

> principe optique stipule que cette «étendue» ne peut pas décroître le long du faisceau. Et en l'absence de diffusion de la lumière (comme on l'a supposé dans ce qui précède), elle se conserve. Parce qu'elle traduit l'information que l'on a sur le faisceau, elle est reliée à l'entropie, d'où le lien avec la thermodynamique.

Qu'est-ce que cela signifie pour notre expérience initiale? La pastille, qui constitue la surface réceptrice, peut absorber les rayons qui arrivent de toutes les directions. Si l'on veut que la surface qui collecte les rayons solaires soit bien plus grande que cette surface de réception, il faut réduire l'ouverture angulaire des rayons collectés. Dans notre cas, l'ouverture minimale correspond à la taille angulaire du Soleil. En appliquant le principe de conservation de l'étendue du faisceau, on obtient alors que le diamètre de la surface de collecte est 215 fois plus grand que celui de la pastille. Cela correspond à une aire de collecte $215^2 \approx 46\,000$ fois plus grande que l'aire de réception – le même facteur maximal de concentration que celui indiqué par la thermodynamique!

À LA RECHERCHE DU CONCENTRATEUR OPTIMAL

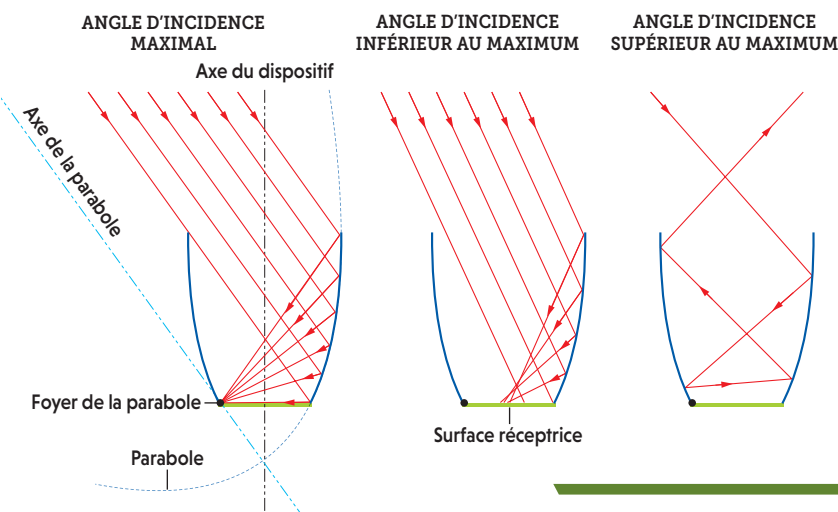
Il est possible de construire un collecteur qui tend vers cet optimum à l'aide de deux miroirs et en utilisant le «principe des rayons extrêmes». Prenons les rayons arrivant de gauche avec l'inclinaison maximale: on les focalise à l'extrémité gauche du récepteur grâce à un miroir parabolique dont le foyer coïncide avec cette extrémité (voir la figure ci-dessus). Les rayons arrivant de la droite sont collectés par un miroir symétrique. Le principe des rayons extrêmes assure que les rayons incidents d'inclinaison intermédiaire arriveront sur le récepteur.

Avec ce dispositif, nommé CPC (pour *compound parabolic concentrator*), l'ensemble des rayons provenant du Soleil et traversant la pupille d'entrée avec une inclinaison inférieure au maximum arrivent sur le récepteur de toutes les directions. Et des rayons qui franchiraient l'ouverture avec un angle d'incidence supérieur n'atteindraient pas le récepteur: ils se réfléchiraient plusieurs fois sur les parois avant d'être renvoyés vers l'extérieur.

Cependant, l'optimum suppose que le Soleil, le concentrateur et le récepteur soient alignés sur un même axe. Mais le Soleil se déplace dans le ciel... Pour des applications rudimentaires de chauffage ou de photovoltaïque, on peut se contenter de dispositifs fixes. Dans ce cas, le

CONCENTRATEURS PARABOLIQUES

Les dispositifs CPC (pour *compound parabolic concentrator*, «concentrateur parabolique composé») font appel à des miroirs de forme parabolique. Un miroir parabolique focalise un faisceau de rayons parallèles à l'axe de la parabole sur le foyer de celle-ci. Dans un CPC, deux segments de parabole symétriques sont disposés de part et d'autre d'un axe central, le bas d'un segment parabolique coïncidant avec le foyer de l'autre parabole (voir la figure ci-dessous). Les rayons dont l'angle d'incidence est inférieur ou égal à celui de l'axe de la parabole sont renvoyés sur la surface réceptrice (schémas de gauche et du milieu). Ceux d'angle d'incidence supérieur sont réfléchis dans le dispositif et finissent par en sortir (schéma de droite).



facteur de concentration est faible; en moyenne, il se situe entre 1 et 4. S'ajuster à la hauteur moyenne du Soleil dans le ciel permet d'atteindre des facteurs de concentration d'environ 100, suffisants pour des centrales solaires thermiques à concentration, où le rayonnement solaire chauffe un fluide caloporteur.

Pour des concentrations plus fortes, il faut des héliostats, qui suivent la course du Soleil dans le ciel. Il reste toujours techniquement difficile d'atteindre des facteurs de concentration dépassant 10 000, qui n'ont d'intérêt que pour des fours solaires destinés par exemple à l'étude des matériaux aux températures extrêmes.

Les concentrateurs de lumière sont utiles dans bien d'autres situations: optimiser l'éclairage des phares, réaliser des puits de lumière qui amènent à l'intérieur d'un bâtiment la lumière du soleil, injecter le maximum de lumière dans une fibre optique... Ce qui est essentiel et que permet cette «optique non imageante», c'est de ne pas avoir de pertes d'énergie lumineuse. Pour une lampe torche, par exemple, c'est s'assurer que l'intégralité de la lumière émise par la lampe se retrouve dans le faisceau. Pour les phares de voiture, c'est d'avoir toute la lumière répartie selon un profil conçu pour éclairer au mieux la route, sans éblouir les autres conducteurs. ■

BIBLIOGRAPHIE

S. Madala et R. F. Boehm, **A review of nonimaging solar concentrators for stationary and passive tracking applications**, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 71, pp. 309-322, 2017.

R. Winston, **Thermodynamically efficient solar concentrators**, *Journal of Photonics for Energy*, vol. 2(1), article 025501, 2012.

W. T. Welford et R. Winston, **The ellipsoid paradox in thermodynamics**, *Journal of Statistical Physics*, vol. 28(3), pp. 603-606, 1982.

ABONNEZ-VOUS À **POUR LA SCIENCE**

NOUVELLE
FORMULE



FORMULE
INTÉGRALE
-41%



99€

FORMULE
PASSION
-27%



79€

FORMULE
DÉCOUVERTE
-25%



59€

BULLETIN D'ABONNEMENT

À renvoyer accompagné de votre règlement à : Pour la Science - Service abonnements - 19 rue de l'industrie - BP 90 053 - 67 402 Illkirch cedex

☐ OUI, JE M'ABONNE À **POUR LA SCIENCE** POUR 1 AN,
JE CHOISIS MA FORMULE CI-DESSOUS :

☐ FORMULE **INTÉGRALE**
12 n° de *Pour la Science* + 4 Hors-Séries
+ Accès illimité aux archives en ligne depuis 1996

11A99E

99€
Au lieu de 183,44€*

☐ FORMULE **PASSION**
12 n° de *Pour la Science*
+ 4 Hors-Séries

PIA79E

79€
Au lieu de 123,44€*

☐ FORMULE **DÉCOUVERTE**
12 n° de *Pour la Science*

D1A59E

59€
Au lieu de 78,45€*

L'INDIQUE MES COORDONNÉES

☐ M. ☐ Mme

Nom : _____ Prénom : _____

Adresse : _____

Code postal _____ Ville : _____

Téléphone _____

• Mon e-mail : (à remplir en majuscule)

@

J'accepte de recevoir les informations de *Pour la Science* ☐ OUI ☐ NON
et de ses partenaires ☐ OUI ☐ NON

• Je choisis mon mode de règlement :

☐ Par chèque à l'ordre de *Pour la Science*

☐ Par carte bancaire

N° _____

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

Signature obligatoire

* Par rapport au prix de vente en kiosque, l'accès numérique aux archives. Délai de livraison : dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre réservée aux nouveaux abonnés, valable jusqu'au 31/12/2017 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site www.pourlascience.fr. Conformément à la loi "Informatique et libertés" du 6 janvier 1978, vous disposez d'un droit d'accès et de rectification aux données vous concernant en adressant un courrier à *Pour la Science*. Photos non contractuelles.

L'AUTEUR



HERVÉ LE GUYADER
professeur émérite de biologie
évolutive à l'université
Pierre-et-Marie-Curie, à Paris

L'ÉNIGME DES 7 VERTÈBRES

Pourquoi (presque) tous les mammifères ont-ils 7 vertèbres cervicales? Contrairement à ce que maints zoologistes ont longtemps cru, ce nombre n'apporte aucun avantage évolutif.

Os des membres, du crâne ou des ceintures reliant les membres à la colonne vertébrale... D'une espèce à l'autre, le squelette des mammifères actuels présente d'évidentes régularités, étudiées depuis plusieurs siècles par les médecins, vétérinaires et zoologistes. En particulier, la colonne vertébrale, qui abrite la moelle épinière, se compose de vertèbres réparties en cinq régions distinctes: cervicale, thoracique, lombaire, sacrée, caudale (voir l'encadré page 94). Chez l'homme, on compte 7 vertèbres cervicales (dont l'atlas et l'axis qui portent le crâne), 12 thoraciques munies d'une paire de côtes, 5 lombaires, 5 sacrées fusionnées en un os unique, le sacrum et, suivant les individus, 3 à 5 vertèbres caudales fusionnées en un coccyx.

Il n'échappe à personne que, chez les mammifères, le nombre total de vertèbres n'est pas identique d'un animal à l'autre, étant donné l'extrême variabilité de la longueur de la queue, et donc du nombre de vertèbres caudales. De plus, suivant les animaux, les vertèbres lombaires varient de 5 à 7, les thoraciques de 12 à 14. Mais,

comme l'a remarqué le naturaliste français Louis Daubenton au XVIII^e siècle, le nombre de vertèbres cervicales chez les mammifères reste fixé à 7. Il proposa même d'en faire une loi, jusqu'au moment où, désespéré, il découvrit que les lamantins (genre *Trichechus*) n'en ont que 6! Exit la loi de Daubenton, que les paresseux violent également: les unauas (à deux griffes sur les pattes antérieures, genre *Choloepus*) ont eux aussi 6 vertèbres cervicales, tandis que les aïs (à trois griffes, genre *Bradypus*) en présentent 9...

Regardons d'autres vertébrés tétrapodes. Chez les oiseaux, le nombre de cervicales varie entre 11 et 25. Ainsi, l'allongement du cou, comme chez le cygne ou le héron (*ci-contre à droite*), est dû à une augmentation du nombre de vertèbres. Le record, semble-t-il, est détenu par un plésiosaure marin qui vivait il y a environ 73,5 millions d'années, l'élasmosaure *Albertonectes vanderveldei*, avec 76 vertèbres cervicales! Une telle structure osseuse procure une souplesse étonnante au cou, souplesse qui fait défaut à la girafe, dont la tête ne repose que sur 7 vertèbres cervicales (*ci-contre, à gauche*). Ainsi, la comparaison avec les autres tétrapodes montre que, chez les

Pour amener le sang au cerveau, la pression artérielle de la girafe est deux fois supérieure à celle de l'homme. Des valvules empêchent le sang d'affluer au cerveau quand elle baisse la tête.

Comme la plupart des mammifères, dont l'homme, la girafe ne compte que 7 vertèbres cervicales, ce qui explique la raideur de son cou. Chaque vertèbre mesure environ 40 centimètres...



Girafe (*Giraffa camelopardalis*)
Taille: env. 5,7 m (du sol aux cornes)
Longueur du cou: env. 2,4 m



Héron pourpré (*Ardea purpurea*)
Taille: env. 90 cm (du bec à la queue)
Longueur du cou: env. 40 cm