

> 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 $2\pi/(40000 \text{ km})$, 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%.

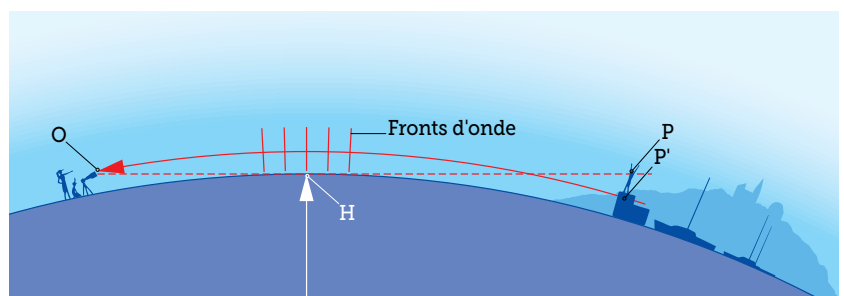
Il est remarquable qu'une aussi faible différence d'indice entre l'air au sol et le vide puisse avoir un effet aussi important sur la distance à l'horizon.

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

L'AUTEUR



HERVÉ LE GUYADER
professeur émérite de biologie
évolutive à Sorbonne Université,
à Paris

ET L'ÉVOLUTION FRAPPA DEUX FOIS

Qu'un oiseau arrive sur une île et y perde au fil de l'évolution sa capacité de voler, passe encore. Mais qu'il recommence au même endroit, c'est très fort...

En volant, les oiseaux, comme les insectes, colonisent facilement les îles. Mais la difficulté est d'y rester ! Un coup de vent suffit à entraîner l'animal loin de son nouveau territoire. On comprend pourquoi la perte de la faculté de voler devient un avantage sélectif majeur : rivés sur leur île, les animaux ne donnent plus prise aux tempêtes et courent peu de risques d'être balayés vers l'océan hostile. D'innombrables insectes ont ainsi perdu secondairement la capacité de voler. On en a observé sur les îles du Pacifique, en particulier dans l'archipel de Hawaï. *Nysius weikiuicola*, par exemple, est un petit hémiptère sans ailes

– aptère – niché au sommet du volcan hawaïen Mauna Kea. Et la mouche des Kerguelen, qui vit sur les îles Crozet, Heard et Kerguelen, dans le sud de l'océan Indien, n'est autre qu'un diptère aptère...

De nombreux oiseaux aux ailes atrophiées ont aussi été décrits. Le dronte de Maurice, plus connu sous le nom de dodo, était un pigeon insulaire. De même, différents cormorans sont devenus aptères, comme celui de Pallas, endémique des îles du Commandeur, près du détroit de Béring, et aujourd'hui disparu, ou celui de l'archipel des Galápagos, qui a survécu.

Le râle de Cuvier (*Dryolimnas cuvieri*) est l'un de ces oiseaux : après avoir colonisé plusieurs îles de l'océan Indien (Comores,



Les râles de Cuvier sont omnivores. Ils se nourrissent principalement d'insectes, de mollusques et de crabes.



Hervé Le Guyader
a récemment publié :
**L'Aventure de
la biodiversité,**
(Belin, 2018).

La population de râles de Cuvier compte entre 5100 et 7500 individus et n'est pas en danger selon l'Union internationale pour la conservation de la nature.

EN CHIFFRES

31

Parmi les 150 espèces connues de rallidés – famille d'oiseaux qui compte notamment les fous et les poules d'eau –, 31 ont évolué vers la perte du vol.

400

C'est le nombre d'espèces et de sous-espèces de vertébrés, d'invertébrés et de plantes endémiques de l'île d'Aldabra selon l'Unesco. En 1983, l'une d'elles, la fauvette d'Aldabra (*Nesillas aldabrana*), s'est éteinte à cause de la prédation des rats surmulots.

150 000

C'est l'effectif de la population de tortues géantes des Seychelles (*Aldabrachelys gigantea*) sur l'atoll d'Aldabra. Ces tortues peuvent atteindre 1,2 mètre pour 300 kilogrammes – une taille supérieure à celle des tortues géantes des Galápagos (*Chelonoidis nigra*).



Cet oiseau de la sous-espèce *D. c. cuvieri*, photographié sur une plage des Seychelles, est capable de voler, contrairement à la sous-espèce endémique d'Aldabra.

naturalistes grâce à sa flore et à sa faune, qui comptent bon nombre d'espèces endémiques. En particulier, on y trouve la plus grande colonie de tortues géantes des Seychelles (*Aldabrachelys gigantea*). Pour la tortue verte (*Chelonia mydas*), c'est le site de ponte le plus important de l'océan Indien. Deux espèces et onze sous-espèces d'oiseaux y sont endémiques, dont le râle de Cuvier.

L'île d'Aldabra présente une autre originalité: on y connaît trois importants gisements fossilifères comportant des restes de vertébrés, ce qui est rare sur des atolls, où les conditions ne sont en général pas propices à une fossilisation. Deux sites, à l'extrémité ouest de l'atoll (Bassin Cabri et Bassin Lebène), sont plus anciens que l'âge du calcaire qui les recouvre, à savoir 136 000 ans. Le troisième, Point Hodoul, à l'extrémité est, est plus jeune: il remonte à 100 000 ans. Une équipe anglaise autour des paléontologues Julian Hume, du Muséum d'histoire naturelle de Tring, et David Martill, de l'université de Portsmouth, les a méthodiquement étudiés.

Or différents dépôts sédimentaires, dont des assises de calcaire et de >

Seychelles), il y est devenu aptère. Sur l'île d'Aldabra, entre les Seychelles et les Comores, il a même donné une sous-espèce endémique, *Dryolimnas cuvieri aldabranus*. Or celle-ci est une vraie curiosité d'ornithologue, comme le montre son histoire évolutive, récemment reconstruite grâce à différents gisements de fossiles.

UN ATOLL PLUSIEURS FOIS SUBMERGÉ

Situé au nord-ouest de Madagascar, Aldabra est le deuxième atoll le plus grand du monde, après l'île Christmas, de l'archipel des Kiribati. Classé dès 1982 au patrimoine mondial de l'humanité par l'Unesco, l'atoll est célèbre chez les



Râle de Cuvier
(*Dryolimnas cuvieri*)
Taille: environ 30 cm

> phosphorite, prouvent que l'atoll, qui actuellement culmine à 8 mètres au-dessus du niveau de la mer, a été complètement submergé à plusieurs reprises. Deux inondations certaines datent d'environ 340 000 et 12000 ans, et deux autres se sont vraisemblablement intercalées il y a 240000 et 200000 ans.

Évidemment, la submersion complète d'un atoll entraîne l'éradication de l'ensemble des faune et flore terrestres. La plus récente a donc causé l'extinction des nombreuses espèces de vertébrés retrouvées dans le gisement du Bassin Cabri, dont deux oiseaux endémiques (un pétrel et un canard), un crocodile à corne endémique, une tortue géante, un iguane et des scinques... L'étude paléontologique du gisement de Point Hodoul, postérieur, montre qu'après réémergence de l'atoll, la recolonisation a été rapide. Si les oiseaux et le crocodile ont complètement disparu, les autres espèces, non endémiques, sont revenues et comptent parmi les fossiles du site.

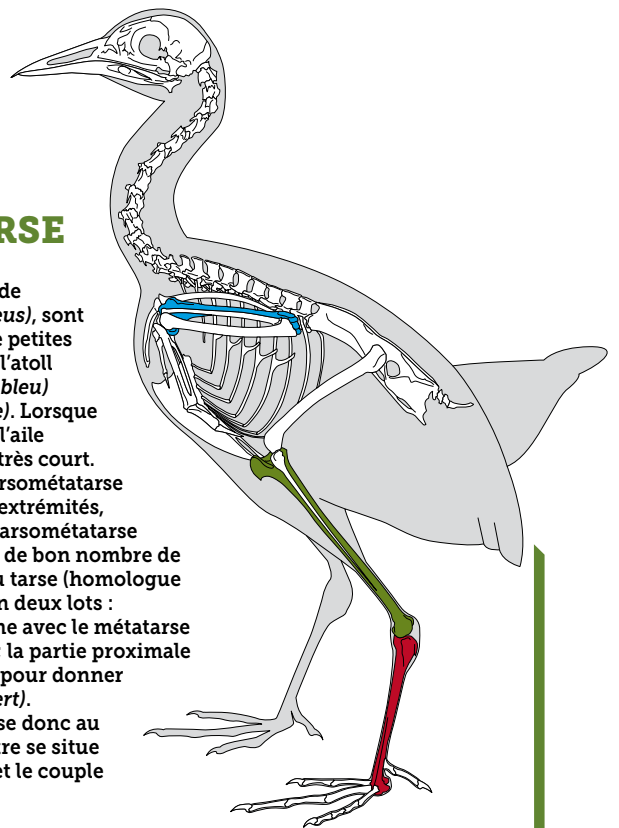
LA PARTICULARITÉ DU RÂLE DE CUVIER

Les gisements renferment des restes osseux de râle de Cuvier. Dans le plus ancien, celui du Bassin Cabri, ce sont deux humérus. De taille réduite, ils sont quasiment identiques à ceux du râle de Cuvier d'Aldabra moderne (*D. c. alda-branus*). Dans le gisement plus récent (Point Hodoul), il s'agit d'un tarsométatarse. Chez les oiseaux modernes, en effet, les homologues du tarse (cheville) et du métatarse (pied) des mammifères sont fusionnés en un seul os, le tarsométatarse (voir l'encadré ci-dessus). Celui de Point Hodoul paraît plus trapu, plus robuste que ceux des râles de Cuvier d'Aldabra modernes, eux-mêmes plus trapus et robustes que ceux des râles de Cuvier d'autres îles ayant conservé leur capacité de voler (sous-espèce *D. c. cuvieri*). Cela suggère que les râles de Point Hodoul étaient meilleurs coureurs que les oiseaux actuels. Or un oiseau qui perd le vol devient coureur, ce qui entraîne l'accroissement de la puissance de ses pattes. Les râles de Point Hodoul étaient donc très probablement aptères.

La présence du râle de Cuvier dans ces gisements du Pléistocène paraît très étrange. En effet, la petite taille des humérus du Bassin Cabri prouve que l'oiseau avait déjà perdu l'aptitude au vol. Étant strictement terrestre, il a donc dû disparaître au moment de la dernière

LE SECRET DU TARSOMÉTATARSE

Les rallidés, comme ce râle de Cayenne (*Aramides cajaneus*), sont dotés de fortes pattes et de petites ailes. Les os fossiles trouvés sur l'atoll d'Aldabra sont des humérus (en bleu) et des tarsométatarses (en rouge). Lorsque l'oiseau perd la faculté de voler, l'aile s'atrophie et l'humérus devient très court. L'oiseau devenant coureur, le tarsométatarse se renforce, en particulier à ses extrémités, au niveau des articulations. Le tarsométatarse est une curiosité des oiseaux et de bon nombre de dinosaures. En effet, leurs os du tarse (homologue de notre cheville) se séparent en deux lots : la partie distale (en bas) fusionne avec le métatarse pour donner le tarsométatarse ; la partie proximale (en haut) fusionne avec le tibia pour donner le tibiotarse, l'os du pilon (en vert). L'articulation de la cheville passe donc au milieu du tarse, alors que la nôtre se situe entre le tarse (avec l'astragale) et le couple tibia-péroné.



submersion de l'atoll. Or le râle de Cuvier est revenu sur l'île au moins une fois entre la formation des deux gisements et n'a pu le faire qu'en volant, ce qui signifie que l'oiseau a perdu au moins à deux reprises la possibilité de voler.

Comparons les deux événements évolutifs, séparés de plusieurs dizaines de milliers d'années. Des oiseaux de la même espèce, c'est-à-dire avec des génomes comparables, arrivent à deux moments différents sur un atoll, c'est-à-dire dans des écosystèmes comparables. Mêmes capacités d'évolution, mêmes interférences environnementales. Il en résulte une évolution similaire. Les biologistes appellent cela de l'évolution parallèle. Différents cas sont bien circonscrits, avec des lieux différents. Par exemple, le râle de Cuvier de la sous-espèce *D. c. abbotti*, aujourd'hui disparu, était lui aussi aptère, mais endémique de l'île de l'Assomption, également dans l'archipel des Seychelles. Par ailleurs, une équipe de l'université de Pennsylvanie a montré en 2012 que les canards-vapeur ou brassemers (genre *Tachyeres*), qui vivent en Patagonie et dans les îles Malouines, ont perdu trois fois indépendamment la faculté de voler. L'étonnant, dans le cas du râle de Cuvier, est que l'on ait eu la possibilité de démontrer la répétition d'un même processus évolutif à partir d'une même espèce, au même endroit. ■

BIBLIOGRAPHIE

J. Hume et D. Martill, **Repeated evolution of flightlessness in Dryolimnas rails (Aves : Rallidae) after extinction and recolonization on Aldabra**, *Zool. J. Linn. Soc.*, article zlz018, 2019.

J. Hume et al., **A terrestrial vertebrate palaeontological review of Aldabra atoll**, Aldabra group, Seychelles, *PLoS One*, vol. 13(3), article e0192675, 2018.

T. Fulton et al., **Multiple losses of flight and recent speciation in steamer ducks**, *Proc. R. Soc. B*, vol. 279(1737), pp. 2339-2346, 2012.

3 FORMULES AU CHOIX



À renvoyer accompagné de votre règlement à :

PAG19STD



**OUI, je m'abonne
pour 1 an à** **POUR LA SCIENCE**

FORMULE DÉCOUVERTE
• 12 n° du magazine papier

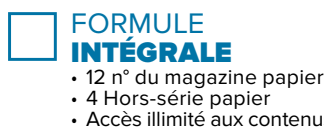
59€
Au lieu de ~~82,80€~~

01A59E



79€
Au lieu de ~~114,40€~~

1A79E



99€
Au lieu de
~~174,40€~~

I1A99E

☐ M. ☐ Mme

Nom: Prénom:

Adresse:

Code postal | | | | | Ville:

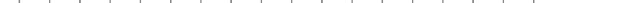
Téléphone | | | | | | | | | |

Email: (indispensable pour la formule intégrale)

.....@

J'accepte de recevoir les offres de Pour la Science ☐ OUI ☐ NON

☐ OUI ☐ NON☐ Par chèque à l'ordre de Pour la Science☐ Carte bancaire

Nº 

Date d'expiration Clé (Les 3 chiffres au dos de votre CB)

Signature obligatoire:

* Réduction par rapport au prix de vente en kiosque et l'accès aux archives numériques. Durée d'abonnement : 1 an. Délai de livraison : dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre valable jusqu'au 31/12/2019 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site <https://boutique.pourlascience.fr>. Photos non contractuelles.

Les informations que nous collectons dans ce bulletin d'abonnement nous aident à personnaliser et à améliorer les services que nous vous proposons. Nous les utiliserons pour gérer votre accès à l'intégralité de nos services, traiter vos commandes et paiements, et vous faire part notamment par newsletters de nos offres commerciales moyennant le respect de vos choix en la matière. Le responsable du traitement est la société *Pour la Science*. Vos données personnelles ne seront pas conservées au-delà de la durée nécessaire à la finalité de leur traitement. *Pour la Science* ne commercialise ni ne loue vos données à caractère personnel à des tiers. Les données collectées sont exclusivement destinées à *Pour la Science*. Nous vous invitons à prendre connaissance de notre charte de protection des données personnelles à l'adresse suivante : <https://rebrand.ly/charte-donnees-pls>. Conformément à la réglementation applicable (et notamment au Règlement 2016/679/UE dit « RGPD ») vous disposez des droits d'accès, de rectification, d'opposition, d'effacement, à la portabilité et à la limitation de vos données personnelles. Pour exercer ces droits (ou nous poser toute question concernant le traitement de vos données personnelles), vous pouvez nous contacter par courriel à l'adresse protection-donnees@pourlascience.fr.