

Le ciel est bleu, le Soleil brille, ... Pourquoi ?

Florent Rachet

Dualité onde – corpuscule

Tout au long du 19^{ème} siècle, la lumière a été considérée comme une onde. Du reste, toute l'optique ondulatoire s'appuie sur cette hypothèse attestée par de nombreuses expériences. La lumière est alors représentée par une sinusoïde infinie. Par ailleurs, Einstein a démontré au début du 20^{ème} siècle (1905) que pour expliquer certains phénomènes, il faut faire appel à une représentation de la lumière sous forme de corpuscules nommés photons. En fait, la lumière présente les deux aspects à la fois. Il s'agit de la notion de dualité onde – corpuscule qui est l'un des fondements de la physique quantique donc de la physique moderne. En résumé, Einstein réconcilie les deux natures de la lumière en signifiant que « dans une onde électromagnétique de fréquence ν , l'énergie est transportée par des particules d'énergie $h\nu$ nommées photons, h étant la constante de Planck ». La meilleure représentation que l'on puisse se faire de la lumière est dès lors sous forme de trains d'ondes.

Domaine spectral visible

Rappelons que le domaine spectral visible correspond au domaine de longueurs d'onde compris entre, typiquement, 400 nm et 670 nm. Entre ces deux limites, se répartissent les différentes couleurs de l'arc-en-ciel : violet pour les plus basses longueurs d'onde, puis indigo, bleu, vert, jaune, orange et enfin rouge pour les plus grandes longueurs d'onde. En dessous de 400 nm, on passe dans le domaine spectral des ultraviolets et au-dessus de 670 nm, on passe dans le domaine spectral des infrarouges. La superposition de toutes les couleurs du domaine spectral visible donne du blanc. Par exemple, la lumière qui nous vient du Soleil est blanche.

Diffusion Rayleigh – la couleur bleue du ciel

La diffusion de la lumière qui est responsable de la couleur bleue du ciel est la diffusion élastique (c'est-à-dire sans changement de longueur d'onde) qui porte le nom du physicien anglais Rayleigh. Les lois de Rayleigh indiquent que les particules diffusent les ondes dont la longueur d'onde est supérieure à la taille de ces mêmes particules. Or, les principales molécules de l'atmosphère, le dioxygène (O_2) et le diazote (N_2), sont d'une taille très inférieure aux longueurs d'ondes du spectre visible. Plus précisément, l'intensité de la couleur diffusée est inversement proportionnelle à la puissance quatrième de sa longueur d'onde. Les molécules majoritaires présentes dans l'air ont donc la bonne dimension pour diffuser les plus courtes longueurs d'onde de la lumière, les violet, indigo et bleu en l'occurrence ; les longueurs d'onde plus longues, telles que les rouges, ne sont que très peu diffusées par ces molécules atmosphériques. C'est donc un mélange de violet, d'indigo, de bleu, de vert et une petite fraction des autres couleurs qui, étant diffusé dans tout le ciel, lui confèrent ce bleu que l'on connaît bien.

La couleur du soleil

C'est aussi la diffusion Rayleigh qui explique pourquoi le Soleil est jaune. Vu depuis l'espace, il est blanc mais, sur Terre, une partie de sa lumière bleue a été diffusée. Le Soleil accuse donc un excès de longueurs d'onde rouges, d'où un jaunissement du disque solaire. Toutefois, lorsque le soleil se couche (ou se lève), le trajet de la lumière solaire à travers l'atmosphère est plus important. La diffusion de la lumière est donc plus importante puisque les radiations lumineuses rencontrent davantage de molécules pendant leur trajet. La diffusion s'étend alors aux radiations vertes et en partie aux radiations jaunes. Le ciel prend alors une teinte rosée alors que la lumière nous parvenant directement du soleil contient alors en majorité du rouge et du jaune. Le disque solaire nous apparaît donc de couleur rouge orangée.

Nuages blancs

Les nuages sont constitués de minuscules particules d'eau liquide ou de glace, ou les deux simultanément, en suspension dans l'atmosphère. Les particules individuelles dont ils sont constitués ont une taille supérieure ou de l'ordre de la longueur d'onde de la lumière visible (de l'ordre de 500 nm). C'est la diffusion de Mie cette fois qui explique la couleur laiteuse des nuages : la diffusion s'applique de la même manière à toutes les longueurs d'ondes. La lumière rouge est donc autant

diffusée que la lumière bleue. Globalement, les nuages ont alors la même couleur que celle de la lumière solaire qui les frappe : blanche.

Réfraction

A la traversée de la surface de séparation (dioptré) entre deux milieux d'indice de réfraction différents, n_1 et n_2 , la lumière est réfractée, c'est-à-dire que la trajectoire est déviée. C'est ce que traduit la relation de Snell (1621) et Descartes (1637) $\sin i_1 / V_1 = \sin i_2 / V_2$ où $V = c/n$ est la vitesse de propagation de la lumière dans le milieu d'indice de réfraction n , $c \approx 3 \cdot 10^8$ m/s étant la vitesse de la lumière dans le vide. On en déduit donc la célèbre formulation : $n_1 \cdot \sin i_1 = n_2 \cdot \sin i_2$. c étant la vitesse la plus grande accessible dans l'univers, on constate que $n \geq 1$. En conclusion, le phénomène de réfraction rend compte du fait que la lumière ne suit une trajectoire rectiligne que dans un milieu homogène, transparent et isotrope c'est-à-dire dans un milieu d'indice de réfraction constant

Dispersion - Arc en ciel

Un milieu est dispersif quand son indice de réfraction dépend de la longueur d'onde de la lumière qui le traverse. La dispersion permet de décomposer la lumière blanche. C'est ce que permet artificiellement un prisme. C'est aussi ce que font naturellement les gouttes d'eau selon le même principe. Dans ce dernier cas, par deux réfractions et une réflexion sur le fond de la goutte d'eau, les rayons incidents du Soleil sont dispersés suivant leur couleur, le violet moins que le rouge. Un œil reçoit donc le rayon violet d'une goutte et le rayon rouge d'une autre goutte située "au dessus". C'est donc parce qu'il y a une réflexion dans les gouttes d'eau que l'arc en ciel est rouge à l'extérieur et violet à l'intérieur.

Mirages

Il vous est certainement déjà arrivé, par temps de canicule, de voir des « flaques d'eau virtuelles » sur la route. L'explication de cette illusion d'optique est simple : la lumière suit une trajectoire courbe. La chaussée étant surchauffée, il peut y avoir plusieurs degrés d'écart entre la température au niveau du sol et la température de l'air située 1 m au-dessus. Cette hétérogénéité est responsable de la déviation des ondes lumineuses vers les zones où la température est la moins élevée, ce qui correspond aux zones où la vitesse de propagation de la lumière est la plus faible, c'est-à-dire là où l'indice de réfraction est le plus grand. De façon générale, on peut dire que la déviation se fait dans le sens du gradient d'indice de réfraction. Le cerveau ne concevant, de façon innée, que des trajectoires rectilignes, il considère la tangente à la trajectoire réelle au niveau de l'œil et voit donc une portion de ciel sur la route. Le ciel ne pouvant pas, pour notre cerveau, être sur le sol, nous analysons immédiatement cette image comme étant celle d'une flaque d'eau. Il s'agit de ce que l'on nomme un mirage inférieur car l'image est située en-dessous de l'objet. Il existe aussi des mirages supérieurs dans le cas où le sol est plus froid que l'air qui est en contact avec lui : on peut alors voir un mirage situé au-dessus de l'objet.

Pourquoi le soleil brille

La vie entière des étoiles est régie par la gravitation. Dans un premier temps, les étoiles se forment par compression d'un nuage interstellaire, cette compression étant due à la gravitation. La gravitation provoque une contraction de l'étoile. Celle-ci s'accompagne d'une augmentation de la pression et d'une élévation de la température. Une fois que la température et la pression atteignent un certain seuil, des réactions de fusion nucléaire s'amorcent ; ces réactions convertissent les noyaux d'hydrogène en noyaux d'hélium. L'énergie ainsi libérée se manifeste par une pression de radiation qui tend à dilater l'étoile. L'équilibre entre ces deux effets antagonistes fait alors entrer l'étoile dans une phase de grande stabilité qui correspond à environ 99 % de sa vie nucléaire. Durant cette période de grande stabilité, l'étoile convertit donc peu à peu son hydrogène en hélium. Notre Soleil est né il y a environ 4,5 milliards d'années et est arrivé à la moitié de sa vie. Nous verrons la prochaine fois, lorsque nous parlerons des trous noirs, ce qu'il peut advenir des étoiles à la fin de leur vie !