

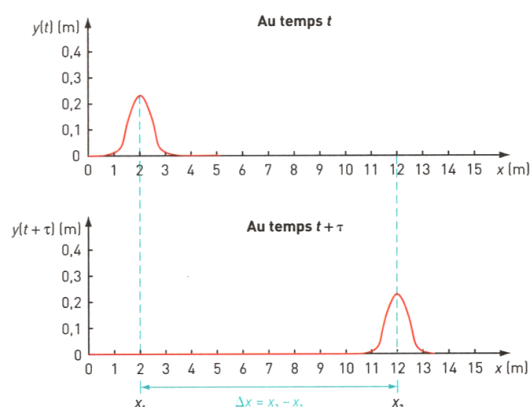
Chapitre 4

Caractéristiques des ondes

4.1 Ondes progressives, périodiques

4.1.1 Onde progressive : célérité

Une onde progressive est une déformation qui se propage dans un milieu matériel (ondes mécaniques ou électromagnétiques – ci-après “EM”) ou dans le vide (ondes EM seulement).



On définit la célérité ou vitesse de propagation de l’onde progressive comme le rapport de la distance parcourue par la déformation sur le temps nécessaire pour parcourir cette distance (cf. Fig. 4.1) :

$$c = \frac{\Delta x}{\tau}$$

Exemples : la houle, le son, la lumière sont des ondes progressives.

FIGURE 4.1 – Onde progressive.

Remarque : la vibration d’une corde d’instrument de musique (sous l’effet de l’archet, du médiator ou du marteau, selon l’instrument) est une onde stationnaire. Sa propagation est limitée par les points d’attache aux extrémités de la corde, si bien que l’onde initiale et l’onde réfléchie se superposent, et seules subsistent les vibrations dont la longueur d’onde vaut 2 fois la longueur de la corde. C’est une manifestation du phénomène d’interférence.

4.1.2 Onde périodique : période, longueur d’onde et phase

Dans le cas d’une onde périodique (nécessairement progressive), la déformation se répète de manière périodique. Dans le cas particulier d’une onde progressive sinusoïdale, l’amplitude de la déformation a la forme d’une sinusoïde.

On peut définir la période T d’une telle onde (et sa fréquence $f = 1/T$), comme le délai entre deux dates auxquelles la déformation en un point donné retrouve la même amplitude. On définit aussi la longueur d’onde λ comme la distance entre deux points auxquels la déformation a la même amplitude, à un instant donné (cf. Fig. 4.2).

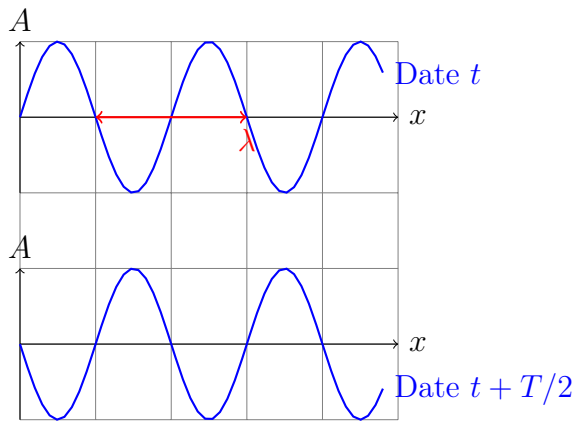


FIGURE 4.2 – Onde périodique mesurée à la date t (haut) et à la date $t + T/2$ (bas).

La phase est une fonction de : la distance de la source à ce point, la date, la longueur d'onde et la période de l'onde. L'amplitude est une fonction périodique de la phase ϕ , de période 2π . Ainsi :

- la différence de phase entre deux points séparés d'un nombre entier n de longueurs d'onde vaut $2n\pi$: on dit qu'ils sont en phase, l'amplitude de l'onde est la même en ces deux points ;
- la différence de phase entre deux points séparés d'une demie-longueur d'onde vaut π : on dit qu'ils sont en opposition de phase, les amplitudes mesurées en ces deux points sont exactement opposées ;
- au même point, la phase de l'onde à deux dates séparées d'un nombre entier m de périodes diffère de $2m\pi$: l'amplitude de l'onde en ce point est la même à ces deux dates.

La notion de phase (déphasage, différence de marche) sert à expliquer le phénomène d'interférence.

Remarque "hors-programme" : Une onde sinusoïdale peut s'écrire sous la forme :

$$A(t, \vec{r}) = A_0 \sin(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})$$

où $\omega = 2\pi/T$ est appelée pulsation et \vec{k} est appelé vecteur d'onde (dans le cas unidimensionnel, $k = 2\pi/\lambda$). On peut montrer que toute onde périodique s'écrit comme une somme de sinusoïdes d'amplitudes et de fréquences différentes. La phase ϕ définie plus haut est ici l'argument de la fonction sin. Vous démontrerez et utiliserez cette écriture dans des UV ultérieures (Physique des ondes, Électromagnétisme de Maxwell, Physique quantique, etc.).

4.1.3 Dimensions de propagation des ondes

On appelle onde plane une onde se propageant selon une dimension. Par exemple, la houle prend la forme de vagues aux crêtes rectilignes et parallèles, se propageant en ligne droite, dans la direction du vent qui l'a créée.

On appelle onde de surface une onde se propageant selon deux dimensions. Par exemple, une goutte d'eau tombant sur la surface de l'eau (ou un caillou tombant dans l'eau) forme des rides circulaires concentriques à la surface : c'est une onde de surface. La forme des crêtes est circulaire car le milieu (la surface) est homogène (sans obstacle ponctuel) et isotrope (la célérité de l'onde est la même dans toutes les directions).

Conformément à la définition donnée plus haut, la célérité d'une onde périodique s'écrit en fonction de ces deux périodes spatiale et temporelle :

$$c = \frac{\lambda}{T} = \lambda f$$

L'amplitude de la déformation en un point et à un instant donnés dépend uniquement de la phase ϕ de l'onde en ce point et à cet instant.

On appelle onde de volume une onde se propageant selon trois dimensions. Par exemple, le son de votre voix, la lumière d'une étoile, les ondes radio émises par une antenne, se propagent dans tout le volume environnant. La forme des fronts d'onde (surfaces reliant les points ayant la même phase à un instant donné) dépend des caractéristiques du milieu : sphérique si le milieu est homogène et isotrope. On a vu que la célérité d'une onde EM dans un milieu dispersif dépend de l'indice optique du milieu traversé ; or certains cristaux ont deux à trois indices optiques, correspondant à des orientations particulières par-rapport à leur maille cristalline, la lumière ne se propage donc pas à la même vitesse dans toutes les directions.

4.2 Spectre d'un signal périodique

On peut montrer que toute onde périodique s'écrit comme une somme de composantes sinusoïdales d'amplitudes et de fréquences différentes. On appelle spectre l'association de son amplitude à chaque composante sinusoïdale. L'étude du spectre d'un son ou d'un rayonnement donne des renseignements sur la source. Nous allons étudier quelques spectres d'ondes sonores et EM.

4.2.1 Hauteur et timbre d'un son

La Figure 4.3 représente les visualisations de deux sons (capturés avec un microphone et visualisés à l'oscilloscope). Il s'agit de la même note, émise par un diapason ou par une guitare. Ils sont tous deux périodiques, de même période. L'un semble sinusoïdal et l'autre non. Leurs spectres sont représentés en Fig. 4.4.

Le premier spectre montre une seule fréquence : il s'agit d'une onde sinusoïdale, aussi appelée son pur. Le deuxième spectre montre plusieurs fréquences : la plus basse est appelée fréquence fondamentale, les autres (qui sont des multiples de la fréquence fondamentale) sont appelées harmoniques, les amplitudes à ces fréquences sont moindres qu'à la fréquence fondamentale.

La fréquence fondamentale (ou unique dans le cas d'un son pur) définit la hauteur de la note. Le spectre des harmoniques définit le timbre de l'instrument.

Si des fréquences supplémentaires apparaissent qui ne sont pas multiples de la fréquence fondamentale, c'est que des sons de hauteurs différentes sont émis en même temps.

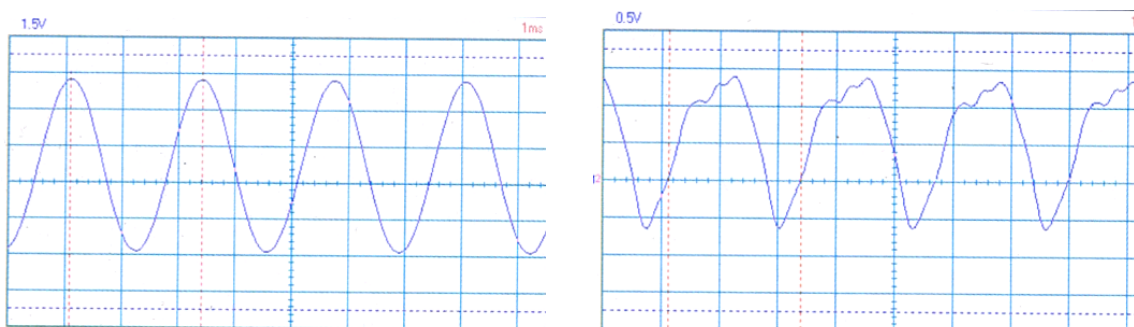


FIGURE 4.3 – Visualisation à l'oscilloscope de deux sons de même hauteur.

Gauche : son émis par un diapason (sensibilité verticale $1,5\text{ V/div}$, balayage 1 ms/div).

Droite : son émis par une guitare (sensibilité verticale $0,5\text{ V/div}$, balayage 1 ms/div).

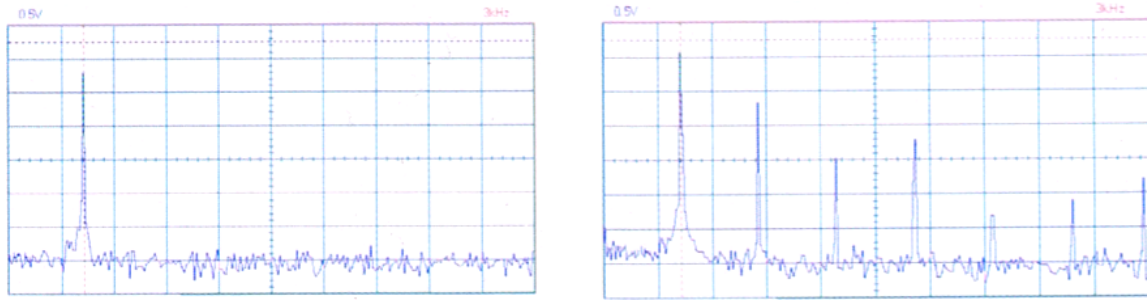


FIGURE 4.4 – Spectres des sons de la Fig. 4.3 (sensibilité verticale $0,5\text{ V/div}$, sensibilité horizontale 3 kHz/div). **Gauche** : diapason. **Droite** : guitare.

4.2.2 Spectres EM

Si le spectre d'un rayonnement montre une seule fréquence (ou longueur d'onde), ce rayonnement est dit monochromatique. Sinon il est dit polychromatique.

Le spectre d'un rayonnement monochromatique montre une seule raie d'émission, correspondant à une transition énergétique des atomes ou molécules composant la source. C'est le cas d'un laser, qui fonctionne sur le principe de l'émission stimulée et émet une seule longueur d'onde (cf. Fig. 4.5).

Les spectres polychromatiques se répartissent en spectres de raies (seules des raies d'émission sont visibles) et spectres continus.

La lumière des lampes à vapeur métallique, par exemple, comporte plusieurs raies d'émission, correspondant à plusieurs transitions énergétiques des atomes contenus dans le tube. Le tube d'une telle lampe renferme un gaz à basse pression, qui est excité par décharge électrique dans le tube. La couleur perçue est celle de la ou des raies les plus intenses. Les lampes à vapeur de mercure (lumière bleue, cf. Fig. 4.6) ont été longtemps utilisées pour l'éclairage public, de même que les lampes à vapeur de sodium (lumière jaune orangée, cf. Fig. 4.6).

Les plafonniers des salles de classe contiennent aussi un gaz à basse pression (mercure et argon). L'intérieur du tube est tapissé de phosphore, qui absorbe le rayonnement des raies UV émises par le gaz et réémet un spectre continu de lumière visible. Ainsi le spectre de ces lampes montre à la fois des raies d'émission et une composante continue de phosphorescence (cf. Fig. 4.7).

Les étoiles, lampes à incandescence, corps d'animaux à sang chaud, etc. émettent un spectre continu de type thermique. La longueur d'onde à laquelle l'intensité émise est maximale est liée à la température de surface par la Loi de Wien :

$$\lambda_{max} = \frac{2,898.10^3\text{ SI}}{T}$$

où λ_{max} est mesurée en m et la température de surface T est mesurée en Kelvin. Cette loi est issue d'un modèle d'émission appelé corps noir. Les sources réelles se rapprochant le plus de ce modèle sont les étoiles, dont le spectre est appelé "corps gris". Sur ce fond de spectre continu, les spectres d'étoiles montrent des raies sombres, appelées raies d'absorption. Les composants de l'atmosphère de l'étoile absorbent certaines longueurs d'onde, correspondant à leurs transitions énergétiques permises (cf. Fig. 4.7).

Par exemple, le corps humain a une température d'environ 37°C , son maximum d'émission se situe donc dans l'infrarouge. Le Soleil a une température de surface de 5900 K et son maximum d'émission, avant absorption par l'atmosphère terrestre, se trouve dans le domaine visible vers 500 nm . Le maximum après absorption se situe vers 560 nm (vert).

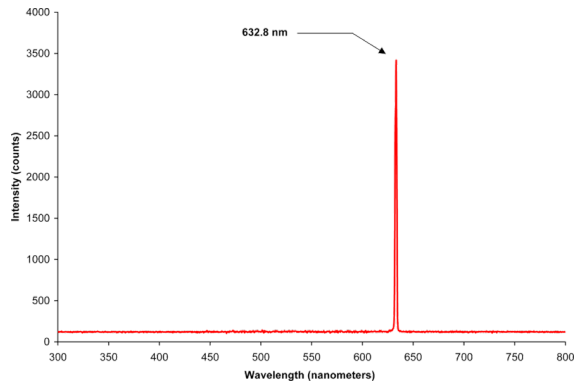


FIGURE 4.5 – Spectre d'un laser He-Ne (source Wikimedia Commons).

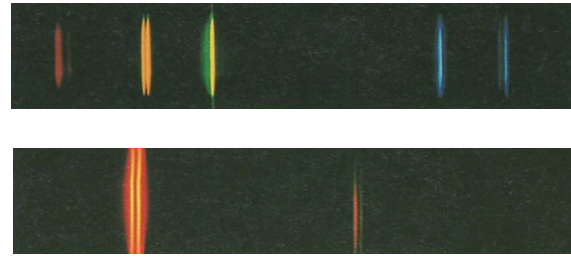


FIGURE 4.6 – **Haut** : spectre d'une lampe à vapeur de mercure. **Bas** : spectre d'une lampe à vapeur de sodium (vers la droite, un parasite).

Les diodes électroluminescentes (DEL) sont constituées de matériaux semi-conducteurs, qui émettent un spectre étroit correspondant à un ensemble de transitions permises de longueurs d'onde proches, lorsqu'ils sont parcourus par un courant électrique (cf. TD3).

Conclusion

À retenir :

- définitions de la célérité d'une onde, de sa période, fréquence, longueur d'onde ;
- définitions de la hauteur et du timbre d'un son ;
- définitions des raies d'émission/d'absorption ;
- loi de Wien pour un spectre thermique.

À savoir faire (cf. TD 3) :

- caculer célérités, fréquences et longueurs d'onde ;
- analyser un spectre sonore, un spectre EM.

Bibliographie

- *DéfiBAC, Physique-Chimie, Tle S*, Ed. Bordas (2012)
- *ABC du BAC, Physique-Chimie spécifique et spécialité*, Ed. Nathan (2013)
- *Physique-chimie, Tle S*, Ed. Nathan (2012)
- *Objectif PCEM, Physique et Chimie générale*, Ed. Hachette supérieur (2006)
- *Physique, Tle C & E*, Ed. Nathan (1989)
- *L'éclairage basse tension et très basse tension*, Ed. SAEP (2002)

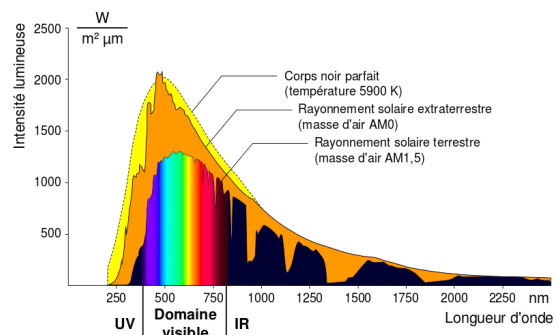
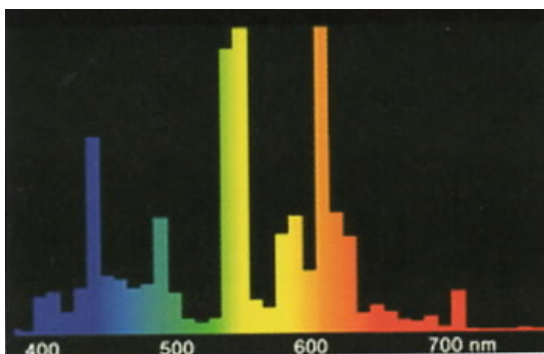


FIGURE 4.7 – **Gauche** : spectre d'un plafonnier à tube. **Droite** : spectre du Soleil, avant et après absorption par l'atmosphère terrestre (source Wikimedia Commons).