

Défense et illustration du capteur tronconique

par V. DELARUE,
(Retraité, Paris).

RESUME.

Parmi les concentrateurs d'énergie solaire, les lentilles, miroirs concaves sphériques, paraboliques, cylindro-paraboliques... sont souvent décrits et utilisés. De réalisation pourtant facile et peu coûteuse, le miroir tronconique de révolution ne semble pas avoir été décrit et utilisé comme il paraît le mériter.

PRESENTATION GENERALE.

L'article récent, très complet de MM. M. SCHWARTZ et R. LOUAT (B.U.P. n° 645, page 1035, « Energie solaire et optique géométrique ») mentionne les troncs de cône de révolution, pages 1053-1054. On s'y reportera avec grand profit.

Le présent article se limite au cas très particulier du tronc de cône de révolution de demi-angle au sommet 45° , qui renvoie donc des rayons incidents parallèles à son axe vers cet axe, autour duquel sera disposée la structure à chauffer (fig. 1).

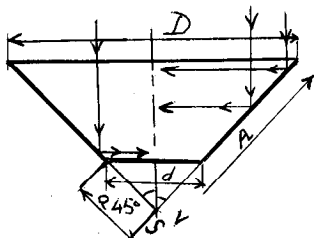


Fig. 1

Les avantages de ce capteur sont les suivants :

- Réalisation facile et peu coûteuse par des élèves, même jeunes, ou par toute personne désirant capter l'énergie solaire pour usage local ;
- Le cône étant une surface développable, réalisation à partir d'une feuille plane qu'on roule ou déroule, convenant donc à des capteurs transportables ;

- Zone de concentration située à l'INTÉRIEUR du tronc de cône, ce qui évite pratiquement le danger d'incendie de substances sèches, danger non négligeable avec les lentilles et les miroirs à zone focale extérieure ;
- Grande variété de « récipients chauffés au solaire » pouvant être disposés autour de la « focale chaude » du capteur en vue des usages suivants : chauffage de l'eau et son ébullition (étant donnée la concentration réalisée), cuissons à l'eau, stérilisation d'instruments médicaux dans la brousse, obtention d'eau potable en montagne à partir de neige propre, obtention d'eau potable par distillation à partir d'eau de mer ou d'eau saumâtre ou polluée, distillation fractionnée solaire en ajoutant une colonne à distiller au-dessus du réservoir chauffé, stockage de courte durée (le soir ou la nuit suivante) de « chaleur solaire » avec des produits à chaleur latente... et, pourquoi pas, moteur thermique solaire (de faible rendement, mais la source chaude n'est pas coûteuse). Quant à la cuisson « à sec » (grillage de saucisses), elle est réalisable sans complication.

Bien entendu, le stockage de l'eau chaude préparée au soleil s'impose si on ne l'utilise que le soir ou le lendemain (bouteilles isolantes ou réservoirs isolants).

La puissance collectée n'est pas négligeable par soleil clair dispensant environ $p_1 = 1$ kW par m^2 : elle est d'autant plus grande que le miroir tronconique est plus grand. Avec les nota-

tions de la fig. 1, elle est de l'ordre de $P = p_1 \times \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4}$

soit quelques centaines de watts pour un capteur de dimensions modestes.

REALISATION MATERIELLE DU MIROIR.

Son développement est facile à faire retrouver par des élèves ayant quelques notions de géométrie. Pour une grande base de diamètre D , le cône complet aurait un apothème $A = D/\sqrt{2}$ et le développement serait un secteur de cercle de rayon A et d'angle Ω tel que $A \cdot \Omega = \pi D$ soit $\Omega = \pi\sqrt{2}$ radian ou 254,6 degrés ; on peut encore parler du cercle complet de rayon A amputé du secteur d'angle $\alpha = 105,4$ degrés (fig. 2).

Mais pour le chevauchement (ou l'onglet de collage éventuel) permettant la fermeture du développement, il convient d'augmenter un peu l'angle du secteur, en prenant, par exemple $\Omega' = 260^\circ$ (donc $\alpha' = 100^\circ$) ou $\Omega' = 265^\circ$ (donc $\alpha' = 95^\circ$). Si, compte tenu du diamètre des récipients qu'on prévoit de chauffer (et du

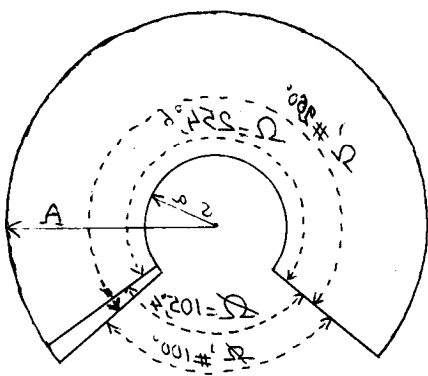


Fig. 2

manchon transparent dont il sera question plus bas), le diamètre de la petite base du tronc de cône est d , on tracera, sur le développement, et avant tout découpage : le grand arc de cercle de rayon A ; le petit arc de cercle de rayon $a = d \sqrt{2}$ concentrique au précédent ; et les trois demi-droites issues du centre commun et faisant entre elles l'angle α' de 95° ou 100° , ainsi que l'angle précis de $\alpha' = 105.4$ (qui commande l'angle au sommet du tronc de cône). Voir la fig. 2. Afin de profiter au mieux du matériau acheté, souvent vendu en rouleau de largeur l , on tracera ce qui précède comme indiqué sur la fig. 3. On constate que c'est souvent la largeur l qui imposera la valeur de l'apothème A , donc le diamètre D de la grande base du miroir : on a, en effet, $A = l / 1 + \cos \frac{\alpha'}{2}$, soit $l/1,642$ si l'on a pris $\alpha' = 100^\circ$ et $l/1,675$ si l'on a pris $\alpha' = 95^\circ$.

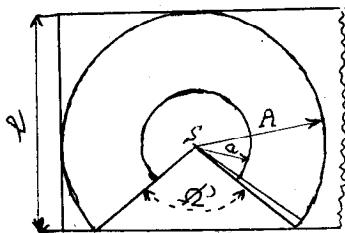


Fig. 3

Jusqu'à présent, j'ai utilisé, pour confectionner le capteur, un tronc de cône extérieur protecteur en papier à dessin épais

ou en « cofraline », espèce de feuille plastique transparente (qui se déforme moins à l'eau que le papier à dessin) et le cône intérieur (le miroir) en « lumaline », feuille d'aluminium fine et très réfléchissante, protégée par une pellicule plastique incolore très fine d'un côté, par une « peau de banane » colorée de l'autre. Cette « lumaline » est vendue pour y découper des ornements scintillants pour Noël. Mais d'autres surfaces réfléchissantes sont concevables, que chacun choisira selon les ressources de sa région. Pour illustrer numériquement l'alinéa précédent, admettons que le tronc de cône extérieur soit fait avec du papier à dessin (lavis B épais) dont une feuille commerciale a pour dimensions $104,5 \times 74,5$ en cm. l vaut 74,5 cm. Pour $\varphi' = 100^\circ$, on pourra faire $A = 74,5/1,642$ soit 45,3 cm. 2 A vaut 90,6 cm. D vaudra $A\sqrt{2} = 64$ cm. En adoptant, par exemple, $d = 12$ cm, la surface utile recevant les rayons solaires sera de $0,32 \text{ m}^2$, ce qui donnera une puissance de l'ordre de 300 watts. Il faudra environ un quart d'heure pour faire passer 500 g de neige à -5°C à l'état d'eau à $+10^\circ\text{C}$. Il faudra un quart d'heure de plus pour porter l'eau à l'ébullition.

Le manchon transparent protégeant le récipient chauffé des courants d'air et assurant l'effet de serre peut être réalisé très simplement avec un rectangle de cofraline (ou autre feuille plastique transparente d'épaisseur 0,2 ou 0,3 mm, si possible peu électrisable, afin d'éviter l'attraction des poussières) constituant le développement latéral du cylindre. Il faut prévoir ses dimensions compte tenu de celles des récipients chauffés, en veillant à laisser un écart d'environ 1,5 cm entre les parois chaudes et le manchon. On prévoit un chevauchement de 2 ou 3 cm pour fermer le cylindre. Le collage n'est pas recommandé, car, à l'expérience, il chauffe et produit une déformation locale, voire la fusion de la feuille plastique; le plus simple est un agrafage sur le chevauchement à l'aide de « trombones », en haut et en bas. Un avantage non négligeable de cette technique artisanale est le démontage facile du manchon, qui se met à plat pour le transport ou le rangement, alors qu'un manchon de ce type, à parois fines, n'est pas commode à transporter sans écrasement. Un cylindre en altuglass donnerait sans doute un très bon effet de serre, mais je n'ai pas eu l'occasion de l'expérimenter. Une bouteille d'eau minérale en matière plastique n'est pas un bon manchon : elle fond souvent quand le récipient central est bien chaud !

La partie supérieure du manchon est avantageusement un couvercle plat (du genre couvercle plat de boîte de confiserie bon marché) qu'on peut confectionner avec la même feuille transparente que pour le manchon latéral et qui vient coiffer ce dernier (fig. 4). Du ruban adhésif transparent suffit pour relier le fond circulaire de ce couvercle avec sa partie cylindrique dont la hauteur est de 2,5 à 3 cm; mais ce collage, par petits bouts de

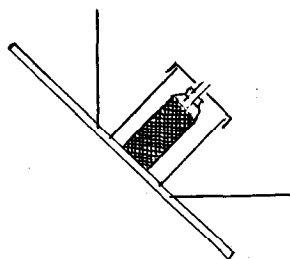


Fig. 4

ruban adhésif se chauvauchant, ne doit pas laisser passer l'air chaud sous peine d'effet de tirage. Presque toujours, le centre du couvercle doit être percé d'un trou circulaire, de 8 mm de diamètre par exemple, laissant sortir un bout de tube de verre « de sécurité et de renseignement » qui permet la sortie de la vapeur et, si besoin en est, le passage d'un thermomètre (fig. 4). Dans le cas du simple chauffage d'eau, on sait que l'eau est franchement chaude lorsque des gouttes assez abondantes de vapeur d'eau condensée se déposent à la sortie de ce tube de verre.

Pour les usages où la sortie de la vapeur se fait par le bas (fig. 5), un simple bocal en verre blanc (bocal de stérilisation

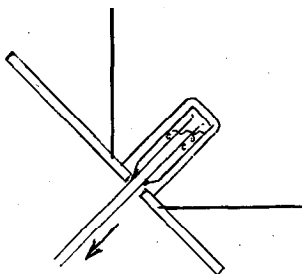


Fig. 5

de légumes, pot de 200 g de café ou chicorée soluble...) qui vient coiffer la chaudière, assure un effet de serre remarquable.

Tous ces accessoires sont longs à décrire, mais faciles à réaliser ; un modèle transportable de capteur tronconique, avec ses divers accessoires, a été présenté à Clermont-Ferrand, aux Journées Nationales de l'U.d.P., en octobre 1983, au stand de l'A.N.S.T.J. (à côté de nombreux autres appareils réalisés par les membres de l'A.N.S.T.J.).

Quant aux récipients chauffés, ils peuvent être variés, souvent récupérés. La bonne conductibilité de l'aluminium le fait recommander. Ainsi, des « bombes d'aérosols » démontées avec soin (en récupérant les joints, tubes capillaires... pouvant toujours servir), d'autres bidons cylindriques divers. Des flacons en aluminium vernis intérieurement (chauffage de l'eau), des boîtes cylindriques en aluminium vernies intérieurement, avec leur couvercle (fusion de la neige) peuvent se trouver à l'unité dans la région parisienne chez « C.D.P.-emballage, 20, avenue Roger-Salengro - 77270 Villeparisis - Tél. : (6) 427-64-83 », par exemple, au prix unitaire de 15 à 20 F. Tous ces récipients seront peints en noir sur les parties insolées. Pour les saisir sans se brûler, ou bien on prend des gants de cuisine, ou bien on prévoit, sur le goulot s'il s'agit d'un flacon, de plusieurs tours de grosse laine, ou de grosse ficelle de chanvre, ou une sangle avec une boucle pour la manœuvre.

ETUDE THEORIQUE DE L'INFLUENCE DE L'ANGLE DES RAYONS LUMINEUX AVEC L'AXE DU MIROIR.

Pour une source ponctuelle à l'infini dans la direction de l'axe du miroir (supposé sans défauts locaux), tout récipient entourant l'axe est rencontré par tous les rayons réfléchis. Mais

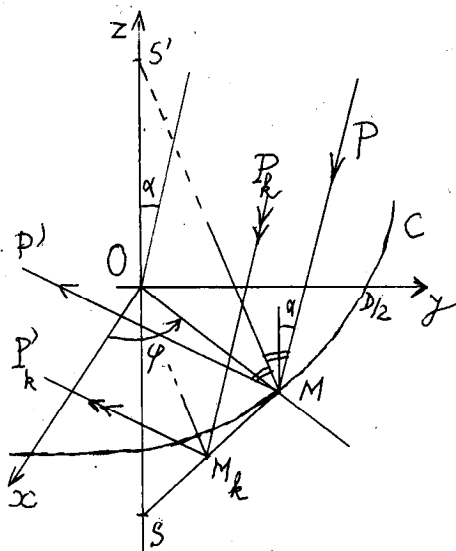


Fig. 6

- 1° le Soleil n'est pas ponctuel, pouvant être assimilé à une infinité de sources ponctuelles s'écartant au plus de 16 minutes d'angle autour de l'axe ;
- 2° sauf si le miroir et le récipient « suivent » le Soleil grâce à un mécanisme convenable, il faut examiner quelle est l'influence du mouvement diurne du Soleil sur le fonctionnement de l'appareil (tous les rayons réfléchis pouvant ne plus rencontrer le récipient chauffé).

Soit Oz (fig. 6) l'axe du capteur, orienté vers le centre du Soleil, et $R = D/2$ le rayon du cercle C , contour de sa grande base dans le plan xOy . Si le cône allait jusqu'à son sommet S , ce point aurait pour coordonnées $(0, 0, -R)$. Soit M (Ox , $OM = \varphi$) le point courant de C et PM un rayon incident faisant l'angle α avec Oz ; le réfléchi MP s'obtient en prenant le symétrique de MP par rapport à la normale en M au miroir ; cette normale est MS' , si S' est le symétrique de S par rapport à O (ceci à cause du demi-angle du cône valant 45°). Mais une homothétie de la figure, de sommet S , et de rapport $k < 1$ transforme PM en un rayon parallèle $P_k M_k$, la surface du cône en elle-même, et le réfléchi MP en $M_k P'_k$. En faisant varier k , je décrirai tout le faisceau plat de rayons incidents parallèles à PM et rencontrant le miroir selon la génératrice MS ; et aussi tout le faisceau plat réfléchi correspondant parallèle à MP' . En laissant α constant, et en faisant varier φ de 0 à 2π je décrirai tout le faisceau incident parallèle à PM rencontrant la totalité du miroir tronconique (α reste assez petit pour éviter des ombres parasites).

Ce qui m'intéresse est de savoir si les réfléchis rencontrent le récipient chauffé, coaxial au cône et de rayon connu. Si le réfléchi MP' passe à une distance minimale δ de l'axe Oz (longueur de la perpendiculaire commune), le réfléchi $M_k P'_k$ passe à $k\delta$ de l'axe ; puisque $k < 1$, $M_k P'_k$ rencontrera le récipient si MP' le rencontre. En réalité, pour les réfléchis passant près du haut ou du bas du récipient, il peut y avoir quelques pertes par passage par-dessus le récipient, ou par rencontre du sol en bas. Mais nous ne tiendrons pas compte de ces « ratés aux limites », dépendant trop de la forme complète du récipient utilisé.

Il suffit donc de calculer δ pour le rayon courant PM . Ce calcul de géométrie analytique ou vectorielle est assez long et sans grand intérêt (il est simplifié par le fait que la perpendiculaire commune à Oz et MP' est parallèle au plan xOy et se projette en vraie grandeur). Nous donnons le résultat :

$$\delta = \frac{R \sin \alpha \cdot |\cos \varphi|}{\sqrt{1 - \sin^2 \alpha \cdot \sin^2 \varphi}}$$

DISCUSSION.

1. On retrouve que, pour $\alpha = 0$ (faisceau incident parallèle à l'axe), δ est nul pour tous les réfléchis : ils rencontrent tous Oz .

2. Pour $\alpha = 16$ minutes ou $46,5 \cdot 10^{-4}$ radian, δ est assimilable à $46,5 \cdot 10^{-4} R |\cos \varphi|$ qui est maximal pour $\varphi = 0$ ou π : avec $R = 30$ cm (prototype transportable), les rayons réfléchis passent *au plus* à 1,4 mm de l'axe : le fait que le Soleil ne soit pas ponctuel a peu de conséquence pour des récipients courants. Mais, d'un autre point de vue, on constate que des récipients (ou tubes) d'assez faible diamètre peuvent être utilisés, correspondant à une forte concentration et à une température élevée : c'est cela qui permet l'ébullition facile de l'eau pour des récipients assez maigres (diamètre 4 ou 5 cm). Il ne faut pas extrapoler à des récipients plus fins, car les défauts locaux du miroir deviendront alors prépondérants.

3. Occupons-nous maintenant du mouvement diurne du Soleil. Le calcul est très facile à l'équateur et à l'équinoxe, car alors le Soleil tourne de 15° par heure. Avec $\alpha = 15^\circ$, $\sin \alpha = 0,259$ et δ maximal est toujours atteint pour $\varphi = 0$ ou π et vaut $0,259 R$, soit, pour $R = 30$ cm, déjà 7,8 cm : il faut un récipient de quelque 16 cm de diamètre pour ne pas trop perdre de flux. Toutefois, ce ± 1 heure durant lequel l'appareil peut rester fixe sans trop perdre en rendement n'est pas minuscule : il suffit de venir voir l'appareil toutes les demi-heures, par exemple, et le pointer à nouveau vers le Soleil pour qu'il donne satisfaction.

Pour un lieu quelconque, un jour et une heure quelconques, on se reportera à l'article de M. SCHWARTZ et R. LOUAT, B.U.P. n° 645, pages 1063 à 1066. La conclusion subsiste : l'appareil tolère qu'on ne rectifie son pointé vers le Soleil que toutes les demi-heures par exemple. Comme il a été dit plus haut, un dispositif de suivi est facile à imaginer en cas de besoin.

Pour faciliter le pointé de l'appareil vers le Soleil, on peut, ou bien fixer sur la planche support un clou, une vis bien perpendiculaire à cette planche (en dehors de l'ombre portée par le cône !) : l'ombre du clou renseigne très vite sur le bon pointé. On constate qu'il est encore possible de regarder les « stries lumineuses » qui apparaissent sur les parois cylindriques du récipient chauffé (et qui sont dues à des défauts locaux du miroir) : lorsqu'elles sont bien réparties sur la surface cylindrique du récipient, le réglage est acceptable. On peut encore dessiner sur la planche de base l'ombre d'une partie du bord du miroir (ou du tronc de cône extérieur) lorsque le pointé est bon et amener cette ombre sur ce trait circulaire, ce qui se révèle le plus rapide et le moins pénible pour les yeux en cas de Soleil très vif (voir la fig. 7).

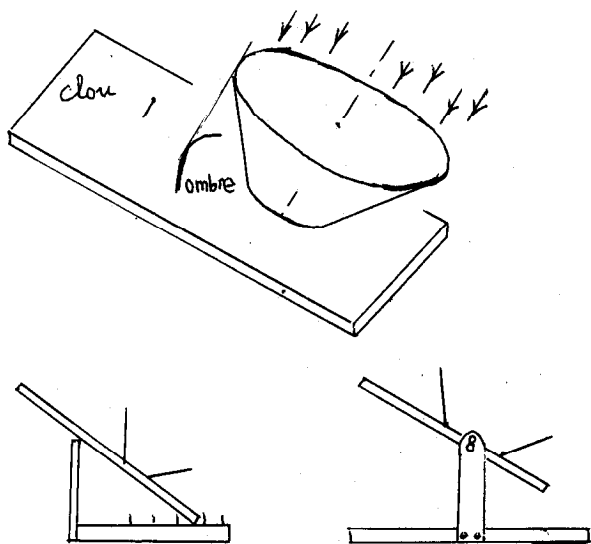


Fig. 7

REALISATION MATERIELLE DES SUPPORTS DE MIROIR ET RECIPIENTS.

Comme on arrive facilement à de l'eau très chaude, il faut un support suffisamment stable et assez lourd (afin de faire contre-poids sur les récipients et leur contenu). Ceci étant bien compris, l'imagination de chaque réalisateur trouvera facilement des solutions. L'appui de la planche-support contre un tronc d'arbre, contre un mur bien orienté vers midi peut suffire, s'il n'y a pas trop d'agitation autour (enfants jeunes, animaux, maladroits qui ne font pas attention...). On peut perfectionner le dispositif en appuyant la planche de base à une « équerre » stable d'aggloméré assez épais ou en prévoyant un support à deux barres verticales et des vis de pression avec écrous à oreilles pour orienter et maintenir la planche de base (fig. 7).

Quant à la mise en place des récipients eux-mêmes, le plus simple s'est révélé de les ceinturer à leur base par un collier « serflex » à serrage réglable (avec interposition de plusieurs épaisseurs de papier fort afin d'éviter l'écrasement et isoler thermiquement). Sur le « fermoir » du serflex, on fixe une boucle en fil de fer et c'est cette boucle qu'on accroche à un petit piton de la planche de base afin de tenir le récipient. Un cercle, dessiné sur cette dernière, permet un centrage rapide. Pour prévoir

l'usage éventuel d'une sortie de vapeur vers le bas (fig. 5), percer la planche de base en conséquence. Fermer avec un bouchon si la sortie basse n'est pas utilisée.

Quelques prix indicatifs (novembre 1982) :

Cofraline (grands magasins) en 59 cm de large : 16 F le m en 25/100 et 20 F le m en 30/100. Lumaline (Weber, 9, rue de Poitou - Paris-3^e - Tél. : 271-23-45, bien connu des personnels techniques de nos laboratoires de la région parisienne), en 60 cm de large : 32 F le m. Tubes en aluminium d'épaisseur 4/10, de 10 à 18 mm de diamètre : vers 6 à 10 F le m.

Bon courage ! Faites part de vos trouvailles et perfectionnements au B.U.P. ou au signataire : chacun doit avoir son idée à signaler. Merci !
