



la dérive des continents, ce qui explique qu'on les rencontre partout. Les abeilles à dard, dont *Apis mellifera*, se sont différenciées il y a seulement 20 millions d'années, probablement en Asie, puis ont gagné l'Europe, en passant par l'Afrique, il y a 4 millions d'années.

Comment s'y prend Hugo Boistelle pour confectionner ses abeilles en papier? À partir de feuilles à dessin noires, il dessine puis découpe une silhouette, une sorte de patron en deux dimensions de l'insecte. La troisième naîtra de pliages successifs. Les abeilles sont représentées à l'échelle 2: la *Nomada flava* fait ici près de 1,5 centimètre de longueur. Les effets de texture, de

gaufrage sont rendus par diverses techniques, de l'application d'un ongle à la pression d'un coquillage. À la fin, toutes les coupes franches de la silhouette initiale ont disparu. La touche finale consiste à coller les ailes, réalisées avec du papier-calque légèrement coloré en sépia. L'insecte est prêt à rejoindre, épinglé, sa boîte d'entomologiste qui sera exposée au public.

«Je souhaite que l'exposition apporte à ce dernier un regard nouveau sur cet insecte emblématique à travers les dernières découvertes scientifiques sur son génie», déclare Éric Tournieret. Ses nombreux voyages en terres de traditions apicoles (avec les nomades d'Éthiopie, les

Pygmées de la République du Congo...) et les ravages constatés en certaines régions par des pratiques agricoles intensives l'ont convaincu d'une chose: «Il vaut mieux travailler avec la nature que contre». Surtout quand notre survie en dépend... ■

«Abeilles, une histoire naturelle»,
au Muséum d'histoire naturelle du Havre,
jusqu'au 10 novembre 2019.
<http://www.museum-lehavre.fr>



L'auteur a publié:
**Pollock, Turner, Van Gogh,
Vermeer et la science...**
(Belin, 2018)

LES AUTEURS



JEAN-MICHEL COURTY et ÉDOUARD KIERLIK
professeurs de physique à Sorbonne Université, à Paris

VERS L'HORIZON, ET AU-DELÀ!

**L'horizon géométrique n'est pas une fatalité :
grâce à la réfraction atmosphérique, les rayons
lumineux se courbent et permettent de voir plus loin.**



Tout a commencé par une question apparemment élémentaire nous arrivant par courriel : « Comment se fait-il que la surface des océans est courbe alors que celle des lacs est plate ? Ne devrait-elle pas aussi être courbée ? » La réponse nous semblait évidente et nous avons donc répondu en substance : « Les lacs ont la même courbure que les océans, celle de la Terre. Mais comme ils sont bien moins étendus que les océans, leur courbure est difficile à percevoir. »

C'était sans compter sur la réponse très argumentée, relatant des observations précises, des mesures et des calculs numériques, qui nous est revenue quelques heures plus tard.

Notre interlocuteur avait observé, posté sur la rive du lac du Bourget avec un zoom placé à 0,51 mètre de hauteur, un muret d'un port de plaisance situé à l'autre bout du lac, à 16,7 kilomètres de distance. Ce muret était haut de 1,6 mètre.

Or les calculs montraient que, compte tenu de la courbure terrestre, il n'aurait dû voir que des structures dont la hauteur dépasse 15 mètres. Notre correspondant en déduisait que le lac était plat. Manifestement, il avait vu quelque chose qu'il n'aurait pas dû voir : il avait vu au-delà de l'horizon !

JUSQU'OUÙ PEUT PORTER NOTRE REGARD ?

Comment l'expliquer ? Évaluons tout d'abord la distance de l'horizon pour un observateur situé à une certaine hauteur h au-dessus de la surface de la Terre. Pour ce faire, on applique le théorème de Pythagore au triangle rectangle dont les sommets sont le centre de la Terre (C), la position de l'observateur (O) et le point de l'horizon (H) qu'il peut apercevoir (voir l'encadré page ci-contre, schéma du bas).

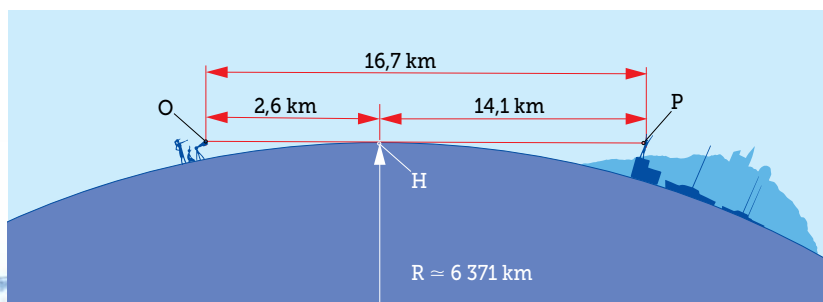
Résultat : la distance de l'horizon, OH, est à peu près égale à la racine carrée du double du produit de la hauteur d'observation par le rayon de la Terre, soit

$3,6\sqrt{h}$ kilomètres, la hauteur h étant exprimée en mètres.

Pour $h=0,51$ mètre, on obtient 2,6 kilomètres, une distance bien plus courte que celle de l'extrémité du lac, mais qui ne concerne que la visibilité au niveau de sa surface. Un objet d'une certaine hauteur peut en effet être vu par un observateur au-delà de son horizon à condition que leurs horizons respectifs (de l'observateur et de l'objet) se recouvrent sur la ligne de visée et, à la limite, coïncident (voir l'encadré page ci-contre, en haut).

Est-ce le cas du muret du port mentionné dans le courriel ? Pour être visible par l'objectif à 16,7 kilomètres, la distance entre le muret et son horizon doit

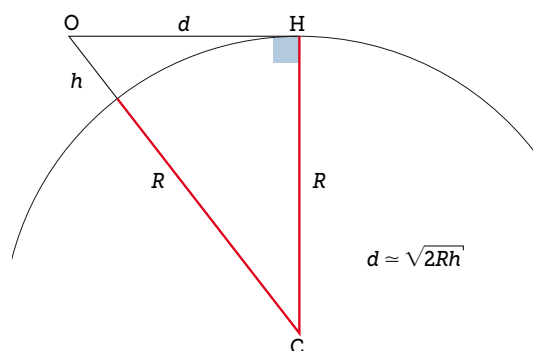
HORIZON GÉOMÉTRIQUE



Pour un observateur (O) situé à une altitude h , le point de l'horizon (H) se trouve à une distance d à peu près égale (si h est petit) à la racine carrée de $2Rh$, où R désigne le rayon de la Terre (voir le schéma ci-dessous). L'observateur peut apercevoir un point P situé au-delà de cette distance si ce point P est à une hauteur suffisante. Dans ce cas, la ligne droite reliant l'observateur O au point P passe par l'horizon commun H, comme illustré ci-dessus. Mais ce cas de figure géométrique ne correspond pas à la situation relatée dans l'article : le muret aperçu était près de dix fois trop bas par rapport à la hauteur requise (15 mètres) compte tenu de la distance OP, qui était de 16,7 kilomètres.



Dans l'image prise par l'appareil photo, apparaît un muret *a priori* trop bas pour être vu de cette distance, compte tenu de la courbure de la Terre.



atteindre $16,7 - 2,6 = 14,1$ kilomètres, ce qui exigerait de lui une hauteur de 15 mètres, bien plus élevée que sa valeur réelle, autour de 1,6 mètre.

Comment notre interlocuteur a-t-il pu voir le muret ? En fait, cet effet d'observation au-delà de l'horizon était déjà connu et décrit au début du XIX^e siècle, mais il concernait des distances bien plus grandes. Le baron Franz von Zach, astronome en séjour à Marseille en 1808, ayant entendu la rumeur qu'il était possible de voir le Canigou, un sommet des Pyrénées, depuis la basilique Notre-Dame-de-la-Garde, en fit lui-même l'observation lors d'un coucher de soleil. Pourtant, avec un sommet à 2785 mètres d'altitude et un

parvis à 164 mètres, la distance qui les sépare aurait dû être inférieure à 234 kilomètres pour que cela soit possible... alors qu'elle dépasse 260 kilomètres.

Et pour reprendre un exemple plus commun, combien de touristes s'étonnent de distinguer la Corse depuis la Côte d'Azur, même à basse altitude ? Depuis Menton, jusqu'à 50 mètres au-dessus du niveau de la mer, on ne devrait pourtant rien voir.

LE RENFORT DE LA RÉFRACTION ATMOSPHÉRIQUE

Ce que notre interlocuteur avait observé n'est rien d'autre que la manifestation d'un mirage dont l'origine est la

réfraction atmosphérique. À cause des variations de pression et de température, la densité de l'air dépend de l'altitude. Il en est donc de même de l'indice de réfraction de la lumière et de la vitesse de propagation de cette dernière, qui lui est inversement proportionnelle. Par conséquent, dans l'atmosphère, la lumière ne se propage pas en ligne droite comme dans un milieu homogène. >

Les auteurs ont récemment publié : **En avant la physique !**, une sélection de leurs chroniques (Belin, 2017).



> Pour le comprendre, utilisons les notions d'onde et de rayon et la relation qu'ils entretiennent : localement, les fronts d'onde (les lieux des points atteints par l'onde au même moment depuis son émission) sont perpendiculaires aux rayons lumineux. Supposons que, initialement, la lumière se propage horizontalement dans l'atmosphère. Les couches d'air les plus basses étant les plus denses, leur indice est plus élevé ; la lumière s'y propage donc moins vite que dans les couches supérieures. Par conséquent, la partie haute des fronts d'onde prend de l'avance sur la partie basse et les fronts d'onde s'inclinent. Cela signifie que les rayons lumineux dévient vers le bas.

Évaluons quantitativement cet effet. Pour la lumière visible, l'indice de réfraction de l'air au niveau du sol est, typiquement, de 1,0003. Il s'ensuit qu'au niveau du sol, l'onde lumineuse retarde de 3×10^{-4} kilomètre (soit 30 centimètres) par kilomètre parcouru, par rapport à une propagation dans le vide. En imaginant un plan d'onde qui s'étend du sol jusque dans le quasi-vide régnant à, disons, 8 kilomètres d'altitude, on calcule que son inclinaison varie de $3,75 \times 10^{-5}$ radian par kilomètre parcouru.

Cette valeur indique de combien sont déviés vers le bas les rayons lumineux. Cette déviation est 4 fois inférieure à l'angle de courbure dû à la rotondité de la Terre, qui est de $2\pi/(40\,000 \text{ km})$, soit $1,5 \times 10^{-4}$ radian par kilomètre ; mais cela signifie que les rayons lumineux épousent en partie la forme de la Terre. Tout se passe comme si le rayon de la Terre était augmenté de 33%, donc que la distance à l'horizon (proportionnelle à la racine carrée de ce rayon) gagnait plus de 15%.

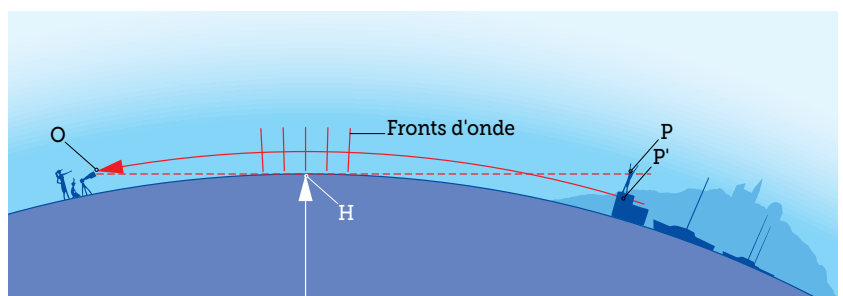
Il est remarquable qu'une aussi faible différence d'indice entre l'air au sol et le vide puisse avoir un effet aussi important sur la distance à l'horizon.

Si l'effet contribue sans doute à l'observation inattendue du Canigou, il n'est pas du tout suffisant pour expliquer les observations au bord du lac du Bourget. Celles-ci exigent que l'indice de réfraction (donc la densité de l'air) décroisse plus rapidement avec l'altitude, de telle sorte que la trajectoire du rayon lumineux soit davantage courbée.

Près du sol, on ne peut guère jouer sur la pression seule, due au poids des couches d'air, dont la diminution relative à température constante est d'environ 0,012% par mètre, ce qui redonne la déviation précédemment calculée ($3,75 \times 10^{-5}$ radian par kilomètre). On peut en revanche jouer sur

LA RÉFRACTION REPOUSSE L'HORIZON

En raison des variations de densité au sein de l'atmosphère, un rayon lumineux ne se propage pas dans ce milieu en ligne droite. Les couches d'air proches du sol sont plus denses que les couches supérieures, et la lumière s'y propage donc plus lentement. Cette variation avec l'altitude de la vitesse de propagation, et donc de l'indice de réfraction optique, fait que le rayon lumineux suit une trajectoire courbe, qui allonge la distance à laquelle est visible un point situé à une certaine hauteur. Ainsi, dans la situation illustrée ici, le point P' est visible de l'observateur O, alors que la pure géométrie n'autoriserait que la vue du point P.



la température. Comme celle-ci est inversement proportionnelle à la densité, il faut que la température augmente avec l'altitude pour que la densité diminue, ce que l'on nomme en météorologie une « inversion de température ».

Pour que la trajectoire des rayons épouse la forme de la Terre et porte donc l'horizon à l'infini, il faudrait multiplier d'un facteur 4 notre déviation estimée afin qu'elle compense exactement l'effet de courbure de la Terre. On montre que la variation relative de température devrait alors être le triple au moins de la variation relative de pression. On en déduit que la température doit augmenter d'au moins 0,11 °C par mètre d'altitude.

L'EFFET D'UNE INVERSION DE TEMPÉRATURE

Ce seuil est sans doute exceptionnel, voire impossible à atteindre sur de grandes étendues de plusieurs centaines de kilomètres. Mais il est plausible à des échelles plus locales, comme celle d'un lac où de l'air surchauffé et peu brassé par les vents est au contact d'une eau qui reste fraîche. Dans la situation relatée par notre interlocuteur, l'horizon s'est étendu, mais pas à l'infini, ce qui signifie que la variation relative de température au-dessus du lac du Bourget était inférieure au seuil en question. Si elle avait été supérieure, on aurait pu observer des effets de même nature que les mirages en mer (les Fata Morgana) et notre muret serait apparu en l'air et inversé, comme un « bateau fantôme ». ■

BIBLIOGRAPHIE

M. Nauenberg, **Newton's theory of the atmospheric refraction of light**, *American Journal of Physics*, vol. 85(12), pp. 921-925, 2017.

A. P. French, **How far away is the horizon ?**, *American Journal of Physics*, vol. 50(9), pp. 795-799, 1982.

L'UNIVERS AVANT LE BIG BANG

- 7 dossiers rédigés par des chercheurs et des experts sur le sujet
- Une lecture adaptée sur écrans

3,99 €



Les *Thema* sont une collection de hors-séries numériques. Chaque numéro contient une sélection des meilleurs articles publiés dans *Pour la Science* sur une thématique.

Dans la collection *Thema* découvrez aussi



**Commandez et téléchargez
les numéros en pdf**



Pour lire votre numéro, rendez-vous dans votre compte client



boutique.pourlascience.fr/tous-les-numeros/thema.html