

LES AUTEURS



JEAN-MICHEL COURTY
professeur de physique
à l'université
Pierre-et-Marie-Curie, à Paris



ÉDOUARD KIERLIK
également professeur
de physique à l'université
Pierre-et-Marie-Curie

CONCENTRÉS DE LUMIÈRE

Pour concentrer beaucoup de lumière sur une petite surface, on peut utiliser une loupe ou un autre système analogue. Mais ce n'est pas le plus efficace. On fait beaucoup mieux avec des systèmes optiques «non imageants», composés par exemple de miroirs paraboliques.

Pour concevoir des fours solaires, des torches ou des phares performants, on s'efforce de réaliser des faisceaux qui concentrent la lumière dans une région limitée de l'espace. Or les systèmes optiques qui forment des images – loupe, objectifs ou autres – ne sont pas les plus performants.

Imaginons que l'on cherche à concentrer la lumière du Soleil sur une pastille de 1 centimètre de diamètre à l'aide d'une loupe (une simple lentille convergente). L'image du Soleil se forme dans le plan focal de la lentille. Pour qu'elle soit plus petite que la pastille, il faut une focale de moins de 1 mètre, étant donné le diamètre apparent du Soleil (de l'ordre de 32 minutes d'arc, soit un centième de radian). La puissance reçue par la pastille sera alors proportionnelle à la surface de la loupe.

N'y a-t-il alors pas de limite à la concentration et à la puissance obtenue? Si, et un dispositif imaginé en 1982 par le physicien américain Roland Winston l'illustre bien. Considérons deux sources lumineuses identiques A et B, ponctuelles et isotropes (émettant de façon égale dans toutes les directions), placées dans une cavité parfaitement réfléchissante constituée de l'union d'une sphère centrée sur A et d'un ellipsoïde de révolution dont les foyers sont A et B (voir le schéma page ci-contre).

UN DISPOSITIF OPTIQUE QUI VIOLE LA THERMODYNAMIQUE?

Tous les rayons issus de A et réfléchis sur la partie sphérique de la cavité reviennent vers A. Il s'ensuit que plus de la moitié des rayons qui partent de A y reviennent, donc que moins de la moitié atteignent B. De l'autre côté, tous les rayons émis par B et réfléchis sur l'ellipsoïde se focalisent au point A. Ainsi, plus



de la moitié des rayons partant de B arrivent sur A. Les sources A et B étant identiques et isotropes, on en déduit que A reçoit plus d'énergie que B.

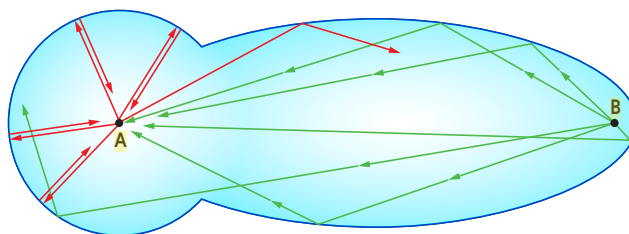
Roland Winston pointe alors un paradoxe si A et B sont des «corps noirs», censés absorber toute lumière incidente. Un tel corps émet une puissance lumineuse proportionnelle à T^4 , où T est sa température absolue. Si A et B sont initialement à la même température, le transfert d'énergie en faveur de A à l'œuvre dans le dispositif optique va briser cette égalité, et A deviendra plus chaud que B.

Ainsi, sans aucun travail, on aura pris de l'énergie à la source froide (B) pour la

UNE CAVITÉ OPTIQUE PARADOXALE

On considère une cavité en partie sphérique, en partie ellipsoïdale, aux parois réfléchissantes (ci-dessous, vue en coupe). Des points lumineux identiques sont placés aux foyers A et B de l'ellipsoïde, le point A étant aussi le centre de la sphère utilisée. On voit facilement que la plupart des rayons lumineux partant de A reviennent en A, et que la plupart des rayons lumineux partant de B aboutissent en A (dans une ellipse, un rayon partant d'un foyer aboutit à l'autre foyer). Ainsi, A recevrait plus d'énergie que B et sa température dépasserait donc celle de B, ce qui serait en contradiction avec les principes de la thermodynamique.

C'est l'hypothèse de sources lumineuses ponctuelles qui conduit à cette situation paradoxale. Les sources placées en A et B sont en réalité de taille non nulle, et les rayons qui ne partent pas strictement du point B n'atteignent pas A. Un calcul détaillé montre alors que les sources A et B reçoivent *in fine* la même énergie.



Dans les phares des voitures modernes, des dispositifs optiques concentrent la lumière en un faisceau bien profilé, qui éclaire mieux et éblouit moins.

donner à la source chaude (A), ce qui violerait le deuxième principe de la thermodynamique tel qu'énoncé par Rudolf Clausius: dans le dispositif en question, il est impossible de porter un objet à une température supérieure à celle de la source de chaleur qui lui apporte son énergie.

Comment résoudre ce paradoxe? Une première réponse réside dans la réalisation du dispositif. Les sources ne sont jamais ponctuelles: leur taille n'est pas nulle. Or en dehors des stricts foyers de l'ellipsoïde, les rayons émis par les autres points des sources ne convergent pas en un point. La plupart des rayons partant de B n'atteignent alors pas A. Les calculs

montrent alors que A et B reçoivent la même énergie, et que leurs températures restent par conséquent égales.

Pour en revenir à notre pastille, le second principe de la thermodynamique indique donc qu'elle ne pourra jamais dépasser les 5800 kelvins (environ 5500 °C) de la surface du Soleil. Ce qui, pour un corps noir à l'équilibre thermique, correspond à une puissance reçue de 6,32 kilowatts pour 1 centimètre carré. La puissance solaire au niveau de la Terre (avant la traversée de l'atmosphère) étant de 1,36 kilowatt par mètre carré, le facteur de concentration sera au plus d'environ 46000.

Sur le plan théorique, ces considérations sont liées à un principe optique qui met en jeu l'«étendue du faisceau».

L'ÉTENDUE D'UN PINCEAU LUMINEUX

Pour le faisceau issu d'une source très petite, cette grandeur est le produit de l'aire de la source par l'ouverture angulaire dans l'espace des rayons lumineux qui atteignent la surface réceptrice. Le >



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

► 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

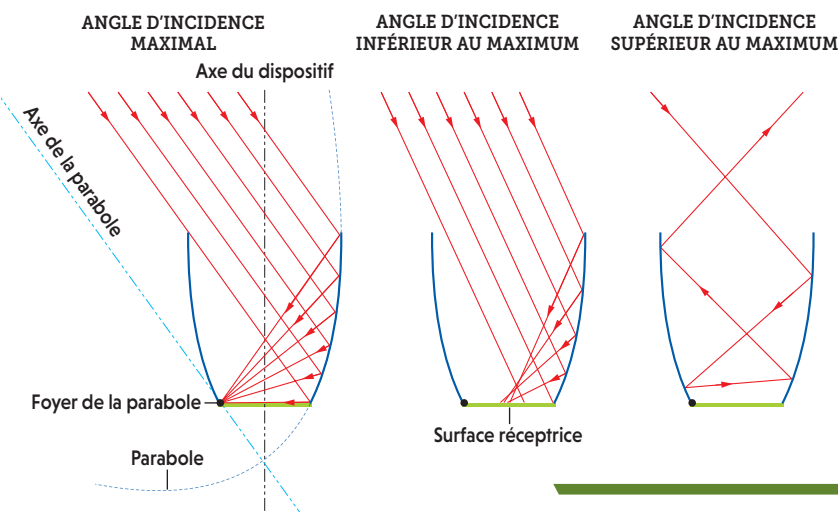
Il est possible de construire un collecteur qui tend vers cet optimum à l'aide de deux miroirs et en utilisant le «principe des rayons extrêmes». Prenons les rayons arrivant de gauche avec l'inclinaison maximale: on les focalise à l'extrémité gauche du récepteur grâce à un miroir parabolique dont le foyer coïncide avec cette extrémité (voir la figure ci-dessous). 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.