



Concentration de la lumière solaire

Pourquoi concentrer la lumière solaire ?

Dans de nombreux cas, nous souhaitons utiliser le soleil comme source de chaleur (voir « [Considérations théoriques énergie solaire thermique](#) »). Un objet noir exposé au soleil devient chaud, mais pas suffisamment pour certaines applications. Afin d'augmenter la chaleur produite, nous pouvons « concentrer » la lumière solaire incidente à l'aide de lentilles ou de miroirs.

Même sans concentration de la lumière, par exemple les capteurs solaires chauffent l'eau à 60 °C. C'est certes la température maximale que devrait atteindre l'eau chaude du robinet, mais elle ne suffit pas pour cuisiner. C'est pourquoi de nombreux cuiseurs solaires sont équipés d'éléments réfléchissants concentrants.

Même les grandes centrales solaires thermiques destinées à la production d'électricité ne fonctionnent qu'à des températures supérieures à 100 °C, car elles transforment d'abord l'eau en vapeur (c'est-à-dire qu'elles « font bouillir » l'eau) afin d'alimenter une turbine avec cette vapeur. Pour des raisons physiques, plus haute sont les températures avec lesquelles fonctionne une telle centrale, plus elle est efficace.

Dans la pratique, on trouve de nombreux concentrateurs de lumière solaire dans les cuiseurs solaires (voir « [Considérations théoriques cuisiner et sécher avec le soleil](#) ») et les centrales solaires thermiques.

Qu'est-ce que le facteur de concentration ?

Le facteur de concentration est le rapport entre la surface qui capte et redirige les rayons solaires et la surface sur laquelle la lumière est concentrée.¹ Si, par exemple, le miroir d'un cuiseur solaire a une surface de captation de 1 m² et que toute la lumière captée est concentrée sur une casserole d'une surface noire de 0,1 m², ce cuiseur atteint un facteur de concentration de $1 / 0,1 = 10$.

Qu'est-ce que le point focal?

En théorie, il y a des formes de miroirs qui concentrent toute la lumière en un seul point (infiniment petit). Ce point est appelé « foyer » ou « point focal ». D'autres géométries concentrent la lumière sur une ligne, on parle alors de « ligne focale ».

En réalité, il est impossible d'obtenir une concentration parfaite. La lumière est concentrée sur une surface donnée. Il est donc plus judicieux de parler d'une surface focale. Dans le cas des cuiseurs solaires, il ne serait pas judicieux de concentrer la lumière sur un point très petit. Nous ne ferions que

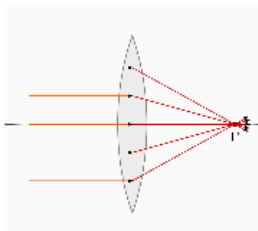
¹ Attention : toutes les surfaces sont mesurées perpendiculairement aux rayons du soleil, c'est-à-dire que seule la surface « exposée » au soleil est prise en compte.

brûler un trou dans la casserole ! Pour éviter de brûler les aliments, nous préférons concentrer la lumière sur la plus grande partie de la surface de la casserole possible.

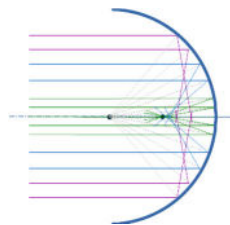
Lentilles ou miroirs ?

Pour concentrer la lumière, nous devons « dévier » les rayons lumineux individuels afin que le plus grand nombre possible tombe sur la même surface. Les lentilles et les miroirs remplissent tous les deux cette fonction de déviation des rayons lumineux. Avec une lentille, le point où les rayons convergent se trouve toujours *derrière* la lentille (vu depuis la source lumineuse) – les lentilles fonctionnent en « transmission ». Avec les miroirs, les rayons sont généralement concentrés *devant* le miroir – les miroirs fonctionnent en « réflexion ».

Pour des raisons de poids et de coût, la technologie solaire utilise presque exclusivement des miroirs (métalliques). Dans la suite du texte, nous examinerons donc cette possibilité plus en détail.



Une lentille : la lumière vient de la gauche, le point focal se trouve *derrière* la lentille.



Un miroir courbé : la lumière vient de la gauche, le point focal se trouve *devant* le miroir.

Formes de réflecteurs

Remarque préliminaire : pour simplifier la présentation des formes de réflecteurs, nous considérons que la forme du miroir est parfaite, même si nous savons que cela n'est possible qu'en théorie. Nous parlons donc de point focal et de ligne focale.

2D ou 3D ?

Lorsque nous plions une tôle miroir plate, nous obtenons une focalisation de la lumière dans *une* direction, mais pas dans la direction perpendiculaire à celle-là. Nous obtenons ainsi la concentration de la lumière d'une surface sur une ligne, mais pas sur un point. Dans ce cas, on parle de focalisation bidimensionnelle.

Si la tôle est déformée de manière à focaliser la lumière dans toutes les directions (« forme de soupière »), nous pouvons alors concentrer la lumière en un point. C'est ce que nous appelons la focalisation tridimensionnelle. Il n'est pas possible de donner cette forme à une tôle à la main, mais cela devrait être possible à l'aide d'une presse mécanique puissante.

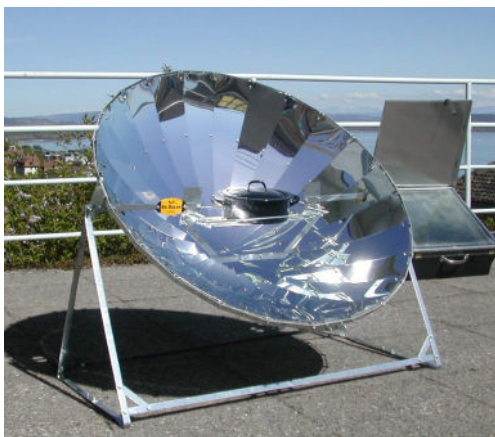
La focalisation 3D nous permet de concentrer la lumière plus fortement que la focalisation 2D. Les réflecteurs fabriqués à la main pour les cuiseurs solaires atteignent généralement des facteurs de

concentration allant jusqu'à 10, tandis que les formes 3D permettent d'obtenir une concentration jusqu'à un facteur 40.²

Miroirs plats ou courbés ?

Si nous souhaitons utiliser des miroirs *en verre*, en raison de leur fabrication ceux-ci sont presque toujours plats et ne peuvent être déformés que très légèrement (avant de se briser). C'est pourquoi nous allons essayer de créer une forme qui se rapproche de la forme souhaitée pour le réflecteur à partir d'éléments de miroir plats individuels. Un point focal n'est donc plus possible, même en théorie, comme la surface focale possible va être au moins aussi grande que le point lumineux de chaque élément de miroir individuel.

Pour simplifier la fabrication, de nombreux réflecteurs utilisent des éléments de tôle réfléchissants allongés, courbés dans une direction. À partir d'une multitude de ces éléments réfléchissants 2D, une forme 3D plus grande est imitée. Dans ce cas, la *largeur* de chaque tôle réfléchissante détermine la taille minimale de la surface focale.



Ce four solaire de type SK 10 est composé de 24 tôles réfléchissantes courbées dans une seule direction, qui, ensemble, s'approchent à une forme parabolique.

Présentation des formes de réflecteurs les plus importantes

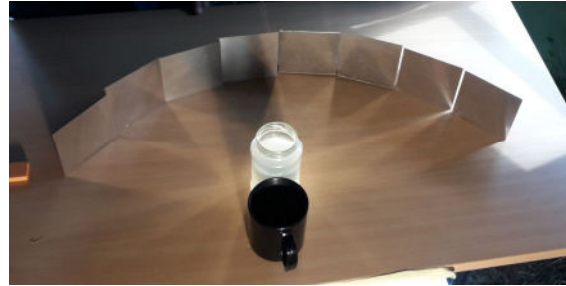
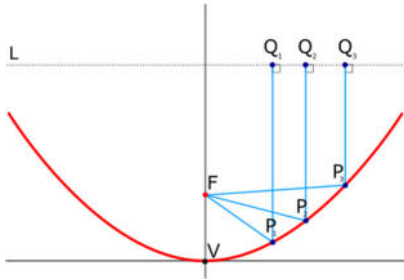
Nous vous présentons ci-dessous quelques formes de réflecteurs. L' « **expérience concentration de la lumière à l'aide de miroirs** » permet d'essayer ces formes, tandis qu'avec l' « **expérience fléchettes solaires** » on peut apprendre comment la concentration de points lumineux augmente fortement la température dans la zone focale.

² Il ne s'agit pas de calculs, mais de valeurs pratiques qui prouvent les différences d'efficacité entre les différents types de construction.

Miroir parabolique

La parabole est la forme qui permet de concentrer des rayons lumineux parallèles en un seul point.³

Un miroir tridimensionnel de cette forme (« forme de soupière ») est généralement appelé « miroir parabolique ». Dans les cuiseurs solaires, cette forme permet d'atteindre des températures élevées. De plus, la forme ronde de la surface focale est bien adaptée à la forme d'une casserole.



Un miroir en forme de parabole réfléchit tous les rayons lumineux incidents parallèles (Q) vers un point « expérience concentration de la lumière à l'aide de miroirs ».

Collecteurs cylindro-paraboliques

Un réflecteur cylindro-parabolique utilise une forme parabolique bidimensionnelle, par exemple une tôle réfléchissante courbée. Le foyer se trouve sur une ligne. Dans la pratique, la lumière est concentrée sur un tube noir. Le réflecteur et le tube peuvent être très longs, afin de réduire les pertes aux extrémités.

Cette forme est très courante dans les centrales solaires, car elle est techniquement plus facile à réaliser qu'une forme tridimensionnelle, en particulier dans les dimensions requises pour une centrale électrique.⁴ Afin d'augmenter le rendement, le tube absorbeur des centrales électriques est doté d'une surface dite sélective et isolé par un tube en verre de quartz.

Pour les cuiseurs solaires, la forme cylindro-parabolique a longtemps été peu appréciée, car la casserole doit avoir une forme allongée, ce qui est très inhabituel (et peu pratique pour la cuisson). Depuis l'apparition sur le marché de tubes en verre isolés sous vide (très efficaces), spécialement conçus pour les cuiseurs (ils ont un diamètre plus large et sont beaucoup plus courts que les tubes utilisés pour les capteurs solaires thermiques), on trouve également dans le commerce des cuiseurs solaires en cette forme (« cuiseurs à tube sous vide »). Ils sont particulièrement adaptés à la cuisson des saucisses et des baguettes :-).

³ Géométriquement, elle est décrite par la formule $y = a \cdot x^2$. La longueur focale, c'est-à-dire la longueur entre le centre du miroir et le point focal, est alors $1/(4 \cdot a)$.

⁴ Un exemple : chacun des 205 000 réflecteurs de la centrale solaire d'Andasol-3 en Espagne a une superficie de 12 m x 8 m.



Un collecteur cylindro-parabolique d'une centrale solaire.

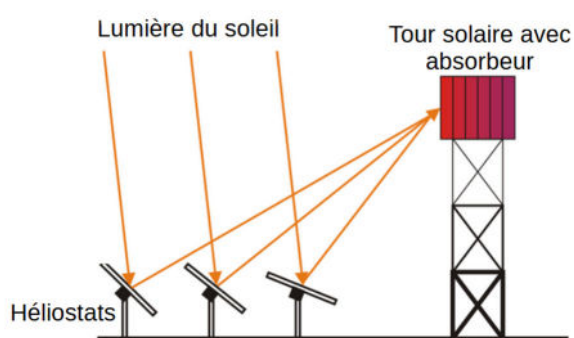


Un cuiseur à tube sous vide.

Champs d'héliostats

Les héliostats sont des réflecteurs plats individuels montés sur un support et orientés (constamment) de manière à ce que la lumière réfléchiée soit dirigée vers le foyer souhaité. Dans l'« [expérience fléchettes solaires](#) », les miroirs des participants correspondent à un groupe d'héliostats.

Un groupe d'héliostats n'imité pas une géométrie plus grande (par exemple une parabole), mais peut être installé presque aléatoirement. Cela est pratique pour les très grandes installations (centrales solaires à concentration) dans lesquelles les miroirs individuels sont tous montés sur le sol au lieu d'une immense parabole s'élevant dans les airs. Le point focal se trouve sur une tour et ne bouge pas. Chaque élément réfléchissant est ajusté et déplacé de manière à ce que sa lumière tombe toujours sur ce foyer.



Esquisse d'un champ d'héliostats.



Jeu « fléchettes solaires » à la Fête Folk Scoute 2023 : les miroirs ont été placés au sol comme dans une centrale électrique et la lumière du soleil a été concentrée en un point focal (le capteur de température du thermomètre).

Cas particulier lumière solaire

Dans la technologie solaire, nous utilisons des géométries qui sont également utilisées par des appareils tels que les projecteurs. Par rapport à ces applications (avec une source de lumière artificielle), le soleil présente certaines caractéristiques particulières (les « [Considérations théoriques lumière](#) » fournissent de plus amples informations à ce sujet).

Presque comme un laser

Le soleil est une source lumineuse extrêmement éloignée. C'est pourquoi ses rayons (directs) arrivent presque parallèlement à la terre. À cet égard, les rayons solaires sont presque comme la lumière laser !

Cette propriété de la lumière solaire facilite le calcul des formes de réflecteurs. Une source lumineuse (ampoule à incandescence ou LED), par contre, rayonne dans différentes directions ; pour concentrer sa lumière, on a besoin des formes de réflecteurs différentes de celles utilisées pour la lumière solaire.

Lumière directe et diffuse

La lumière solaire arrive à la surface de la terre sous deux formes : rayonnement direct et rayonnement diffus. Le rayonnement diffus provient des nuages répartis dans tout le ciel, ce qui signifie qu'il arrive à nos cuiseurs et réflecteurs solaires sous différents angles.

Toutes les géométries et trajectoires des rayons décrites ci-dessus (lignes dans nos graphiques) se réfèrent à la lumière solaire directe ! La lumière diffuse arrive aux miroirs sous un angle différent et c'est très probable qu'elle soit déviée et ne frappe pas la casserole ou le tube focal. En d'autres mots : seulement la lumière solaire directe peut être concentrée !

En Suisse, la lumière solaire arrive en moyenne de l'année plus ou moins pour moitié directement et pour moitié indirectement. Lors d'une journée d'été ensoleillée, cela peut représenter plus de 90 % de lumière directe, tandis que lors d'une journée nuageuse, près de 100 % de la lumière est diffuse. C'est (entre autres) pour cette raison que nous ne pouvons cuisiner avec nos miroirs paraboliques que lors des journées ensoleillées (ceux-ci ne peuvent exploiter que la lumière directe), tandis que les panneaux solaires produisent de l'électricité pendant toute l'année – car ils peuvent également exploiter la lumière diffuse.

Pour les mêmes raisons, les centrales solaires équipées de capteurs cylindro-paraboliques sont presque exclusivement construites dans les zones désertiques. En Suisse, les panneaux solaires photovoltaïques sont beaucoup plus efficaces.

« Suivre » le soleil

Un inconvénient évident du soleil est qu'il « se déplace dans le ciel »⁵. C'est pourquoi nous devons sans cesse réorienter nos dispositifs solaires (concentrateurs) ou les tourner pour qu'ils restent orientés

⁵ Bien sûr, nous savons qu'il ne s'agit là que d'un mouvement apparent. En réalité, c'est la terre qui tourne.

vers le soleil. Plus fortement un réflecteur solaire concentre les rayons, plus fréquemment nous devons effectuer ce mouvement de correction.⁶

La trajectoire apparente du soleil dans le ciel comporte une partie (l'azimut) qui se déplace toute la journée dans la même direction : dans l'hémisphère nord, nous voyons cela comme un mouvement « de gauche à droite ». Une autre partie (l'altitude) se déplace vers le haut le matin et vers le bas l'après-midi.

Pour compenser ces deux mouvements, un réflecteur solaire *tridimensionnel* doit être tourné sur deux axes. Dans la version automatique, cela nécessite deux moteurs.⁷ Par contre, les longues capteurs cylindro-paraboliques ne nécessitent qu'un seul axe de suivi (= un seul moteur).

⁶ Avec les cuiseurs paraboliques manuels, comme par exemple le modèle SK 14, il suffit de réajuster toutes les demi-heures. Les cuiseurs Scheffler, qui concentrent beaucoup plus les rayons, disposent d'un système de réajustement automatique, car sinon, il faudrait les réajuster toutes les quelques minutes.

⁷ Seul un dispositif de rotation très spécifique peut accomplir cette tâche avec un seul moteur. Pour cela, l'axe de rotation de l'ensemble du réflecteur doit correspondre à l'orientation de l'axe terrestre. Un « réflecteur Scheffler » utilise précisément ce dispositif.