

INDUSTRIE SERVICE - imprimé en France - 115 000 / janvier 1975

CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE 

15, QUAI ANATOLE-FRANCE - 75700 PARIS - TEL. : 555.92.25 - TELEX 26 034

PRIX 6F

LE FOUR SOLAIRE D'ODEILLO 

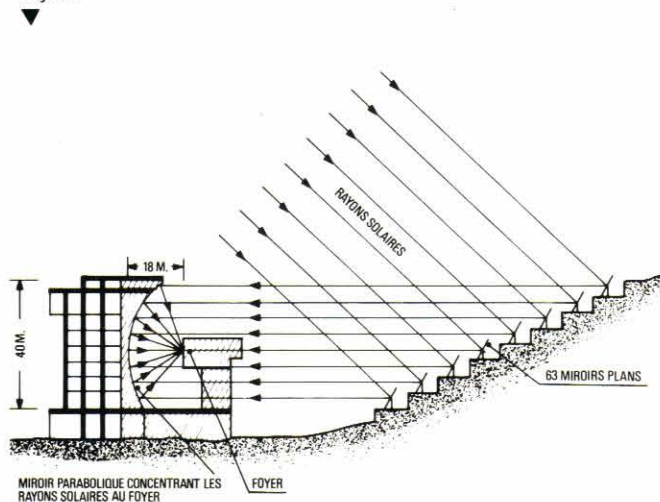
LE FOUR SOLAIRE D'ODEILLO

le grand miroir
parabolique.

Le paraboloïde fixe de 18 m
de distance focale mesure
40 m de hauteur et 54 m de
largeur. Son axe focal orienté
Nord-Sud est situé à 13 m
au-dessus du sol.



Le rayonnement solaire incident est réfléchi par 63 miroirs plans orienteurs, asservis au mouvement apparent du soleil. L'ensemble donne un faisceau unique, parallèle à l'axe du miroir parabolique qui reçoit alors le maximum d'énergie puis concentre le faisceau au foyer.



les 63 miroirs orienteurs

Les miroirs orienteurs, d'une surface de 45 m² chacun, sont étagés sur une série de terrasses et disposés en quinconce. Grâce à cette disposition, on obtient un recouvrement des miroirs, tant latéralement que dans le sens de la hauteur, ce qui évite les pénombres dans la nappe réfléchie vers le miroir parabolique. La division du système réflecteur plan en 63 éléments indépendants procure une grande souplesse d'utilisation puisqu'elle permet de programmer, à volonté, les apports énergétiques en mettant en fonctionnement une partie seulement ou la totalité des miroirs orienteurs. Il aurait été d'ailleurs impossible, avec de telles dimensions, d'utiliser un réflecteur unique. (Voir photo page 1).

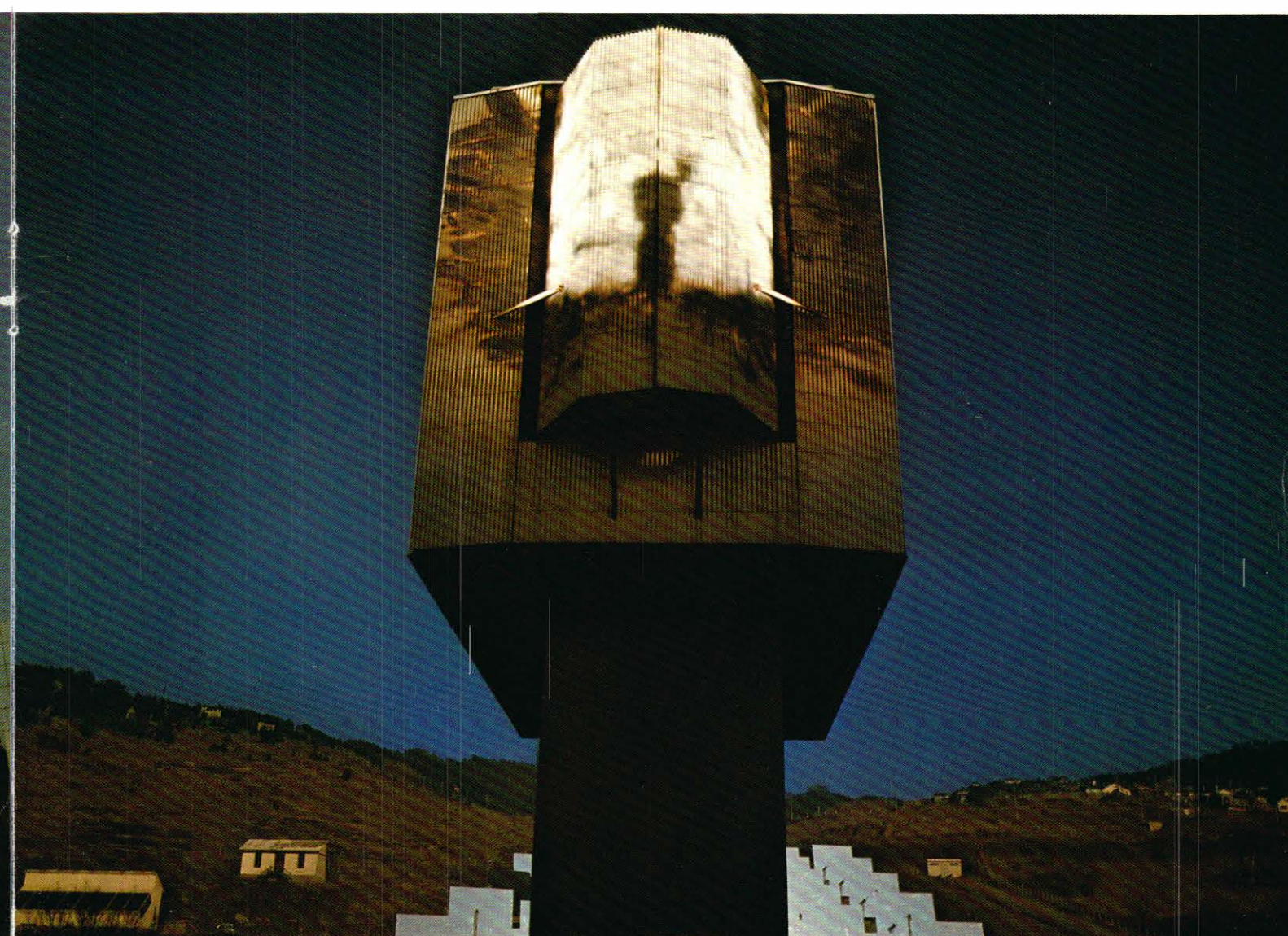
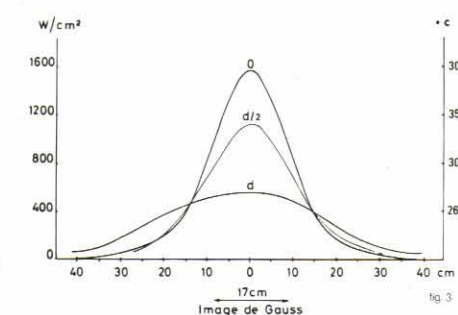
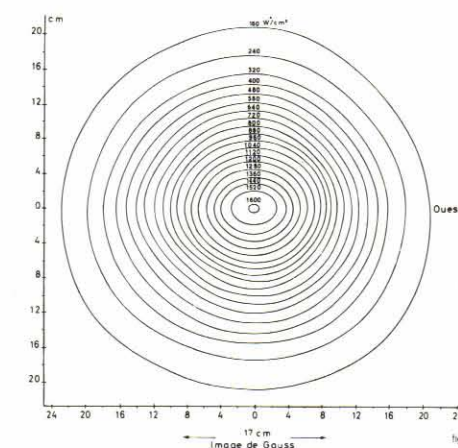
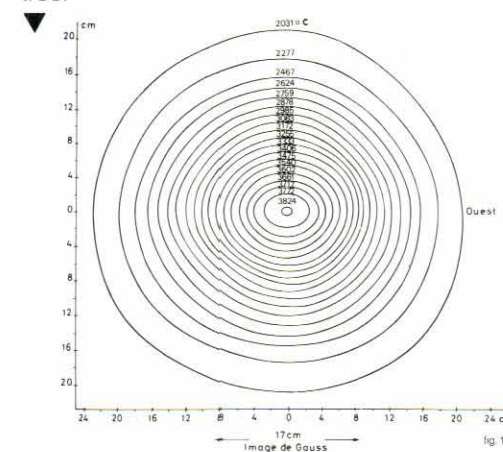
dispositif d'asservissement du miroir orienteur

Composé de 180 glaces planes, chaque miroir plan orienteur est asservi individuellement par un contrôle optique et électronique qui commande les deux mouvements de rotation (site et azimut) obtenus par des vérins hydrauliques. En régime de poursuite du soleil, le contrôle de la direction du rayonnement réfléchi est assuré à $\pm 1'$ d'arc près, grâce à une lunette précise à champ réduit surmontée d'une lunette chercheuse à grand champ ($\pm 40^\circ$).

la tour du foyer

Le foyer du système est situé dans une tour, à 18 m du miroir parabolique. Ce miroir, ayant une disposition dissymétrique et une ouverture relative assez grande, la tache focale obtenue, approximativement elliptique, est de l'ordre de 40 cm (Fig. 1 et 2). Elle serait de 17 cm pour un miroir parabolique de faible ouverture et de même distance focale (image de Gauss). L'éclairement dans la tâche focale est pratiquement uniforme à l'intérieur d'un cercle de 5 à 10 cm de diamètre. Pour les applications ne demandant que des densités de flux relativement faibles, par exemple 25 % du maximum, on dispose d'une plage étendue d'éclairement uniforme en arrière ou en avant du plan focal (coupe mettant en évidence la profondeur de champ : Fig. 3). Pour une densité solaire de

1000 W/m², on obtient au foyer une puissance thermique de 1000 kW. Celle-ci permet d'atteindre une température de 3800 °C dans une enceinte isotherme de très faible ouverture par rapport à sa dimension (corps noir). C'est dans la région focale que les divers dispositifs expérimentaux sont installés pour une utilisation optimale de l'énergie qui y est concentrée.



LES RECHERCHES AU FOUR SOLAIRE

Le four solaire de 1 000 kW est conçu pour un emploi diversifié et aussi complet que possible. Grâce à sa souplesse d'utilisation il permet aussi bien l'étude de matériaux à très hautes températures que toutes les recherches pilotes nécessaires à l'industrialisation des fours solaires simplifiés, des centrales thermo-solaires etc...

Les études sont effectuées :

- soit par le personnel propre du four solaire;
- soit sous forme d'études réalisées en commun avec divers organismes de recherches privés ou publics français ou étrangers abouissant à des publications, prises de brevets ou réalisations;
- soit sous forme de prestations contractuelles d'heures d'utilisation et d'assistance technique.

par ses caractéristiques...

- étendue du domaine focal

permettant d'effectuer des tests sur des échantillons de grandes dimensions (20 à 200 cm²) contrairement au laser dont le faisceau est très étroit; par ailleurs, il n'existe pas de laser de grande puissance fonctionnant d'une manière continue.

- espace important autour du foyer (18 m de champ)

- fort gradient de température permettant aux contenants de rester "froids" et sans apport d'éléments polluants. Est ainsi rendue possible l'étude de réactions dans des conditions de grande pureté chimique.

- rayonnement intervenant sans inertie sur les surfaces réceptrices.

- absence de champ électromagnétique autour de la substance à traiter favorisant en particulier des mesures de transmissions radioélectriques.

- possibilité de fractionner l'énergie et de programmer

les apports en n'utilisant qu'une partie des miroirs orienteurs.

... le four solaire de 1000 kW est un prototype polyvalent adapté à de nombreuses recherches.

- réactions à haute température. Les traitements à haute température sont souvent accompagnés d'effets de purification importants et on peut éliminer certaines impuretés par diverses méthodes (volatilisation, distillation, cristallisation). Dans le cas des oxydes réfractaires qui, pour la plupart, doivent être traités en milieu oxydant, l'application des méthodes précédentes de purification s'avère souvent difficile, mais le problème peut être résolu à l'aide de fours solaires.
- valorisation de matériaux

par fusion, coulée, mise en forme et traitement sous atmosphère contrôlée.

- intervention du rayonnement sur une surface sans contamination (préparation d'oxydes réfractaires de haute pureté, par exemple l'alumine, la magnésie, la chaux, l'oxyde de zirconium, l'oxyde de thorium).

- opérations avec mise en route et interruptions rapides (fabrication de substances pures ou à impuretés contrôlées, chauffages programmés, chocs thermiques).

- recherche de matériaux et de dispositifs utilisables pour la conversion de l'énergie solaire en énergie thermique et électrique.

- détermination des propriétés électriques de certaines céramiques à haute température.

- performances électriques à haute température de radômes hypersoniques (têtes de fusées).

- étude de matériaux soumis aux réactions nucléaires.

exemples de dispositifs originaux

l'obturateur.

Constitué par deux panneaux réfrigérés verticaux formant un dièdre d'angle égal à 80° dont l'arête est à 30 cm en avant du plan focal, cet appareil est destiné soit à occulter le rayonnement convergeant au foyer, soit à le moduler en signaux rectangulaires ou selon une loi de croissance et décroissance prédéterminée.

Cet obturateur supporte sans dommage les 1 000 kW qu'il doit intercepter et permet ainsi de soumettre les matériaux à des flux de rayon-

nement programmés. Dans le domaine des chocs thermiques, le four solaire est donc un instrument de travail extrêmement souple pour tester des matériaux usuels ou stratégiques (applications spatiales ou nucléaires). Une sorte de label de qualité peut leur être ainsi attribué à la suite, par exemple, d'essais de fatigue.

le four centrifuge.

Il est composé essentiellement d'une cuve cylindrique en aluminium de vitesse réglable, dont l'axe peut s'in-

cliner à l'horizontale. Un modèle de ce four permet de travailler en atmosphère contrôlée.

Utilisation du four : il traite les substances à haute température sans intervention d'une paroi de matière étrangère en opérant la fusion de poudres réfractaires. On obtient alors des pièces centrifuges, formant creuset, dont la cavité centrale, isotherme, se comporte comme un corps noir (l'orifice n'étant pas trop grand). L'extérieur du creuset ne s'échauffe pas et reste à l'état de poudre, jouant ainsi, un rôle calorifuge.

Ce dispositif permet donc :

- l'étude de produits réfractaires sans contamination puisqu'on les traite dans un auto-creuset, et en particulier l'obtention de monocristaux et d'oxydes réfractaires très purs.

- la fusion de produits métalliques conducteurs, directement dans le four constitué par l'ensemble du "creuset", de la poudre calorifuge et de la cuve centrifuge.

Le réfractaire est choisi non pour ses propriétés céramiques, mais en fonction de ses propriétés chimiques afin de l'adapter au métal à traiter.

PETIT HISTORIQUE DES FOURS SOLAIRES

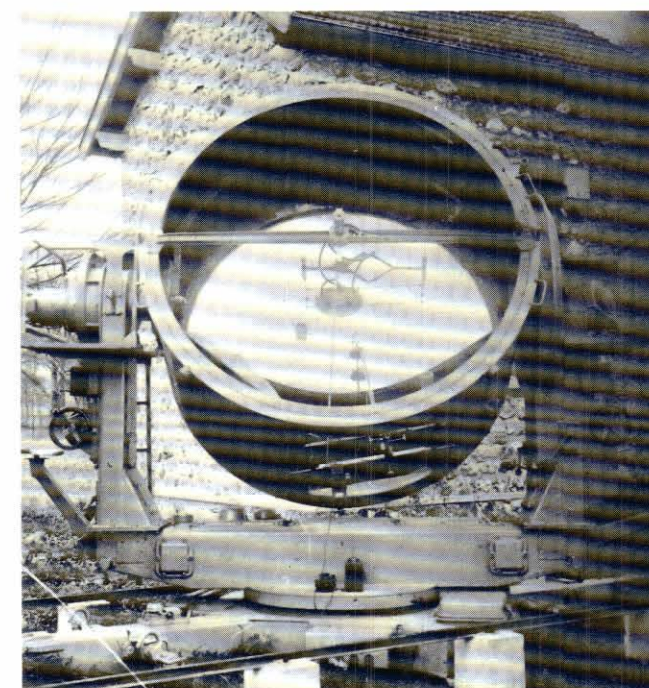
le four solaire de Lavoisier

Le premier, Lavoisier montre comment il est possible d'utiliser les rayons solaires pour produire des hautes températures. Sa machine, constituée de deux lentilles convergentes, dont la plus grande réalisée en remplissant d'esprit de vin l'espace compris entre deux surfaces courbes de verre, permettait de fondre du fer et même d'atteindre le seuil de fusion du platine. Il obtenait également, dans un ballon rempli d'azote, du graphite à partir du diamant.

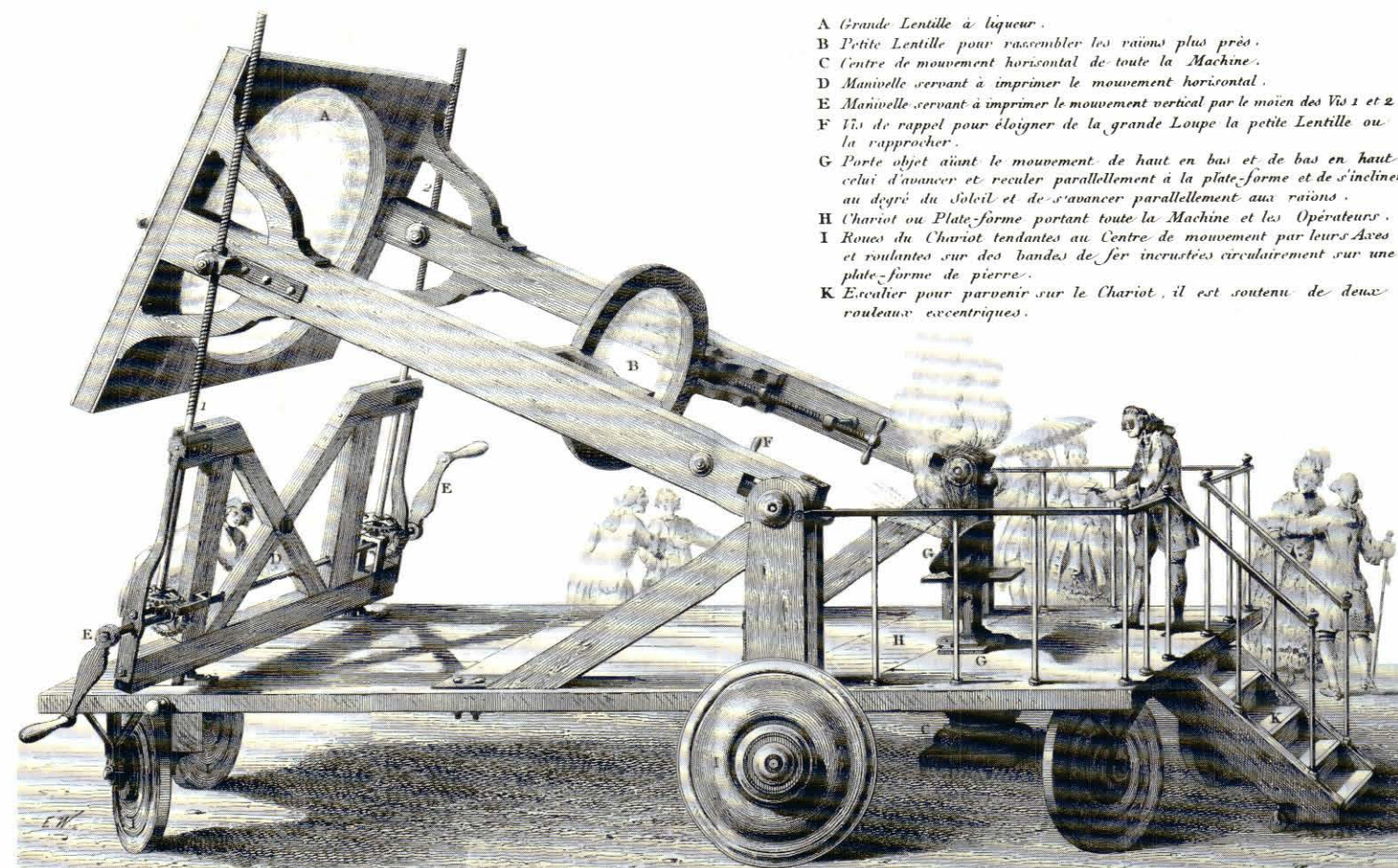
1946 ; à la suite de Lavoisier

1946 : sous l'impulsion de la société des hautes tempé-

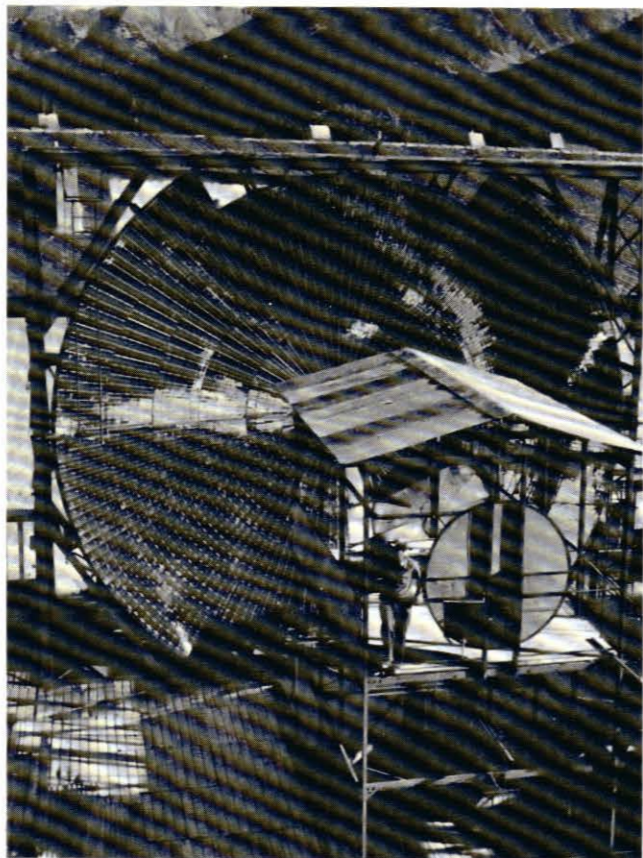
ratures, des chercheurs du C.N.R.S., à Meudon, suivent les traces de Lavoisier. Leurs travaux ont pour objet la mise au point d'un four solaire permettant de produire de très hautes températures afin d'obtenir la fusion et la volatilisation, dans l'air, en atmosphère conditionnée ou dans le vide, de substances les plus diverses dans des conditions d'extrême pureté.



Le four solaire de Meudon réalisé à partir d'un miroir de DCA monté sur son support permet de dépasser la température de 3 000 °C et d'effectuer de très nombreuses opérations à haute température. ▶



A Grande Lentille à liquer.
 B Petite Lentille pour rassembler les rayons plus près.
 C Centre de mouvement horizontal de toute la Machine.
 D Manivelle servant à imprimer le mouvement horizontal.
 E Manivelle servant à imprimer le mouvement vertical par le moyen des Vis 1 et 2.
 F Vis de rappel pour éloigner de la grande Loupe la petite Lentille ou la rapprocher.
 G Porte objet ayant le mouvement de haut en bas et de bas en haut, celui d'avancer et reculer parallèlement à la plate-forme et de s'incliner au degré du Soleil et de s'avancer parallèlement aux rayons.
 H Chariot ou Plate-forme portant toute la Machine et les Opérateurs.
 I Roues du Chariot tendantes au Centre de mouvement par leurs Axes et roulant sur des bandes de fer incurvées circulairement sur une plate-forme de pierre.
 K Escalier pour parvenir sur le Chariot, il est soutenu de deux rouleaux excentriques.



1949; Montlouis

Une partie de la citadelle de Montlouis est mise à la disposition du C.N.R.S. par le Ministère des Armées afin de développer les recherches sur l'énergie solaire, non seulement dans le domaine fondamental mais également dans le sens d'une utilisation semi-industrielle et industrielle des fours solaires. Ces recherches permettent d'étudier la réalisation de prototypes de fours plus simples. Elles aboutiront à la construction du four solaire de 1000 kW d'Odeillo.

1952; un laboratoire

1952, le C.N.R.S. crée le laboratoire propre de l'énergie solaire chargé de toutes les

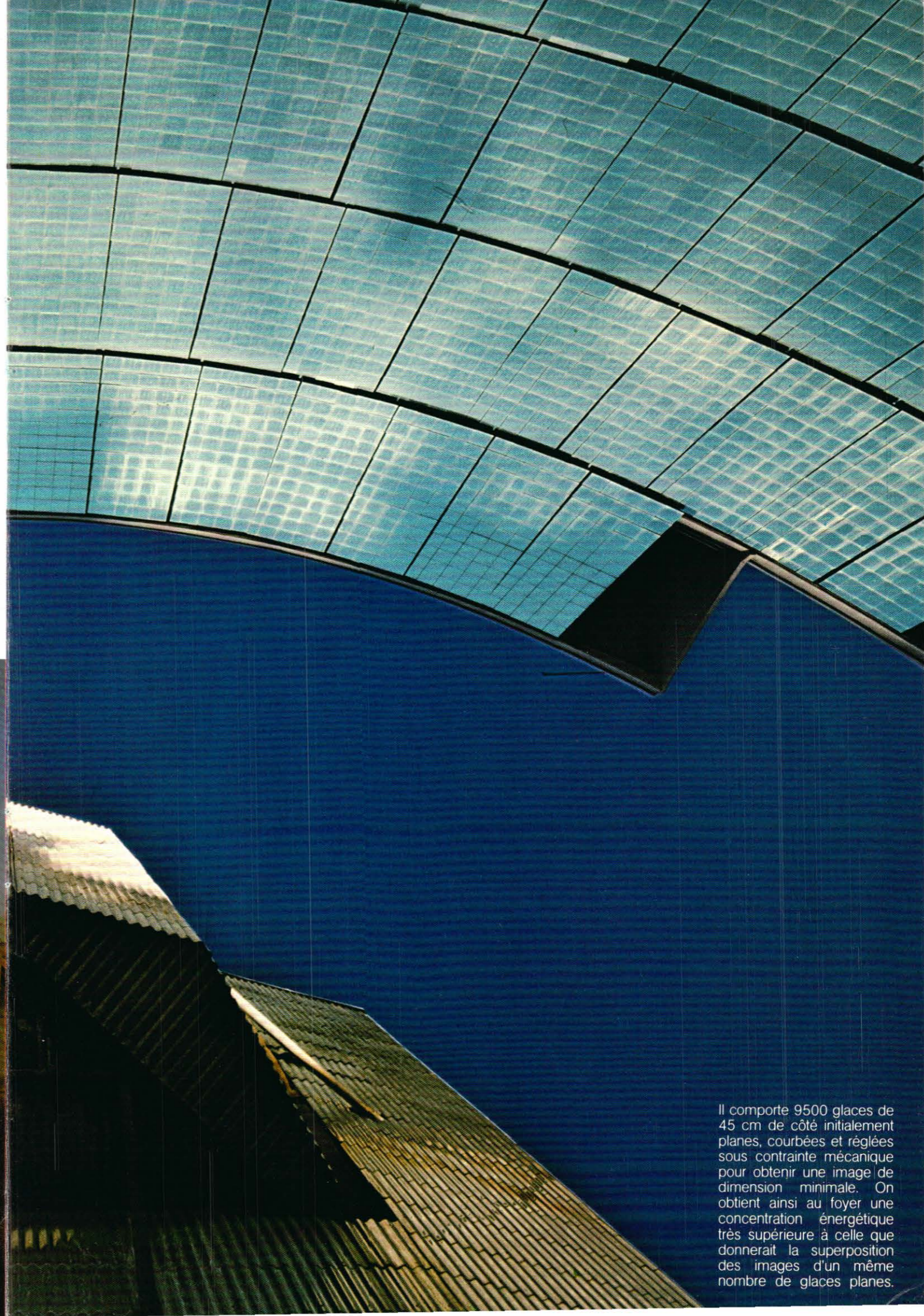
Laboratoire de recherches sur l'utilisation de l'énergie solaire - citadelle de Montlouis - Grand four solaire : vue côté Nord et miroir parabolique - Photo CNRS.

études ainsi que des développements relatifs aux applications de l'énergie solaire.

1970; le four solaire de 1000 kW du CNRS devient opérationnel après une mise au point et un réglage qui ont duré deux ans

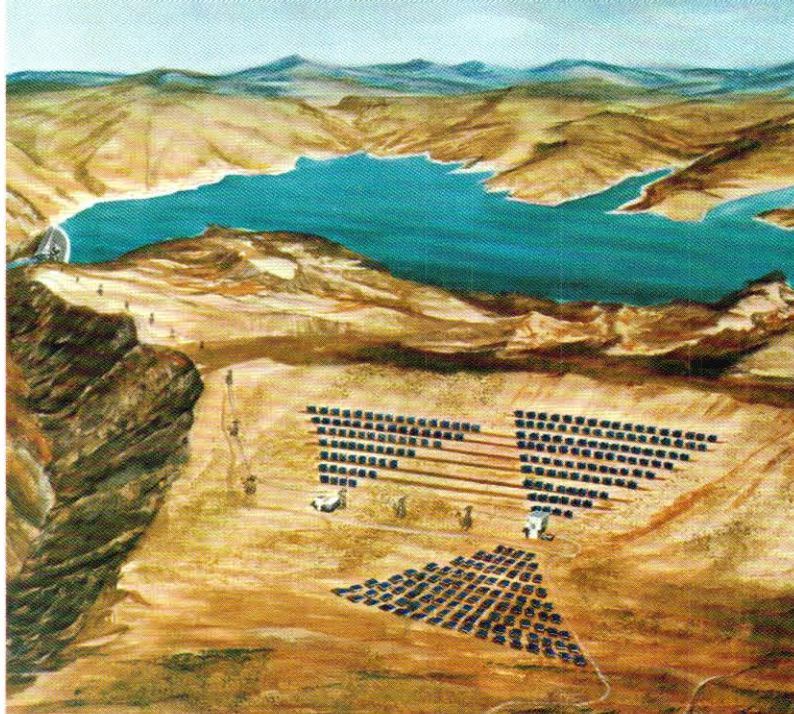
Le four solaire de 1000 kW est implanté à proximité de Montlouis (10 km) à Font-Romeu-Odeillo Via en Haute Cerdagne (Pyrénées Orientales), à une altitude de 1600 m. Cette région dont la latitude est voisine de celle de Rome et d'Ajaccio est particulièrement favorisée puisque l'ensoleillement y est de 170 à 180 jours par an.

Ce four est conçu pour un emploi aussi diversifié que possible, tant en recherche fondamentale, dans le domaine des hautes températures, plus de 3 000°C, qu'en vue d'applications diverses.



Il comporte 9500 glaces de 45 cm de côté initialement planes, courbées et réglées sous contrainte mécanique pour obtenir une image de dimension minimale. On obtient ainsi au foyer une concentration énergétique très supérieure à celle que donnerait la superposition des images d'un même nombre de glaces planes.

ENERGIE SOLAIRE ET COMPETITION ECONOMIQUE



▲ Représentation d'un projet envisageant la construction d'une centrale solaire auprès du barrage de Horse Mesa en Arizona (États-Unis). En période d'ensoleillement, l'énergie solaire prendrait le relais de l'énergie hydraulique. La Centrale se composerait d'une petite installation pilote (à gauche), et d'une station plus puissante, l'une et l'autre produisant 300 kW et 1 000 kW. Photo : Martin Marietta.

Les avantages de l'énergie solaire, absence de pollution et de nuisances, possibilités illimitées pour l'avenir, ne suffiraient pas à assurer son développement actuel et futur sans un effort de promotion et un souci de compétitivité.

Pour les fours solaires, la notion de qualité de l'énergie intervient à des degrés divers suivant les opérations envisagées.

En recherche fondamentale, appliquée ou pilote, les conditions imposées sont telles (très hautes températures, pureté...) que le coût de l'opération apparaît comme négligeable en raison des résultats obtenus. Dès que l'on aborde la compétition économique au niveau des opérations industrielles, ou de la production d'énergie, la position des fours solaires ne reste économiquement favorable que si ils sont spécialisés pour une opération déterminée et utilisés dans les meilleures conditions de rentabilité (travail dans des pays à grand ensoleillement, (2,5 fois celui de la France) et choix du lieu d'implanta-

tion pour sa facilité d'accès). En outre, une distinction doit être faite entre production d'énergie et production de température, non obtenues simultanément. Des prototypes adaptés à la performance demandée sont alors étudiés.

les très hautes températures dans l'industrie (supérieures à 2500 °C)

A Odeillo s'étudie la simplification des grands fours solaires pour qu'ils puissent entrer en compétition avec les fours industriels classiques destinés à la production de hautes températures (fours à haute fréquence, à bombardement électronique, fours à plasma et certains fours électriques spéciaux).

en métallurgie

La majorité des problèmes à résoudre en métallurgie se situe entre 1500 °C et 2500 °C. Les difficultés des opérations industrielles commencent à 1500 °C. Par contre, la performance "utile" en puissance se situe entre 250 et 500 kW.

Des applications sont envisagées dans trois directions :
- opérations-tests pour contrôler la validité à l'échelle industrielle de procédés étudiés en laboratoire.

- fabrications industrielles, ou en particulier de matériaux nouveaux produits en quantité limitée.

- traitement des minerais chers.

La fourchette d'énergie 250 - 500 kW, caractérise un four amplement suffisant pour les productions de pointe. Les "petits fours" solaires industriels semblent sans concurrence dans ce domaine.

centrales solaires

Les machines solaires mises au point à Odeillo et parti-

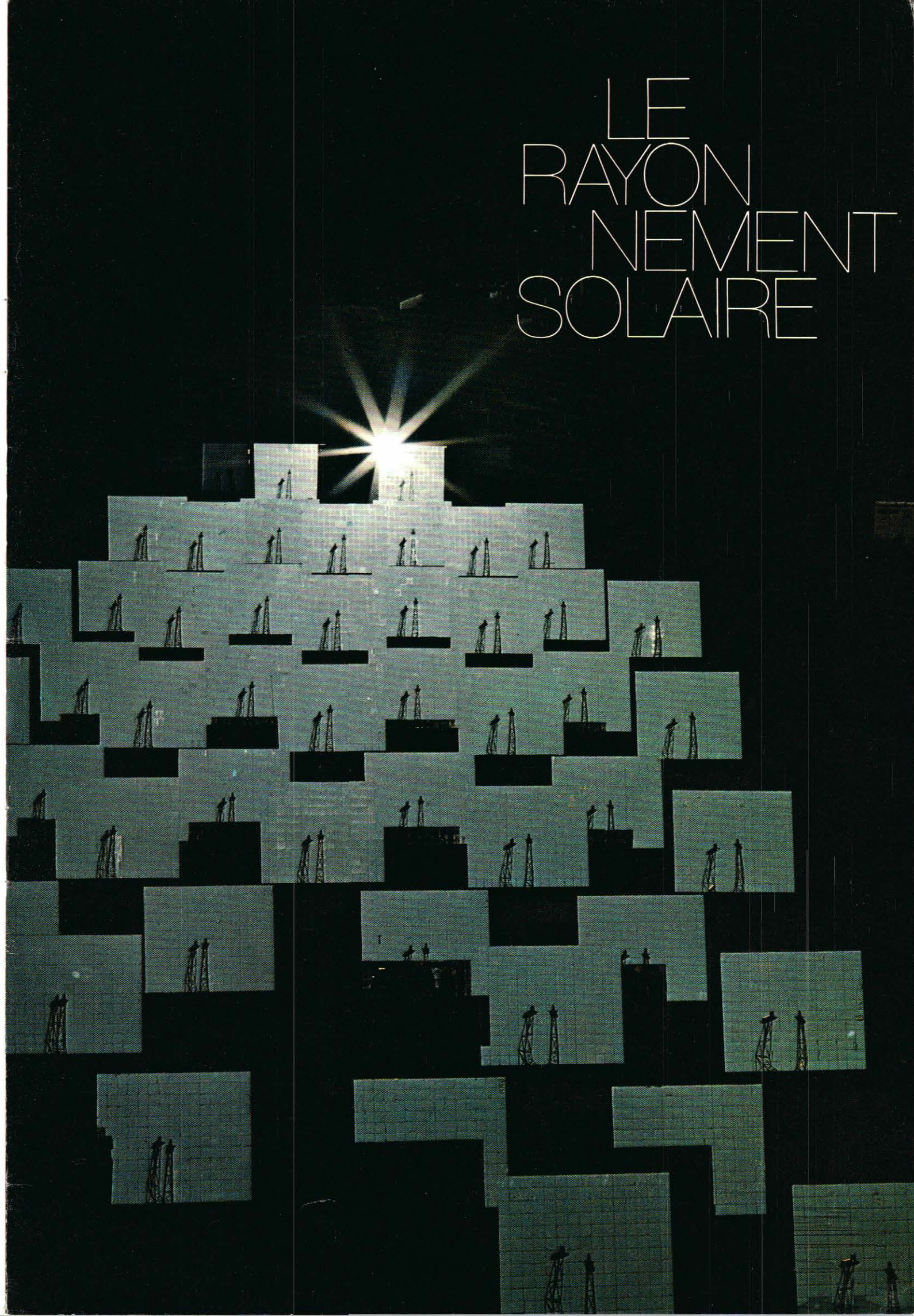
culièrement les dispositifs orienteurs (miroirs) et les fours de réception de l'énergie apportent de bonnes solutions technologiques pour la réalisation d'unités de puissance thermo-solaires dans des domaines s'étageant de quelques centaines de kilowatts à quelques dizaines de mégawatts. On pourrait ainsi progressivement envisager le remplacement de centrales à combustible liquide ou gazeux.

dans les pays en voie de développement

En outre, dans les pays en voie de développement dont la plupart comportent de vastes surfaces à grand ensoleillement, les fours solaires peuvent être utilisés pour la valorisation de minerais sur place.

Dès maintenant, l'emploi de fours solaires simplifiés (1200 à 1500 °C) est envisagé à grande échelle pour la cuisson de matériaux courants (briques, plâtres, ciments).

LE RAYONNEMENT SOLAIRE



Le rayonnement solaire fournit à notre planète des ressources énergétiques largement supérieures aux besoins actuels et futurs de l'humanité.

Ainsi, sur plus de la moitié de la surface du globe, chaque kilomètre-carré de terre ou de mer reçoit-il, chaque jour, plusieurs millions de kilowatts heures.

Malheureusement, l'énergie solaire intervient suivant des angles d'incidence variés en fonction des heures du jour et de façon intermittente : à l'intermittence régulière due à la rotation de la terre, s'ajoute une intermittence capricieuse due aux nuages, aux brumes et aux poussières.

En outre, malgré la température élevée du soleil (6000 °C), la densité d'énergie reçue à la surface terrestre reste faible (1000 Watts/m²). En effet, avec un diamètre réel de 1,4 million de km, le soleil "n'éclaire" la terre que sous un diamètre apparent moyen

de 32' d'arc seulement, du fait de son éloignement (150 millions de km). Cela suffirait pourtant à rendre la température incompatible avec le développement de la vie. Fort heureusement la terre disperse cette énergie dans toutes les directions sous forme de rayonnement infrarouge.

captage du rayonnement solaire

Le rayonnement solaire peut être capté par différentes méthodes. Le simple effet de serre, qui consiste à utiliser un vitrage comme une valve, permet d'atteindre aisément des températures voisines de 100 °C. Un tel système est particulièrement adapté aux pays tempérés, puisqu'il est possible de retenir de cette façon, à la fois, l'énergie directe du soleil, le rayonnement diffus du ciel et celui des nuages, et même l'éner-

gie réfléchi par les surfaces terrestres (albédo). Il est déjà largement utilisé pour les usages domestiques (chauffage de l'eau et des maisons, distillation de l'eau...).

Pour obtenir des températures nettement supérieures à la centaine de degrés, il faut "concentrer" les rayons provenant directement du soleil par un dispositif optique approprié (surface sélective, verres anti-reflets, verres multiples). En revanche, il n'est pas possible de concentrer de cette manière un rayonnement diffus tel que celui des nuages ou du ciel. La concentration optique convient donc particulièrement aux pays à ciel clair, où le rayonnement direct représente la presque totalité des apports énergétiques.

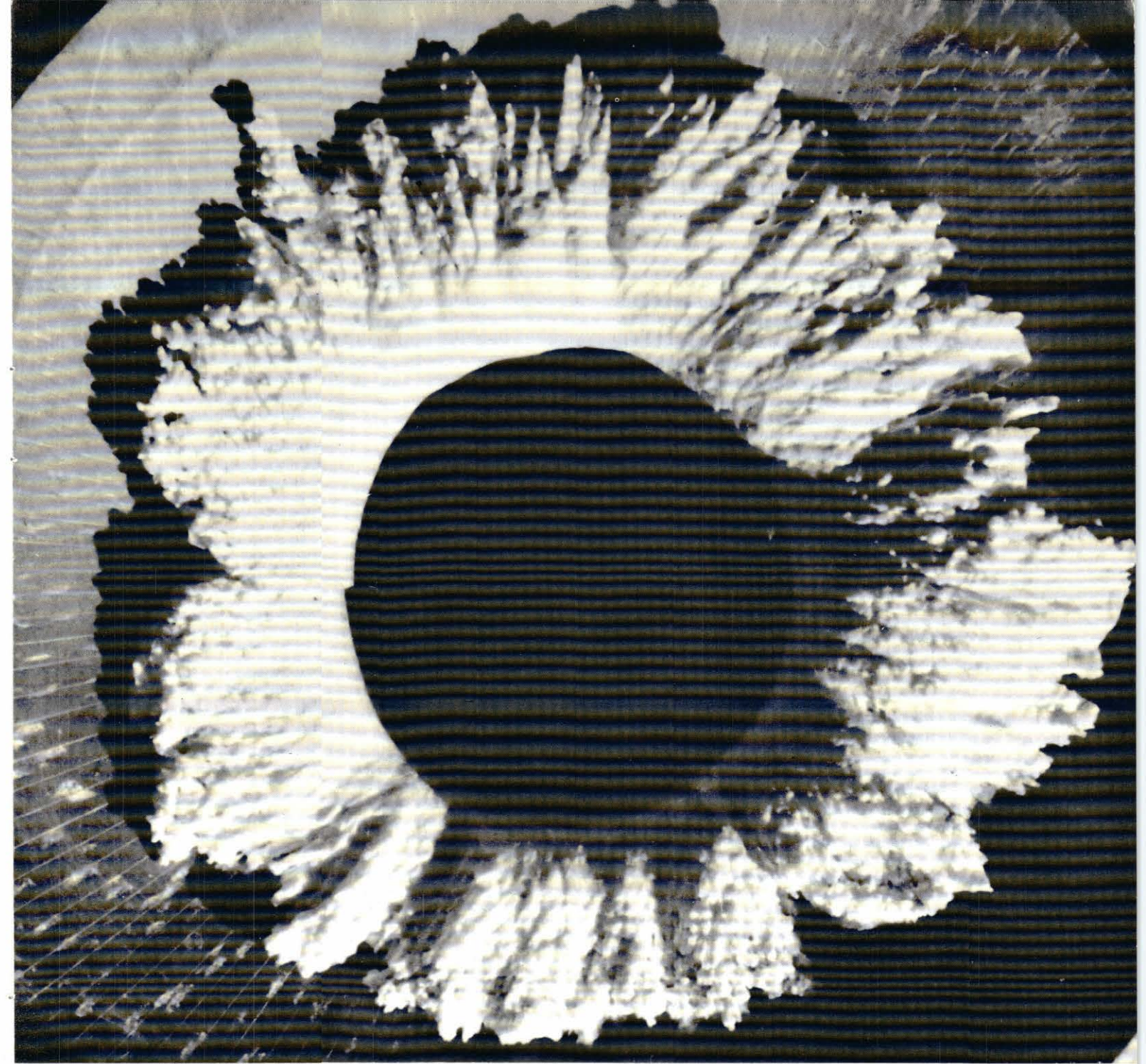
Plus la température que l'on souhaite obtenir au foyer est élevée plus la "concentration" doit être grande. Les difficultés sont alors accrues car il faut accumuler sur une même zone, des dizaines de

milliers d'images d'une source lumineuse, le soleil, qui se déplace dans le ciel. Ainsi le four solaire d'Odeillo superpose plus de 20 000 images dans la zone focale.

utilisation de l'énergie solaire

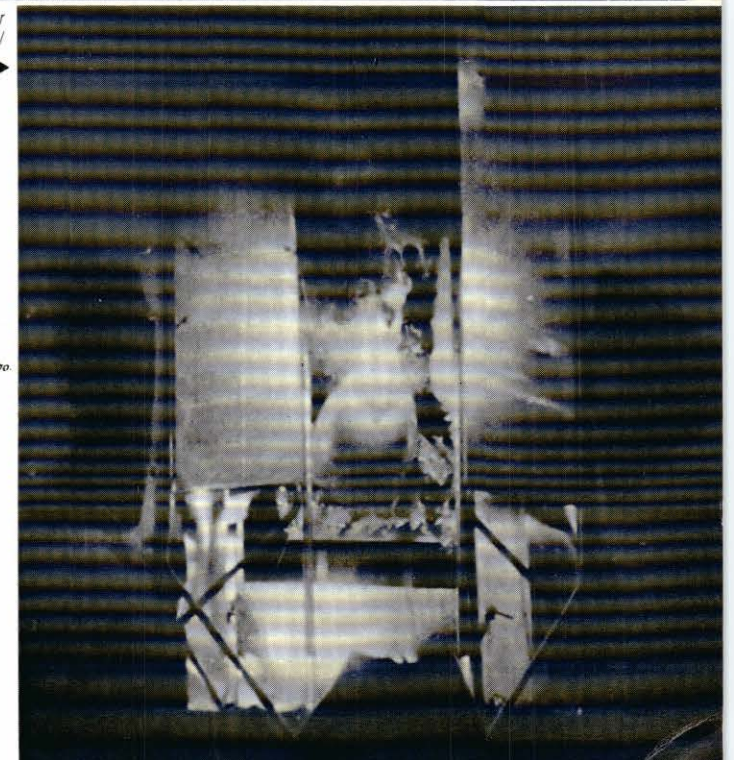
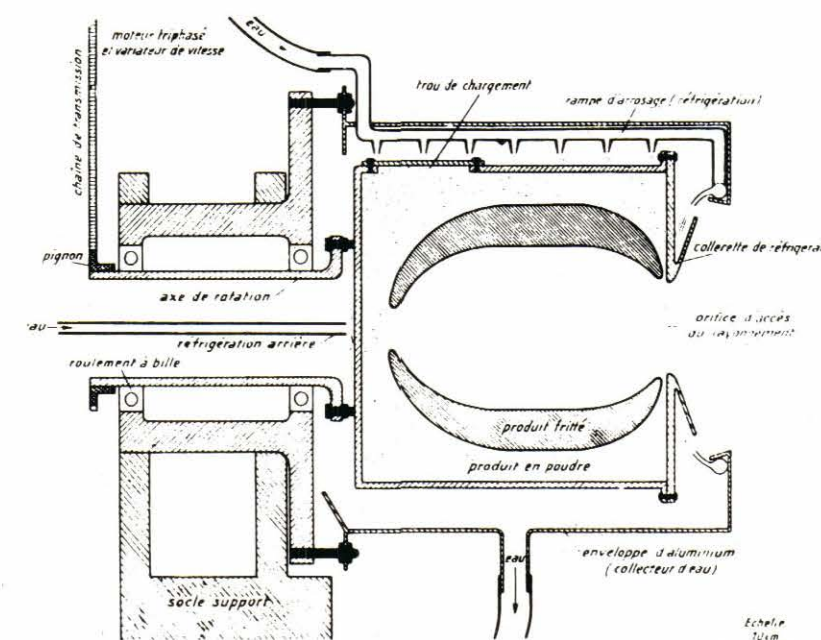
En recherche fondamentale, les fours solaires constituent un outil exceptionnel pour toutes les études de 1 000 à 3 800 °C nécessitant des conditions de pureté particulières.

En fait, l'utilisation de l'énergie solaire semble avoir un avenir non seulement dans la recherche fondamentale mais encore pour des applications dont les répercussions sur l'avenir sont indéniables, en raison des problèmes d'économie d'énergie et de pollution auxquels nous sommes aujourd'hui confrontés.



▲ Lèvre d'un creuset en alumine élabore dans le four centrifuge.
Photo : Claude Gazuit

chocs thermiques programmés sur un radôme - Contrat CNRS/SEP/ONERA.
Photo : DRME.



◀ Les 63 miroirs orienteurs du four solaire d'Odeillo.