

IDÉES DE PHYSIQUE

Scintillations estivales

Zébrures lumineuses dans les piscines, scintillement des étoiles, interruptions des signaux du système GPS: le mécanisme sous-jacent est le même.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

Par une belle nuit d'été, regardons attentivement une étoile proche de l'horizon. Nous la voyons scintiller, c'est-à-dire clignoter légèrement. Ce scintillement est-il dû à une limitation physiologique de notre œil qui fixe une source lumineuse très faible ? Pas du tout ; c'est un phénomène physique bien réel, qui a son origine dans les fluctuations de densité de l'atmosphère. Pour le comprendre, plongeons tout d'abord dans la piscine ou la mer et observons les zébrures lumineuses qui animent le fond. Nous nous enlancerons ensuite dans l'espace et verrons pourquoi le signal provenant d'un satellite s'éteint parfois.

Des caustiques au fond de l'eau

Avant qu'il ne fasse nuit, profitons du soleil et de la chaleur pour nous baigner dans la piscine. Nous pourrions remarquer les figures changeantes qui apparaissent au fond de l'eau (voir la figure 1). Ces lignes lumineuses assez nettes et mouvantes s'atténuent lorsque l'eau devient éteale. Elles ont donc pour origine les petites vagues à la surface de la piscine, et la lumière du Soleil bien sûr.

Quel est l'effet de cette non-planéité ? Tout rayon lumineux qui arrive de biais sur une interface air-eau est dévié : il est « réfracté ». Comme l'indice optique de l'eau est supérieur à celui de l'air, l'angle que fait le rayon réfracté avec la perpendiculaire à la surface est inférieur à l'angle d'incidence. Si la surface de l'eau est ondulée, des rayons parallèles, tels ceux

qui nous parviennent du Soleil, sont déviés différemment selon le point d'incidence sur l'interface air-eau.

Prenons le cas d'un Soleil situé au zénith (voir la figure 2). En haut d'une vague, là où la surface de l'eau est convexe, l'effet de la réfraction est de concentrer les rayons, comme le fait une loupe ou une lentille convergente. À la verticale du sommet de cette vague, lorsqu'on descend en profondeur, l'intensité lumineuse augmente. Pour des vagues espacées de 50 centimètres et dont l'amplitude est de 1 centimètre, le rayon de courbure de la surface est d'une soixantaine de centimètres ; les rayons lumineux se focalisent alors à une profondeur de l'ordre de 2,5 mètres. En revanche, dans un creux, là où l'interface air-eau est concave, l'effet est inverse : les rayons lumineux sont divergents et l'intensité lumineuse diminue.

L'analogie avec une lentille suggère que l'image du Soleil ne devrait être nette qu'à une seule profondeur. Tel n'est cependant pas le cas. On voit des structures lumineuses

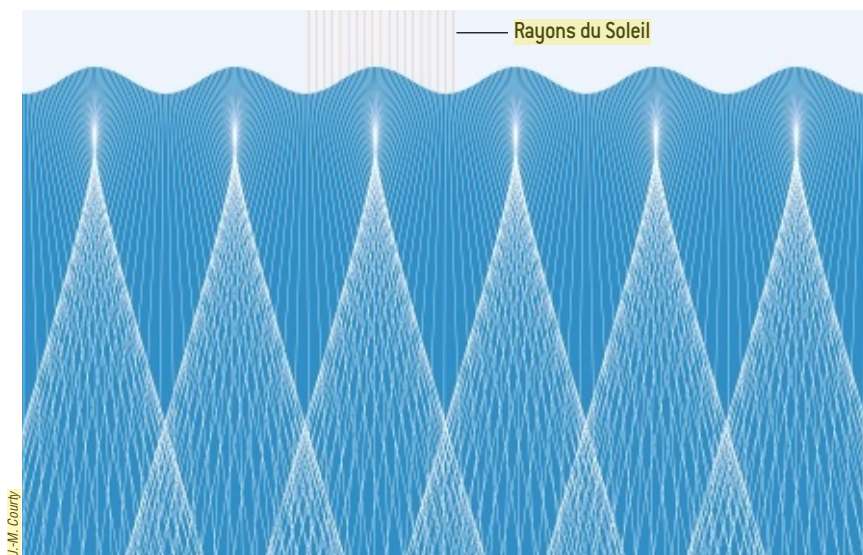
assez nettes à toutes les profondeurs, dès que ces dernières dépassent les longueurs focales en jeu. En fait, la surface de l'eau n'est pas une lentille parfaite. Au lieu d'avoir une focalisation parfaite en un ou plusieurs points et une divergence des rayons au-delà, la lumière se concentre sur une région de l'espace plus ou moins étendue et aux contours assez marqués, dont la forme dépend de la situation géométrique.

Une telle région de concentration lumineuse est appelée caustique. Son intersection avec une surface fait apparaître des figures plus ou moins intéressantes. Les zébrures changeantes que l'on voit sur le fond de la piscine en constituent un bon exemple. Une autre caustique remarquable est la courbe lumineuse en forme de cœur que l'on aperçoit parfois dans une tasse de café ou dans un verre de boisson (voir la figure 1) : elle est formée par la réflexion des rayons lumineux sur la paroi interne (et circulaire) du récipient.

Quel est le lien avec le scintillement des étoiles ? De même que la surface d'une piscine n'est pas plane, l'atmosphère n'est pas un milieu uniforme. La température y varie d'un point à un autre et d'un instant à l'autre, la variation étant d'environ 0,1 à 1 °C sur une échelle de l'ordre du mètre. Il en découle des variations de densité de l'air, donc de l'indice optique, certes faibles (de l'ordre du milliardième), mais qui se manifestent sur toute l'épaisseur de l'atmosphère. Tout se passe comme si l'atmosphère était constituée, à chaque instant, d'une superposition de lentilles de tailles et de longueurs focales variées.



1. SELON LES SURFACES RENCONTRÉES et les milieux traversés, la lumière du Soleil peut se concentrer dans certaines régions, nommées caustiques. Les zébrures lumineuses au fond d'une piscine et la courbe brillante en forme de cœur dans un récipient circulaire en sont des exemples.



J.-M. Courty

2. UN RAYON SOLAIRE VERTICAL SE RÉFRACTE différemment selon son point d'incidence à la surface de l'eau, supposée ici sinusoïdale. On voit alors que l'intensité lumineuse, que traduit la densité en rayons, se concentre sur certaines régions de l'espace. On remarque aussi qu'au-delà d'une certaine profondeur, on a toujours des concentrations lumineuses aux bords bien marqués.

Ces lentilles sont susceptibles de concentrer ou au contraire de disperser la lumière de l'étoile que l'œil capte et qui est entièrement contenue dans un très fin cylindre dont la base est l'ouverture de notre pupille, soit 0,5 centimètre de diamètre (voir la figure 3). L'effet de toutes ces lentilles se cumule sur le trajet de la lumière lors de sa traversée de l'atmosphère. Au gré de l'agitation de l'air, les perturbations que rencontre le rayon lumineux évoluent et se déplacent ; il s'ensuit que l'intensité lumineuse varie de façon aléatoire au cours du temps, d'où le scintillement.

Une étoile scintille, mais pas une planète

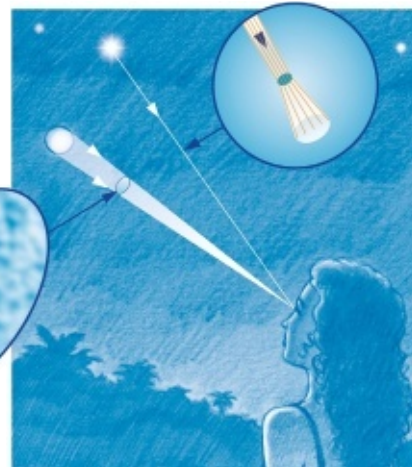
Pour que la fluctuation d'intensité de la lumière d'une étoile soit notable au niveau du sol, il faut que les focales des lentilles atmosphériques soient comparables à l'épaisseur de l'atmosphère traversée, soit de l'ordre de 100 kilomètres (la concentration lumineuse étant maximale au foyer d'une lentille). On montre que la distance focale associée à une perturbation d'indice optique est inversement proportionnelle à la variation d'indice. Il en résulte que seules

les perturbations à l'échelle d'une dizaine de centimètres ou moins contribuent au scintillement.

Ce chiffre a son importance, car il explique pourquoi les planètes visibles à l'œil nu ne scintillent pas. Contrairement aux étoiles, tellement lointaines qu'on peut les considérer comme ponctuelles, les planètes ont un diamètre apparent de l'ordre de quelques dizaines de seconde d'arc.

Les rayons réfléchis qui parviennent à notre œil de deux points diamétralement opposés de la surface d'une planète sont alors écartés d'une dizaine de centimètres à un kilomètre de distance de notre œil, et de un mètre à dix kilomètres de distance. C'est plus que la taille caractéristique des perturbations responsables du scintillement. Par conséquent, les différents points de la planète scintillent de façon indépendante et, par un effet de moyenne sur tous ces points, le scintillement est fortement réduit. Notre œil ne le perçoit plus. Seuls des instruments spécifiques peuvent le mesurer ; ils permettent ainsi d'étudier les fluctuations de l'atmosphère.

Ces effets ne sont pas réservés à la lumière visible. Ils concernent toute onde



Bruno Vacaro

3. QUAND LE FAISCEAU LUMINEUX issu d'une étoile et dirigé vers l'œil de l'observateur rencontre un petit volume d'atmosphère (en bleu foncé dans le zoom) dont l'indice optique de réfraction diffère de la valeur moyenne, il peut diverger (comme représenté ici) ou converger. Cela modifie l'intensité de la lumière transmise. L'accumulation de ces phénomènes le long du faisceau conduit à des fluctuations d'intensité lumineuse : c'est le scintillement. Pour une planète, la lumière forme un faisceau conique dont la section (de l'ordre de un mètre de diamètre à dix kilomètres de l'œil) est bien plus grande que les hétérogénéités atmosphériques responsables du scintillement. Par un effet de moyenne, le scintillement devient négligeable.

LES AUTEURS



Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK sont professeurs de physique à l'Université Pierre et Marie Curie, à Paris. Leur blog : <http://blog.idphys.fr>

✓ BIBLIOGRAPHIE

P. M. Kintner *et al.*, GNSS and ionospheric scintillation, How to survive the next solar maximum, *InsideGNSS*, pp. 22-30, juillet-août 2009 (<http://www.insidegnss.com/auto/julyaug09-kintner.pdf>).

D. K. Lynch et W. Livingston, Aurores, mirages, éclipses..., Dunod, 2002.

D. Dainis *et al.*, Atmospheric intensity scintillation of stars, I. Statistical distributions and temporal properties, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, vol. 109, pp. 173-207, 1997.

Retrouvez les articles de J.-M. Courty et E. Kierlik sur www.pourlascience.fr

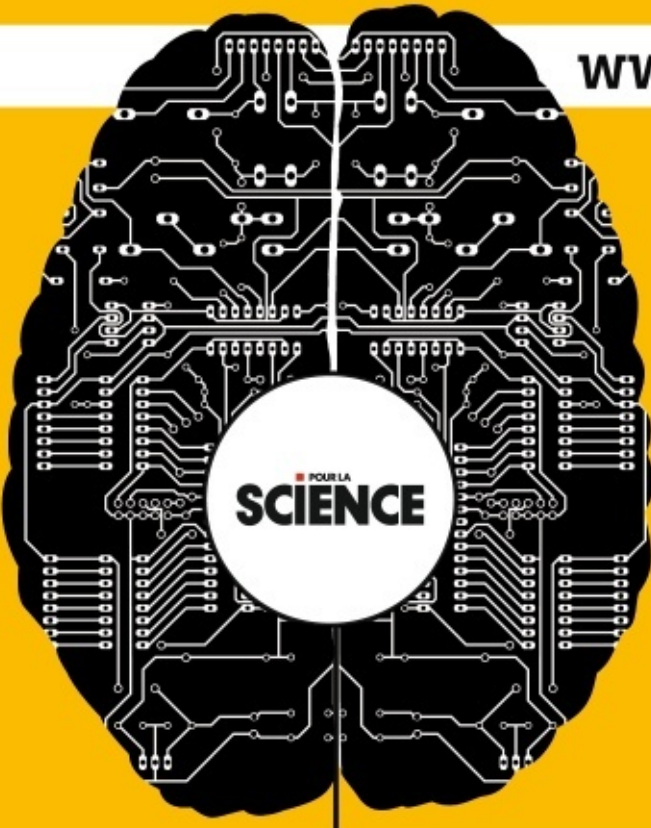
qui traverse un milieu non homogène. C'est le cas des signaux émis par les satellites dans le domaine des micro-ondes lorsqu'ils traversent l'ionosphère. Cette couche de l'atmosphère fortement ionisée altère la vitesse de propagation de ces ondes, effet qui doit être pris en compte dans le traitement des signaux du système GPS de géolocalisation.

Orages solaires contre GPS

Lors des orages solaires, l'ionosphère est fortement perturbée. Comme la longueur d'onde des micro-ondes est beaucoup plus grande que celle de la lumière visible, aux effets de lentille s'ajoutent des effets de diffraction. Le rôle des irrégularités atmosphériques dont la taille est de quelques

centaines de mètres est alors important. En outre, lorsqu'elles sont nombreuses, des interférences ont lieu entre les ondes diffrusées par plusieurs perturbations. Il en résulte au niveau du sol un éclairage non homogène, semblable à l'aspect granuleux d'une surface éclairée par un faisceau laser, mais avec une granularité de taille caractéristique bien plus grande.

Pour l'utilisateur, cela se traduit par des interruptions de signal imprévisibles. Lors du prochain maximum de taches solaires, prévu pour mai 2013, seules des perturbations mineures sont à attendre sur les récepteurs courants, assez peu sensibles. En revanche, pour les applications nécessitant une grande sensibilité ou un suivi ininterrompu du signal, il sera nécessaire d'adapter les algorithmes de traitement du signal...



www.pourlascience.fr

**Restez en contact
avec l'actualité scientifique.**

Retrouvez Pour la Science partout sur le web :

Rejoignez-nous sur Facebook

<http://bit.ly/pls-facebook>

Suivez-nous sur Twitter

<http://twitter.com/PourlaScience>

Abonnez-vous à nos flux RSS

<http://bit.ly/pls-rss>

Recevez nos lettres d'information

<http://bit.ly/pls-newsletters>

Visitez notre site Internet

<http://www.pourlascience.fr>