

> 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

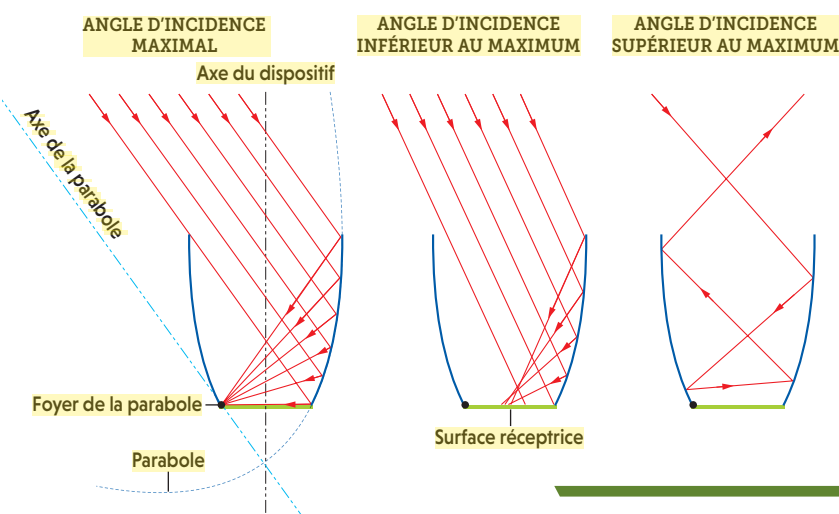
Il est possible de construire un collecteur qui tend vers cet optimum à l'aide de deux miroirs et en utilisant le «principe des rayons extrêmes». Prenons les rayons arrivant de gauche avec l'inclinaison maximale: on les focalise à l'extrémité gauche du récepteur grâce à un miroir parabolique dont le 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») sont appelés 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.