

LP 1 – Spectres

Manon LECONTE - ENS de Lyon

Dernière mise à jour : 23 juin 2020

Merci à Joachim Galiana, Bénédicte Grebille et Lucile Favreau pour leur précieuse aide.

Mots-clé : spectre électromagnétique, spectre d'un corps chauffé, température de couleur, spectre de raies, absorption, émission.

Niveau : 1^{re} STL - Physique-chimie et mathématiques

Pré-requis :

- Ondes électromagnétiques (caractéristiques, expression de la célérité) [1^{re} STL]
- Constitution de la matière (atomes, noyaux, électrons) [2^{de}]
- Spectres d'émission et d'absorption [2^{de}]
- Loi de Beer-Lambert [2^{de}]

Bibliographie :

- Taillet, *Dictionnaire de physique*
- *Physique-Chimie 1^{re} STI2D*, Hachette Education, éd. 2019
- *Physique-Chimie 1^{re} S*, Hachette Education, éd. 2015
- *Enseignement scientifique 1^{re}* , Lelivrescolaire, éd. 2019

Plan proposé

I - Spectre électromagnétique	2
A/ Présentation	2
B/ Les différents domaines	2
II - Spectre de la lumière émise par un corps chauffé	3
A/ Le spectre de la lumière du Soleil	3
B/ Loi de Wien et température de couleur	4
C/ Limites du modèle du corps noir	4
III - Spectres atomiques	5
A/ Mise en évidence	5
B/ Quantification des niveaux d'énergie de l'atome	5
C/ Spectres d'émission et d'absorption	7

Introduction pédagogique

On se focalise sur les spectres de la lumière.

La leçon s'inscrit dans le thème "Ondes électromagnétiques". Elle suit un premier cours sur les caractéristiques de ces ondes (en pré-requis).

Spectre des ondes électromagnétiques ; rayonnements gamma, X, UV, visible, IR, micro-ondes, ondes radio. Sources lumineuses. Spectres d'émission et spectres d'absorption.	<ul style="list-style-type: none"> - Classer les ondes électromagnétiques selon leur fréquence et leur longueur d'onde dans le vide. - Citer les ordres de grandeur des longueurs d'onde limites du spectre visible. - Citer des domaines d'utilisation des différents types d'ondes électromagnétiques. - Caractériser différentes sources lumineuses à l'aide de leur spectre : laser, LED, lampe à incandescence, lampe spectrale etc. - Distinguer spectres d'émission et spectres d'absorption, spectres continus et spectres de raies. <p>Capacités expérimentales :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Mettre en œuvre un protocole pour observer le spectre de différentes sources lumineuses. - Mettre en œuvre un protocole pour observer un spectre d'absorption d'une solution.
Photon, énergie d'un photon.	<ul style="list-style-type: none"> - Interpréter les échanges d'énergie entre lumière et matière à l'aide du modèle corpusculaire de la lumière. - Citer et exploiter la relation entre l'énergie d'un photon et la fréquence de l'onde. - Classer les ondes électromagnétiques selon l'énergie du photon. - Interpréter et exploiter la présence de raies dans un spectre à l'aide de données tabulées.

Figure 1 – Extrait du programme officiel de Physique-chimie et mathématiques de la classe de 1^{re} STL.

Remarque – En TS, on aurait pu s'attacher à l'étude des spectres IR, RMN, UV-visible, ou encore les spectres de Fourier pour les signaux sonores (aussi vus en enseignement scientifique de 1^{re}).

Difficultés :

- dualité onde-corpuscule et quantification → pour l'amener aux élèves, on décrit d'abord des spectres continus, puis on se demande pourquoi certains spectres présentent des raies ;
- unités et conversion, en particulier l'introduction de l'électron-volt.

Exemples de TD :

- étude de différentes ampoules et température de couleur ;
- étude de documents sur les types spectraux des étoiles ;
- étude de lampes à vapeur (hydrogène, sodium, ...)
- étude d'autres domaines que le visible : production de rayons X.

Exemples de TP :

- mesurer le spectre de différentes lampes ;
- mesurer le spectre d'absorption d'une solution.

Introduction

Dans le cours précédent, on a défini l'onde électromagnétique (oem) et donné ses caractéristiques. On peut utiliser un outil très pratique pour comparer des rayonnements lumineux, qu'ils soient simples ou complexes.

Définition – Spectre : description d'un signal (par exemple une oem) par les longueurs d'onde ou fréquences qui le composent.

Pour obtenir le spectre de la lumière, il faut la **décomposer**, c'est-à-dire séparer les différentes longueurs d'onde, par exemple à l'aide d'un prisme. Newton est le premier à avoir déterminé le spectre de la lumière du Soleil en 1675.

Objectifs – Savoir analyser un spectre et en déduire des informations quantitatives.

I - Spectre électromagnétique

A/ Présentation

Définition – Spectre électromagnétique : nom donné à la répartition des différents types d'oem en fonction de leur fréquence ou de leur longueur d'onde.

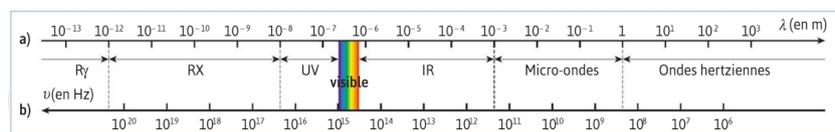


Fig. 14.11 Spectre des ondes électromagnétiques.
(a) Longueur d'onde. (b) Fréquence.

Figure 2 – Spectre électromagnétique (**Source** : *Physique-Chimie 1re STI2D*, Hachette éducation (p. 238)).

La double graduation exploite la relation entre la célérité c , la fréquence f et la longueur d'onde λ :

$$c = \lambda f \quad (1)$$

On remarque ainsi que l'axe est croissant pour les longueurs d'onde et décroissant pour les fréquences.

B/ Les différents domaines

On observe sur la figure 2 sept domaines distincts associés à différentes utilisations dans la vie courante :

- les **rayons gamma** ($R\gamma$) pour des longueurs d'onde inférieures à 10^{-12} m, générés par la désintégration radioactive dans les centrales nucléaires ;

- les **rayons X** (RX) pour λ comprise entre 10^{-12} m et 10^{-8} m, utilisés en médecine pour effectuer des radiographies ;
- le domaine **ultra-violet** (UV) pour λ comprise entre 10^{-8} m et 400 nm, utilisés dans les cabines pour bronzer ;
- le domaine du **visible** pour λ comprise **entre 400 nm et 800 nm**, qui correspond à la lumière que l'œil humain peut voir ;
- le domaine **infrarouge** pour λ comprise entre 800 nm et 1 mm, qui est utilisé dans les caméras thermiques ;
- les **micro-ondes** pour λ comprise entre 1 mm et 1 m, qui sont utilisées dans les fours micro-ondes ;
- les **ondes hertziennes** pour λ supérieure à 1 m, qui sont utilisées pour la radio FM.

II - Spectre de la lumière émise par un corps chauffé

A/ Le spectre de la lumière du Soleil

La première source de lumière qui nous vient à l'esprit est le Soleil.

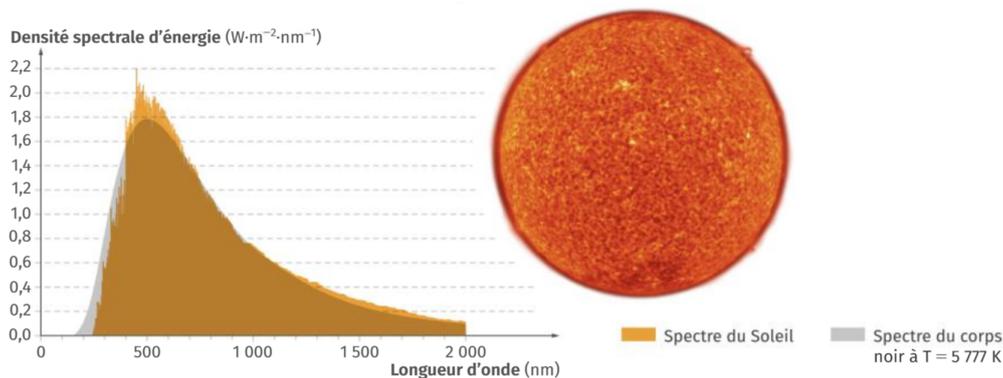


Figure 3 – Profil spectral du Soleil (Source : *Enseignement scientifique 1^{re}*, Lelivrescolaire (p. 75)).

Son rayonnement est dû à l'agitation thermique des atomes qui le composent. Il s'agit donc d'un **corps chauffé**.

On peut modéliser son rayonnement en considérant qu'il s'agit d'un corps noir.

Définition – Corps noir : corps idéal qui absorbe toutes les radiations électromagnétiques qu'il reçoit.

Les spectres associés à des corps noirs sont des spectres **continus**.

B/ Loi de Wien et température de couleur

Le corps noir émet alors un rayonnement qui ne dépend que de sa température de surface T appelée **température de couleur**, d'après la **loi de Wien** :

$$\lambda_{max}T = 2,9 \times 10^{-3}m \cdot K \quad (2)$$

où λ_{max} est la longueur d'onde du maximum d'émission du corps noir.

| **Animation** – Spectre d'un corps chauffé (**Source** : phet.colorado.edu).

On voit bien la variation de λ_{max} lorsque l'on fait varier T , ce qui induit un changement de couleur de la source lumineuse.

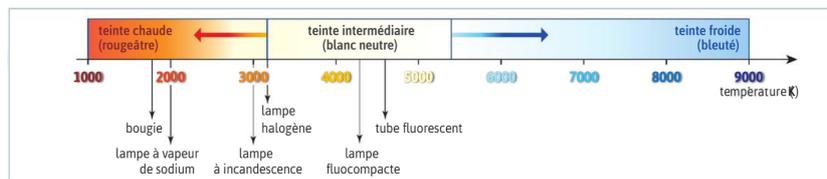


Figure 4 – Lien entre la température d'un corps et sa couleur (**Source** : *Physique-Chimie 1re STI2D*, Hachette éducation (p. 240)).

| **Remarque** – On remarque que les couleurs qualifiées de "chaudes" correspondent en fait à des températures inférieures à celles des couleurs "froides".

On peut donc appliquer la loi de Wien au rayonnement du Soleil pour déterminer la température à sa surface. On lit : $\lambda_{max} = 500 \text{ nm}$, donc $T = 5\,800 \text{ K}$.

| **Remarque** – On pourrait aussi évoquer la classification spectrale des étoiles (voir *Enseignement scientifique 1^{re}*, Lelivrescolaire (p. 69)).

C/ Limites du modèle du corps noir

Le corps noir est un **modèle**. La température de l'objet émetteur n'est donc pas toujours égale, ni même parfois proche, à la température prévue par la loi de Wien.

| **Exemple** – Le modèle du corps noir s'applique bien à la lumière du jour et à celle d'une lampe halogène. Il ne fonctionne cependant pas pour les lampes à LED ou les lampes fluocompactes (voir energie-environnement.ch).

Le modèle du corps noir n'explique pas non plus pourquoi le spectre du Soleil présente des pics fins, plus visible sur le spectre d'émission présenté figure 5.

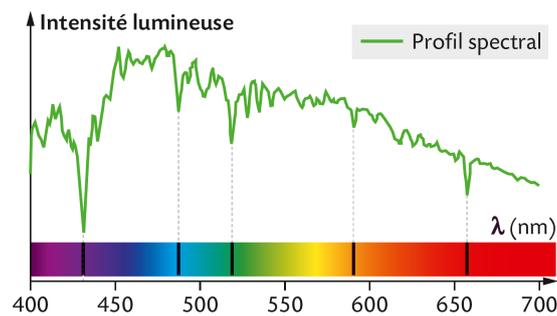


Figure 5 – Spectre d'émission du Soleil (**Source** : *Physique-Chimie 1re S*, Hachette éducation (p. 46)).

III - Spectres atomiques

A/ Mise en évidence

Animation – Comparaison du spectre d'une lumière blanche et de celui d'une lampe à vapeur d'hydrogène (**Source** : web-labosims.org).

Au lieu d'un spectre continu, on observe un **spectre de raies**. Cela est dû à la **description corpusculaire de la lumière**. En 1905, Einstein postule que la lumière est constituée de "grains", appelés **photons** aujourd'hui.

Définition – Photon : particule de charge et de masse nulle associée à une onde électromagnétique et possédant notamment une énergie propre.

L'énergie d'un photon suit la loi :

$$\mathcal{E} = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (3)$$

où $h = 6,63 \times 10^{-34}$ J·s la **constante de Planck**, ν la fréquence du photon et λ sa longueur d'onde.

B/ Quantification des niveaux d'énergie de l'atome

Bohr introduit en 1913 la **quantification** des niveaux d'énergie des atomes pour expliquer les spectres de raies : les atomes ne peuvent se trouver que dans des états d'énergie discrets.

Les niveaux d'énergie correspondent au placement des électrons dans l'atome.

L'état de plus faible énergie est appelé **état fondamental**. Pour l'hydrogène, son énergie vaut $\mathcal{E}_1 = 13,6 \text{ eV} = 13,6 \times 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$. L'électron-volt eV est l'unité utilisée pour donner l'énergie des électrons. Elle est plus pratique que le joule car on s'affranchit des puissances de 10. Il faudra cependant faire attention aux conversions dans les exercices !

Les autres états d'énergies supérieures sont appelés **états excités**.

On peut observer des **transitions** entre les différents niveaux d'énergie d'un atome.

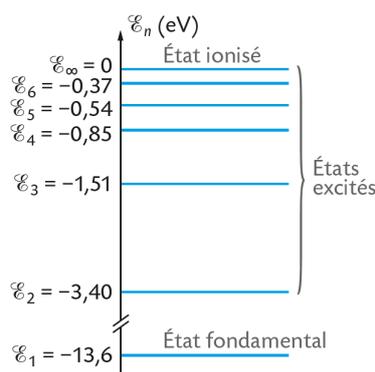


Figure 6 – Diagramme de niveaux d'énergie de l'atome d'hydrogène (Source : *Physique-Chimie 1re S*, Hachette éducation (p. 50)).

Définition – Absorption : un atome peut absorber un photon incident pour passer d'un état d'énergie \mathcal{E}_m vers un état d'énergie $\mathcal{E}_p > \mathcal{E}_m$. On dit alors que l'atome est **excité**. Pour cela, il faut que l'énergie du photon incident vérifie $\mathcal{E} = \mathcal{E}_p - \mathcal{E}_m$.

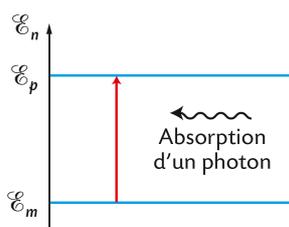


Figure 7 – Absorption d'un photon (Source : *Physique-Chimie 1re S*, Hachette éducation (p. 51)).

On peut également observer le phénomène inverse, appelé **émission**.

Définition – Emission : un atome peut émettre un photon pour passer d'un état d'énergie \mathcal{E}_p vers un état d'énergie $\mathcal{E}_m < \mathcal{E}_p$. On dit alors que l'atome **se désexcite**. Alors, l'énergie du photon émis vérifie $\mathcal{E} = \mathcal{E}_p - \mathcal{E}_m$.

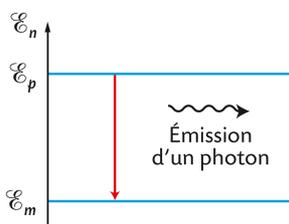


Figure 8 – Emission d'un photon (Source : *Physique-Chimie 1re S*, Hachette éducation (p. 51)).

C/ Spectres d'émission et d'absorption

Le spectre d'émission correspond aux rayonnements émis par la source de lumière. Si elle est atomique, le spectre sera composé de **raies**. On peut calculer les longueurs d'onde des raies d'émission de l'hydrogène à l'aide de la figure 6.

Transition	3 → 2	4 → 2	5 → 2	6 → 2
Ecart énergétique [eV]	1,89	2,55	2,86	3,03
Longueur d'onde associée [nm]	658	489	435	410

Remarque – Attention à la conversion des énergies. Il faut les convertir en joules pour utiliser la formule (3).

On retrouve les longueurs d'onde associées au raies de la lampe à vapeur de sodium.



Figure 9 – Spectre d'émission de la lampe à vapeur d'hydrogène (Source : web-labosims.org).

Revenons sur le spectre du Soleil (figure 5). Les raies noires correspondent à l'absorption de l'atmosphère du Soleil, constituée de gaz qui absorbent les longueurs d'onde qui leur sont caractéristiques. On peut alors remonter à la composition de l'atmosphère du Soleil en connaissant son spectre d'absorption !

Si l'on compare les longueurs d'onde des raies sur le spectre d'émission du Soleil à celles du spectre d'émission de la lampe à vapeur d'hydrogène, on voit que certaines coïncident. L'atmosphère du Soleil est donc notamment constituée d'hydrogène.

Remarque – On pourrait également utiliser un autre animation de web-labosims.org pour déterminer l'atmosphère d'autres étoiles.

L'absorption est un phénomène également utilisé en chimie pour déterminer la concentration de solutions colorées. Pour cela, on utilise la loi de Beer-Lambert vue en seconde. La méthode utilisée est la **spectrophotométrie UV-visible** et conduit à l'obtention de **spectres d'absorbance** des solutions.

Conclusion

Les spectres sont très utiles pour décrire des rayonnement électromagnétiques. En les observant, on peut conclure sur la nature de la source de ces rayonnement. Si le spectre est continu, il s'agit d'un corps chauffé, qui peut être modélisé comme un corps noir (ex : Soleil, lampe halogène). S'il s'agit d'un spectre de raies, le rayonnement est dû à l'excitation ou la désexcitation d'atomes.

Les spectres ne sont pas spécifiques aux ondes électromagnétiques. On peut également en tracer pour les ondes sonores notamment. Ce sera vu en terminale SPCL.