduire

2.3 Dédution du flux émis

Source : Olivier p. 467

Tout le spectre apporte de l'énergie ! A partir de u_λ , on peut remonter à la puissance par unité de longueur d'onde $F_\lambda(\lambda, T)$.

Loi de Stefan sur Φ_p , on donne la constante de Stefan et donner des ODG (pour le Soleil par exemple ? Si il émet un rayonnement ERT, alors...)

Transition : Super, on a tout compris de ce rayonnement qu'on a analysé en profondeur. Bon, maintenant en pratique, comment on le met en oeuvre ? Il existe un cas très simple.

3 Un cas pratique : le corps noir

3.1 Présentation du modèle

-C'est un corps qui absorbe tout le rayonnement incident et qui réémet par agitation thermique sans résonance optique (L'hypothèse convexe est superflue, il peut bien rayonner sur lui-même, le rayonnement sera ERT à la fin) et qui est convexe (ne rayonne pas sur lui-même). Typiquement, c'est une cavité isotherme = four, cf. le dessin habituel (Olivier p.

472). Intérêt de ce dessin : bien montrer que la lumière rentre dedans jusqu'à absorption complète par les parois. **Dans ce dessin-là, le corps noir c'est juste l'ouverture!** Car c'est bien l'ouverture qui absorbe.

Conséquence : $\Phi_i = \Phi_a$, $\Phi_p = \Phi_e$

Quel intérêt ? Ce qu'on a vu précédemment nous donne une relation sur le rayonnement uniquement, qui arrive *quelque soit le corps en ERT*. Mais le bonus du corps noir est de dire qu'il absorbe toute la lumière, donc le flux partant est le flux absorbé = flux émis. Toute l'énergie passe par le corps, qui peut se thermaliser, lui ainsi que le rayonnement (synonyme de "redistribuer la lumière dans toutes les longueurs d'ondes"). Ainsi, corps noir \Rightarrow rayonnement ERT à coup sûr! (Réciproque fausse, cf. commentaire) La loi de Stefan permet alors de remonter à la température du corps en question.

Conclusion : Le corps noir est un objet idéal très simple, qui permet d'obtenir le rayonnement à l'équilibre radiatif et thermique une fois l'équilibre thermodynamique vérifié (temps d'équilibre à passer).

Remarques :

1. Le critère de corps noir dépend de la plage de fréquence analysée. En effet, le verre est transparent dans le visible, mais corps noir dans l'UV notamment (c'est là que la nature de la matière intervient, dans l'évaluation du modèle : le corps considéré est-il noir ? Ben ça dépend des composants). De plus, c'est relatif à la taille de l'échantillon : une vitre que l'on regarde sur sa tranche devient opaque, il y a absorption pour une épaisseur assez importante.
2. Donc le corps noir n'est pas juste un blouson noir. Faut qu'il y ait absorption, non réflexion (ce qui est jamais le cas en vrai... Il y a au moins de la réflexion diffusive en général), et ce pour toute fréquence.
3. Encore plus loin, certains corps noirs ne sont pas noirs! Vu qu'il y a émission de lumière, cette lumière peut être dans le visible. Mais ça n'empêche en rien que le corps absorbe tout à toutes les longueurs d'ondes.

C'est un peu l'équivalent d'un four. En effet il nous apparaît noir à température ambiante, mais il serait blanc s'il montait à 3000 K. \rightarrow montrer le graphe de température de couleur.

Transition : Bon il est bien gentil ce modèle, mais il est tellement idéal qu'on ne peut rien en faire! Comment on s'en sort ?

3.2 Equilibre thermo local

Source : Olivier p. 470

-Pour élargir le corps noir, on dit que le spectre d'émission est le résultat d'une absorption et d'une réémission. Avec un équilibre thermo local d'un corps noir à la température T, c'est suffisant.

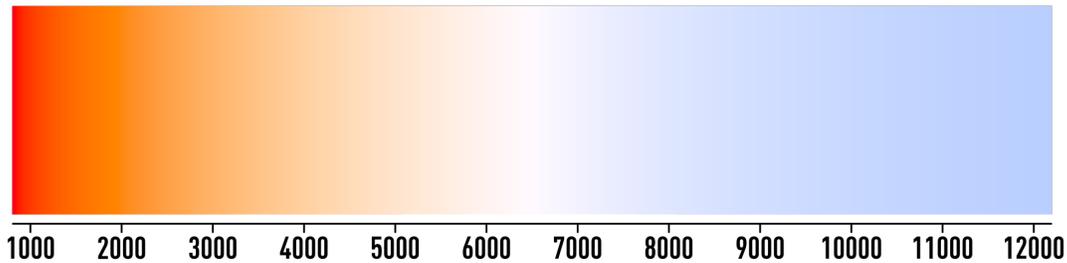


FIGURE 1 – Relation entre couleur et température. Abscisse en kelvins à rajouter.

Pour une étoile par exemple : un photon qu'on envoie sur sa surface sera absorbé. Donc en considérant la surface isotherme à la température T et à l'équilibre local, notamment en déséquilibre avec les couches internes de l'étoile, hé bien on peut considérer le rayonnement émis comme celui de la loi de Planck. Et ce même si le flux incident est inconnu et non trivial.

Du coup c'est l'hypothèse qu'a fait Stefan en considérant la surface du Soleil comme un corps noir. Ses résultats : https://fr.wikipedia.org/wiki/Loi_de_Stefan-Boltzmann#Température_du_Soleil. Le coeur est à des millions de K mais je ne sais pas comment c'est mesuré. Ça marche super bien ! Et pourtant on peut se dire que ce n'est pas un corps noir : image du spectre, cf image wiki. C'est pas si mal.

Sur l'utilisation de Stefan : attention à identifier le bon flux à la loi de Stefan en fonction de la situation analysée :

-Equilibre thermo : $\Phi_i = \Phi_p = S\sigma T^4$

-Corps noir : $\Phi_{e,CN} = \Phi_{a,CN} = S\sigma T^4$

-Corps noir à l'équilibre thermo local : $\Phi_{e,CN} = S\sigma T^4$

Transition : Tout ça on peut l'appliquer pour voir que qualitativement, ça marche !

3.3 Exemple : l'atmosphère terrestre

Source : Salamito p. 167 [Agreg A 2011, uniquement fig 9](#)

Attention, tout ça c'est qualitatif puisqu'on n'a pas un corps noir. (cf. Salamito)

-Présentation du modèle sans atmosphère avec un schéma sur slide. Présentation de l'albédo, de la puissance surfacique rayonnée par le Soleil sur la Terre par une loi en carré inverse, la Terre est supposée en ERT et réémet un flux. Bilan : $T_0 = 255$ K.

Ajout de l'atmosphère terrestre ! La vraie partie intéressante, au moins faire les flux.

-Attention ce n'est pas un corps noir, on le suppose absorbant que dans l'IR, là où on n'a principalement que le spectre du rayonnement terrestre. (justifier par la fig. 9)

Bilan : le résultat est pas déconnant ! C'est encore trop chaud mais il faudrait prendre en compte l'absorption réelle de l'atmosphère, toutes les variations qui empêchent la Terre

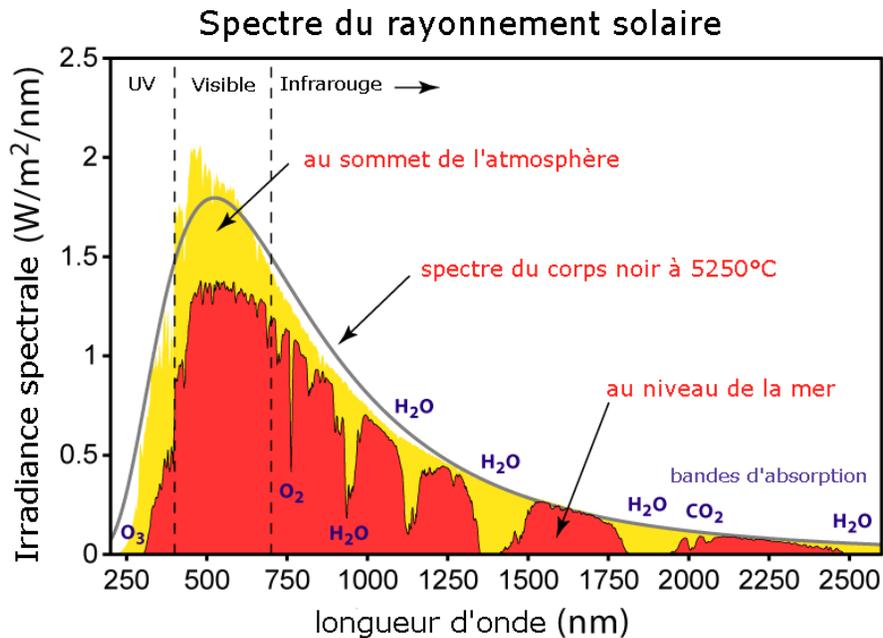


FIGURE 2 – Spectre solaire

d'être à l'équilibre... Ici pour plus de discussion : http://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/ressource/CorpsNoir_Climat.xml

Conclusion

Ouvertures possibles :

Commentaires pendant la prépa aux oraux

- Remarques sur la loi de Planck : l'aire sous la courbe augmente quand on augmente la température, donc l'énergie totale augmente !
- c'est une leçon calculatoire il faut faire un max de schémas / python
- l'atmosphère c'est plusieurs couches donc c'est le bordel
- corps noir concave : c'est équivalent au corps noir qu'on ferme en avec une courbure nulle car toute la lumière reçue est absorbée (pas de réflexion interne)
- Sur le processus continu d'émission : on n'a pas un isolant, où les charges sont liées aux atomes. Là on a des charges libres (plasma pour le soleil, métal pour la métallurgie) où un courant excite les phonons, qui réexcitent des modes élec d'énergie plus élevée par divers processus. Voir fr.wikipedia.org/wiki/Rayonnement_thermique

- Dans une serre, "l'effet de serre" est plutôt dû à l'absence de convection! <http://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/ressource/Effet-serre-Dufresne.xml> cet article débunke pas mal de trucs.
- Il peut y avoir équilibre radiatif sans équilibre thermo (laser + miroir, le flux sortant est égal au flux entrant et la lumière du laser ne devient pas celle d'un corps noir à la température T).
- Si tu prends une enceinte avec des parois réfléchissantes et contenant un corps gris avec un coefficient 0.5, après de nombreuses émissions, réabsorptions/réflexion sur le corps gris, ré-émissions, etc. alors il pourra se thermaliser au bout d'un moment et on obtiendra le rayonnement d'équilibre. Mais le corps noir permet d'obtenir directement ce rayonnement d'équilibre, donc le corps noir, c'est un objet simple et idéal qui donne ce rayonnement bien connu, et je n'irais pas plus loin dans les généralisations.
- L'analogie du gaz parfait est sympa mais a ses limites bien sûr, cf. Aslangul p. 88. Cela dit il existe tout un formalisme thermo en mode GP, cf. Aslangul p. 95 et TD Volk.
- Se rappeler que le nombre de photon n'est pas conservé, les parois n'agissent pas comme un réservoir de particules mais comme un réservoir d'énergie. Cela n'empêche pourtant pas de traiter le problème dans la situation grand-canonique en imposant un potentiel chimique nul (ce qui se lit dans la distribution de Bose-Einstein qui apparaît dans la loi de Planck). Du coup, comme le nombre de photons décroît avec la température (c'est la loi de Stefan), il ne peut y avoir de condensation de Bose-Einstein dans la cavité.
- Garder en tête qu'un photon émis au coeur du soleil met en gros 10^6 ans à sortir. Cependant, il n'y a pas d'incohérence avec le fait d'observer des raies dans le spectre d'une étoile, car le rayonnement émis par le coeur est réabsorbé par les couches superficielles.
- pourquoi le préfacteur de l'angle solide est-il $1/4\pi$ alors qu'on n'intègre finalement que sur la moitié de la sphère, 2π ? C'est parce que quand on comptabilise les photons qui sont dans le petit cylindre de longueur cdt accolé à la surface dS , on n'est intéressé que par ceux qui vont aller dans la direction de $d\Omega$, et il faut bien n'en prendre qu'une fraction $1/4\pi$: a priori ils peuvent aller dans absolument toutes les directions, y compris vers la gauche.

Questions

- Dans la loi de Planck, on interprète maintenant la distribution de Bose-Einstein (terme numéroté 2 dans la leçon) comme dénombrant le nombre de photons. Mais si la notion de photon n'était pas encore établie à cette époque, qu'est ce qu'a dénombré Planck ? Quanta d'énergie échangés, cf. Aslangul
- Loi de Wien : comment est-elle utilisée en pratique, par exemple pour évaluer les fuites thermiques d'un bâtiment ?

- Y a-t-il incompatibilité entre le fait qu'un corps noir émette un spectre continu et le fait qu'une étoile contienne des raies d'émission dans son spectre ? Non car absorption ensuite par les couches superficielles
- Le Soleil est jaune ; pourquoi on dit que c'est un corps noir ? équilibre thermodynamique local (chaque couche se comporte comme un corps noir), jusqu'à la dernière couche qui donne ce qu'on voit (photosphère)
- Répartition de la température au sein du Soleil ? Comment le mesure-t-on ?
- Quels facteurs dans la perception de la couleur du Soleil ? Son spectre d'émission, l'influence de l'atmosphère, les capteurs rétiens majoritaires dans le jaune.
- C'est quoi la luminosité d'une étoile ?
- C'est réalisé comment une mesure en pratique ? Pyromètre, principe dans le Hprépa.
- Pourquoi un objet peut absorber toutes les fréquences alors que la matière est décrite par la MQ ? Pas un seul atome, mais BOCOUC d'atomes et donc densité d'états ENORME et alors continuum d'énergie.
- A priori pour que deux photons interagissent, il faut de la matière, est-ce toujours vrai ? A haute énergie, processus non linéaires qui permettent que des événements à proba très très faible de se produire
- Un rayonnement qui n'interagit plus avec la matière ? Le fond diffus cosmologique (il n'a pas interagit depuis sa création)
- Il y a quoi dans une lampe quartz-iode ?