

tiré à part  
des n<sup>os</sup> 96 et 97

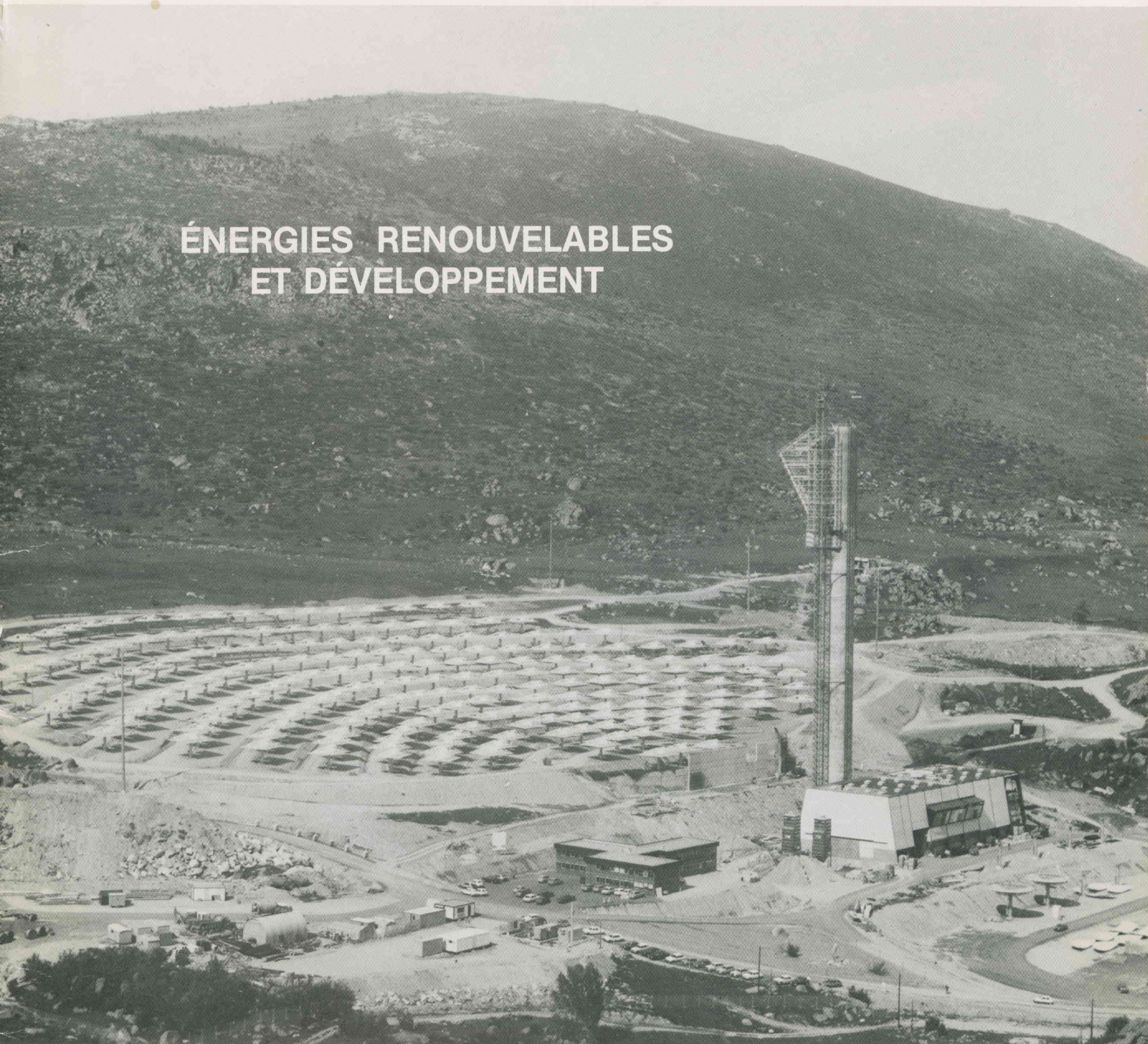
# Entropie

ENERGETIQUE ET DYNAMIQUE DES SYSTEMES COMPLEXES

LA REVUE INTERNATIONALE DE SCIENCE ET TECHNIQUES NOUVELLES EN ÉNERGÉTIQUE, GÉNIE CHIMIQUE, GÉNIE BIOLOGIQUE

ISSN 0013 - 9084

## ÉNERGIES RENOUVELABLES ET DÉVELOPPEMENT



PUBLIÉ AVEC LE CONCOURS DU CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



# Les applications du four solaire de 1000 KW du CNRS à Odeillo

C. ROYERE

Centre National de la Recherche Scientifique  
Laboratoire d'Energétique Solaire  
B.P. 5 - 66120 ODEILLO FONT ROMEU (France)

les solaires. S'il est envisagé ultérieurement dans certains pays et sous certaines conditions d'utiliser l'énergie solaire focalisée comme source de chaleur industrielle renouvelable à d'autres fins que la conversion en électricité, les grandes installations actuelles ou en construction (après une première période de production pilote d'électricité) ou de nouvelles pourront servir à réaliser des opérations industrielles pilote s'appuyant sur l'acquis représenté par les applications décrites.

*The French activity on large solar thermal test facilities is checked against the main milestones in this field in the world : this provides arguments for the prominent role played by France. The characteristics of point focussed solar energy are summarized either as a source of process heat or as a source of heat at medium and high temperature with some specific features, then a short review is presented on the applications of the 50 KWth Montlouis solar furnace from 1952 to 1967. A few general aspects of the Odeillo 1000 KWth CNRS solar furnace are looked at shortly to bring a better understanding of the operation and use of this facility. The various fields of applications and utilizations, since 1969, of the 1000 KWth solar furnace are described and explained by precise and actual examples : refractory oxides processing, ores processing, metallurgy, thermal shocks, and physical measurements, testing of solar power plants components. If the utilization of point focussed solar energy was looked at for the future in some countries and under some conditions, as a source of renewable process heat for other purposes than electricity generation, the large facilities, existing or under construction (for the second ones, after a period of pilot-scaled production of electricity) or new ones should be useful to demonstrate pilot-scale industrial operations taking advantage of the know-how of the applications described in this paper.*

Anhand einer Übersicht über die bisher in der Welt erstellten die Solarenergie verwendenden Anlagen streicht der Autor die hervorragende Rolle heraus, die Frankreich auf diesem Gebiet bisher gespielt hat. Es werden die Anwendungen der gebündelten Sonnenstrahlung als industrielle Wärmequelle und als Mittel- oder Hochtemperaturwärmequelle zu speziellen Zwecken vorgestellt; dann werden die möglichen Einsatzgebiete des 50 kWth - Sonnenofens von Montlouis (1952-1967) aufgeführt. Einige allgemeine Merkmale des 1000 kWth - Sonnenofens von Odeillo werden kurz beschrieben, um das Verständnis seiner Funktionsweise und Anwendungen zu erleichtern. Die verschiedenen Anwendungsgebiete, bei denen dieser Ofen seit 1969 eingesetzt wurde, werden anhand konkreten Beispiele erläutert: Verarbeitung feuerfester Oxide, Mineralurgie, Metallurgie, ultraschnelle Temperaturänderung zur Bestimmung physikalischer Größen, Test von Komponenten von Sonnenkraftwerken. In einigen Ländern wird unter speziellen Bedingungen erwogen, die gebündelte Sonnenenergie als erneuerbare Industriewärmequelle zu anderen Zwecken als die Elektrizitätserzeugung zu verwenden. Die existierenden oder sich im Bau befindenden Grossanlagen werden zuerst zur Elektrizitätserzeugung im Pilotmasstab verwendet. Danach werden diese und neue Anlagen zur Entwicklung neuer Industrieverfahren gebraucht werden, wobei die beschriebenen Anwendungen als Ausgangspunkt dienen werden.

El autor repone los trabajos franceses sobre las grandes instalaciones solares dentro de la cronología mundial de dicho sector, proporcionando así los elementos de base que permiten de poner en evidencia el rol preponderante jugado por Francia. Después de un recordatorio de las características de la energía solar focalizada, ya sea como fuente de calor industrial o como fuente de calor a media y alta temperatura teniendo ciertas particularidades específicas, una rápida revista de las aplicaciones del horno solar de 50 KWth de Montlouis; de 1952 a 1967, es presentada. Algunos aspectos generales del horno solar de 1000 KWth de Odeillo son abordados brevemente, para permitir una mejor comprensión del funcionamiento y de la utilización de dicha instalación. Los diferentes sectores de aplicaciones y de utilidades, después de 1969, del horno solar de 1000 KWth son descritos e ilustrados de ejemplos precisos y concretos: tratamientos de óxidos refractarios, mineralogía, metalurgia, choques térmicos y medidas físicas, ensayos de componentes de centrales solares. Si se tiene en perspectiva posteriormente en ciertos países y bajo ciertas circunstancias, de utilizar la energía solar focalizada como fuente de calor industrial renovable a otros fines que la conversión en electricidad, las grandes instalaciones actuales o en construcción (después de un primer período de producción piloto de electricidad) o de nuevas instalaciones podrán servir a realizar operaciones industriales piloto apoyándose en la experiencia adquirida, representada por las aplicaciones descritas.

O autor insere os trabalhos franceses sobre as grandes instalações solares na cronologia mundial referente a esse domínio, dando assim os elementos de base que permitem pôr em evidencia o papel preponderante desempenhado pela França. Depois de se recordar as características da energia solar focalizada quer como fonte de calor industrial, quer como fonte de calor a media e alta temperatura tendo certas particularidades específicas, apresenta-se uma rápida revista das aplicações do forno solar de 50 KWth de Montlouis, de 1952 a 1967. Alguns aspectos gerais do forno solar de 1000 KWth de Odeillo são brevemente abordados, para permitir uma melhor compreensão do funcionamento e utilização deste instalação. Os diferentes domínios de aplicação e de utilização desde 1969 do forno solar de 1000 KWth são descritos e ilustrados com exemplos precisos e concretos: tratamentos de óxidos refractários mineralurgia, metalurgia, choques térmicos e medidas físicas, ensaios de componentes de centrais solares. Se se encarar posteriormente, em certos países e em certas condições, a utilização da energia solar focalizada como fonte de calor industrial renovável para fins distintos da produção de electricidade, as grandes instalações actuais ou em construção (depois de um primeiro período de produção piloto de electricidade), ou instalações novas, poderão servir para realizar operações industriais piloto aperiando-se na experiencia representada pelas aplicações descritas.

mots-clés \* keywords

contribution française dans le domaine des fours solaires \* historique \* opérations industrielles pilotes \*  
french contribution in solar furnaces field \* history \* pilot scale industrial operation \*



## 1 INTRODUCTION ET REMARQUES PRÉLIMINAIRES

Le propos de l'auteur dans cet article est de résumer et d'actualiser pour le lecteur la contribution de la France dans le domaine de l'utilisation des fours solaires de grandes dimensions qui sont une catégorie de ce que l'on appelle maintenant aux USA les installations solaires thermiques d'essais.

Il serait plus approprié de parler d'ailleurs, compte tenu des limites de cet article, de la contribution du CNRS, puisqu'en effet il ne sera question dans le détail que des fours solaires de 50 kW de Montlouis et de 1 000 kW d'Odeillo. Le lecteur, intéressé par les autres réalisations françaises de ce type, pourra compléter son information en consultant [5] et [3], respectivement pour le four solaire de 42 kWth d'Odeillo relevant du ministère des Armées et pour le four solaire de La Bouzareah près d'Alger.

Sans vouloir entrer dans le détail de l'histoire de la concentration du rayonnement solaire, il est quand même indispensable de rappeler quelques points chronologiques qui mettent en évidence la filiation des grandes installations solaires à concentration existantes, et le rôle prépondérant joué par la France dans ce domaine.

- 1952 - Achèvement du four solaire de 50 kWth de Montlouis (d'ailleurs financé conjointement par le CNRS et le Service des Poudres de la Défense Nationale).
- 1954 - Four solaire de la Bouzareah près d'Alger (programme de l'Université d'Aix - Marseille).
- 1956 - Premier projet d'une centrale solaire à tour (Pr. V. Baum, URSS).
- 1958 - Colloque international du CNRS à Montlouis principalement consacré aux fours solaires.  
Quelques mois plus tard, le four solaire de 35 kWth de Nattick construit par l'US Army sur le principe de celui de Montlouis est mis en service (il sera démantelé ultérieurement en 1973 au Nouveau Mexique).
- 1961 - Construction d'une installation à simple réflexion de 100 kWth environ par l'Université de Gènes en Italie (Pr. G. Francia) pour la production de vapeur surchauffée.
- 1963 - Achèvement du four solaire de 40 kWth de Sendaï (Université de Tohoku, Japon).
- 1968 - Fin de la construction du four solaire de 1 000 kWth du CNRS à Odeillo, début des réglages définitifs et début d'utilisation.
- 1971 - Mise en service du four solaire de 42 kWth d'Odeillo construit par le ministère des Armées sur le principe de celui de Montlouis et avec des caractéristiques très voisines de celui de Nattick.

La même année, réunion à l'Académie Nationale des Sciences de Washington entre quelques spécialistes des fours solaires du CNRS et divers responsables d'organismes de recherche appliquée des USA : depuis lors se poursuit une longue période de collaboration dans le cadre de contrats de recherche appliquée et d'essais effectués au four solaire de 1 000 kWth, et à l'occasion des multiples échanges se réalise un transfert important de l'acquis technologique français sur les grandes installations solaires.

1974 - Des spécialistes des fours solaires français participent à une réunion internationale [1] organisée par l'Energy Research and Development Agency (actuel Department of Energy) afin que l'expérience acquise avec les grandes installations solaires serve

à la mise au point du projet d'une installation d'essais de 5 MWth à tour américaine.

- 1977 - Début de mise en service de deux installations aux USA : l'installation solaire d'essais à tour de 5 MWth d'Albuquerque financée par l'ERDA et placée sous la responsabilité des Laboratoires Sandia.

L'installation de 400 kWth d'Atlanta financée par l'ERDA construite sur le modèle de l'installation de Sant Illario (Gènes, Pr. G. Francia) et placée sous la responsabilité de l'Institut de Technologie de Georgie.

Actuellement divers projets de centrales solaires à tour sont en construction : France, USA, Japon, CEE, IAE.

Ces dernières années mettent donc en évidence une évolution très nette vers les grandes installations solaires à simple réflexion pour la production d'électricité, tout au moins dans une première génération.

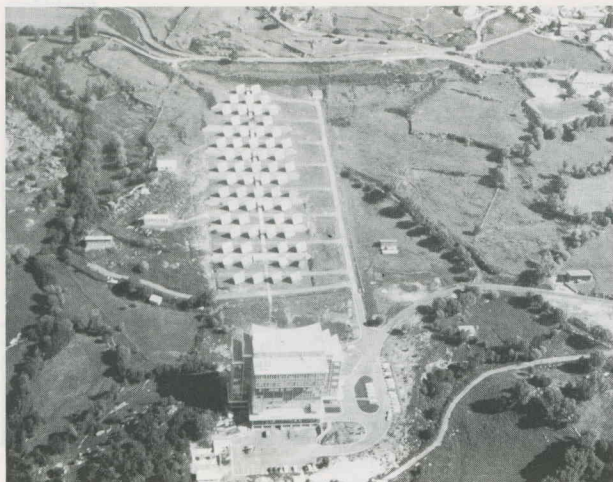
Il faut noter également que le principe des installations à récepteur central est mis en concurrence (projet Sunshine au Japon, centrales d'Almeria en Espagne, projets du DOE aux USA) avec celui des centrales à récepteurs dispersés dont le module est, suivant les cas, un concentrateur cylindro-parabolique ou bien sphérique fixe au sol (projet Pericles en France par exemple ou Crossbeaton aux USA) ou bien parabolique directement asservi sur le soleil (projet THEK en France par exemple ou concentrateurs ACUREX ou du JPL aux USA).

De manière générale à l'intérieur du cadre même des perspectives possibles de développement à venir des applications thermiques de l'énergie solaire focalisée (dans le domaine énergétique aussi bien que dans celui de la chaleur industrielle) on trouve des tendances souvent antinomiques : récepteur central/récepteurs dispersés et simple réflexion/double réflexion. En fait une telle vision schématique est un raccourci qui recouvre des données sensiblement plus complexes. D'une part on connaît les types de concentrateurs solaires : cylindro-paraboliques divers avec ou sans réflecteur auxiliaire, simples en montage Est-Ouest ou suivant l'axe du monde ou dérivés à bandes (du type cercle de Rowland) ; parabolique direct ; sphérique avec ou sans réflecteur auxiliaire mobile ; centrale à tour avec deux variantes possibles : concept Baum ou concept Hildebrandt ; four solaire : concentrateur fixe et héliostat(s).

D'autre part chacune des classes de systèmes précédents s'accompagne de limitations de type technologique, énergétique et économique (souvent juxtaposition de limitations des types précédents) parmi lesquelles on peut citer principalement :

- coût énergétique d'une deuxième réflexion (facteur 0,8 à 0,92),
- surcoût du second réflecteur,
- position fixe de la zone focale,
- stabilité de la répartition spatiale du flux (à la limite recouvrement des héliostats d'un four solaire),
- variation horaire de la puissance collectée (efficacité géométrique des héliostats),
- charge admissible dans la zone focale,
- transport de fluides ou de solides,
- puissance optimale du module unitaire,
- coût énergétique du niveau de température : prix du kWh thermique (rendement énergétique global fonction de la concentration et de la température),
- coefficient d'occupation du sol,
- impératifs concernant le site.





*Les applications du four solaire de 1 000 kW du CNRS à Odeillo*

L'intention de l'auteur n'est pas de débattre des mérites respectifs des principes du récepteur central et des récepteurs dispersés, ni de classer en fonction de leurs avantages et inconvénients technico-économiques les différents types de concentrateurs solaires, ni de déterminer les perspectives d'avenir respectives de la simple ou de la double réflexion : de tels sujets en effet justifieraient à eux seuls un article séparé.

Cependant, il est logique d'envisager, dans un avenir encore à définir, une deuxième génération d'objectifs et d'installations (ceux-ci ne se limitant pas à la conversion thermodynamique et celles-là pouvant éventuellement comprendre des installations à double réflexion).

Les grandes installations solaires à concentration existantes ou actuellement en construction pourront alors, à leur tour, servir à conduire des opérations pilotes correspondant aux nouveaux objectifs dont on va pouvoir, par analogie, se faire une idée assez précise pour le futur, en examinant les applications de deux grands fours solaires.

## 2 LES FOURS SOLAIRES DU CNRS

F. Trombe et ses collaborateurs et leurs successeurs en France, avec l'appui du Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), ont exploré et développé, pendant les 35 dernières années, les utilisations thermiques du rayonnement solaire focalisé, successivement à Meudon, Montlouis puis à Odeillo.

Les principales étapes, au cours de cette longue entreprise, ont été le développement de petits fours solaires de laboratoire, d'une puissance de 1 à 2 kW thermiques, l'achèvement de la construction en 1952 du four solaire maquette de 50 kW(th) de Montlouis et, en 1969 la mise en service du four solaire prototype performant de 1 000 kW(th) d'Odeillo.

Tous les détails concernant l'historique de cette progression et les caractéristiques et performances de ces installations ont déjà été publiés [1], [2], [3], [4], [5], [6].

L'objectif du présent article est de mettre l'accent sur les utilisations et les applications des deux installations de puissance élevée (Montlouis 50 kW, de 1952 à 1967, et Odeillo

1 000 kW, 1969 à aujourd'hui) pour contribuer dans une certaine mesure au développement de programmes dans ce domaine pour les installations d'essais nouvelles.

Il est utile de commencer par faire une revue des principales caractéristiques de l'énergie solaire focalisée; puis d'examiner les utilisations passées et présentes des installations de Montlouis et d'Odeillo; enfin en conclusion d'essayer de faire un peu de prospective.

## 3 L'ÉNERGIE SOLAIRE FOCALISÉE CONSIDÉRÉE COMME SOURCE DE CHALEUR

D'un point de vue général, l'énergie solaire focalisée peut être considérée comme source renouvelable de chaleur dans un certain domaine de température.

Avec cette approche aussi large, il est possible d'envisager cette énergie comme une source de chaleur industrielle pour des procédés chimiques très répandus, et, comme source de chaleur pour la production thermodynamique d'énergie mécanique ou électrique à l'aide de cycles de conversion. Dans ce cas les difficultés à surmonter sont très sérieuses: investissement initial pour la collecte et la concentration, discontinuité de cette source d'énergie, et, dans une certaine mesure, la limitation de la puissance d'une installation unitaire. Tous ces facteurs contribuent au coût du kilowatt-heure thermique ou électrique qui doit concurrencer un kilowatt-heure identique produit par des sources d'énergie conventionnelles bien établies et auxquelles on est habitué. Cependant, des problèmes similaires ont déjà été résolus en Angleterre et dans d'autres pays européens aux XVI<sup>e</sup> et XVII<sup>e</sup> siècles quand le charbon a lentement remplacé le bois et le charbon de bois [7].

## 4 L'ÉNERGIE SOLAIRE FOCALISÉE: CARACTÉRISTIQUES SPÉCIFIQUES

La deuxième approche possible de l'énergie solaire focalisée consiste à être plus spécifique, et à essayer de tirer le meilleur parti des caractéristiques propres de cette énergie.

Il est bien établi, et le fait est très largement illustré, que



l'énergie solaire focalisée est une source de chaleur pour des températures moyennes et élevées, disons dans le domaine 1 000 à 2 700 °C et au-dessus, avec les caractéristiques spécifiques suivantes provenant du fait qu'il s'agit d'énergie thermique radiative qui permet de réaliser :

- des températures moyennes et élevées,
- des traitements de matériaux à ces températures sans contamination du produit traité ni par la source de chaleur elle-même (rayonnement) ni par le support (technique de l'auto-creuset, supports réfrigérés) donnant ainsi la possibilité d'élaborer des matériaux de très grande pureté ou à impuretés contrôlées, sans pollution de l'environnement,
- des vitesses de réaction élevées, par élévation de la température et en utilisant le plus souvent la phase liquide,
- des traitements sous atmosphère oxydante, quelle que soit la température, et en particulier à l'air libre, sans pour cela éliminer les possibilités d'atmosphères contrôlées : ces deux possibilités sont très utiles pour les céramiques et la métallurgie,
- des rendements élevés puisqu'il s'agit d'applications thermiques directes sans conversion thermodynamique,
- des cyclages thermiques d'une très grande variété (énergie sans inertie, que l'on peut programmer de multiples façons différentes),
- des mesures physiques en l'absence de champs magnétiques intenses (mesures de transmission de micro-ondes),
- des densités énergétiques spectrales élevées (photochimie et conversion photovoltaïque).

Tous ces avantages, ou presque, appartiennent à ce que l'on appelle de façon plus générale les techniques de fours à image. La différence dans le cas de l'énergie solaire focalisée, est qu'elle peut être développée à des niveaux de puissance élevée avec de bons rendements et simultanément conduire à une énergie radiative incidente sur des grandes surfaces (ou dans des volumes importants) avec une uniformité de distribution de flux assez bonne évitant si nécessaire les gradients thermiques élevés.

## 5 DÉMONSTRATION DES UTILISATIONS DES FOURS SOLAIRES: LE FOUR SOLAIRE DE 50 kW DE MONTLOUIS

Le four solaire de Montlouis (fig.1 et 2) a été une maquette simple et très utile d'un grand four solaire. Il a été utilisé abondamment par F. Trombe et ses collaborateurs, pendant environ 15 ans à partir de sa mise en service en 1952, pour explorer les domaines possibles d'applications des grands fours solaires. Ce travail a été effectué en étroite relation avec les études de base utilisant les petits fours solaires (constitués de miroirs fixes de 1,5 à 2 m de diamètre provenant de projecteurs de DCA couplés chacun à un héliostat).

L'utilisation de ce four a été développée dans deux directions : recherche appliquée ou expériences à l'échelle pilote et traitements au niveau industriel.

Des fournées de 100 kg à la fois pouvaient être traitées et, par exemple, plus de 10 tonnes d'oxyde de zirconium (zircon) ont été frittées et stabilisées à haute température pour l'industrie française des céramiques réfractaires vers la fin des années 50.

Les domaines différents des applications explorées couvrent un grand nombre d'utilisation des fours solaires :

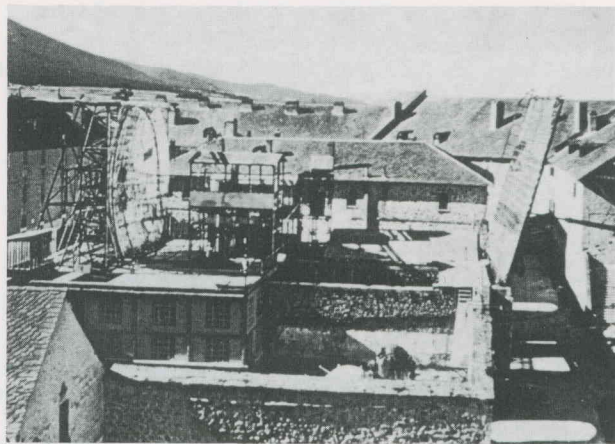


Fig. 1 - Four solaire de 50 kW de Montlouis 1952-1967 : vue générale.

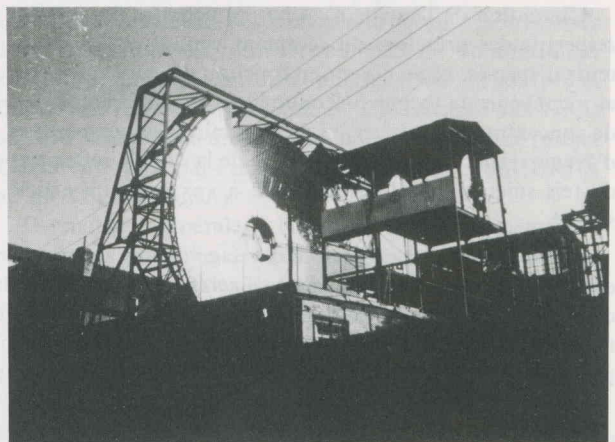


Fig. 2 - Four solaire de 50 kW de Montlouis 1952-1967 : le concentrateur et la cabine focale.

- oxydes et céramiques de hautes températures : frittage, fusion, synthèse purification à l'échelle pilote ou recherches appliquées et traitements à l'échelle industrielle,
- traitements de minerais : décomposition, oxydation et grillages, réduction, volatilisation,
- procédés métallurgiques : fusion d'alliages sous flux,
- études de résistance aux chocs thermiques de matériaux, études d'oxydations et d'inflammation sous hauts flux d'énergie thermique radiative.

Tous les résultats et les techniques, développés au cours de ces programmes avec le four solaire de 50 kW de Montlouis, sont décrits dans de nombreux articles généraux ou spécifiques, et le lecteur peut trouver une bonne base et de nombreuses informations dans [3].

Il est bon de noter que, dans chaque cas, des tentatives ont été faites pour évaluer la compétitivité des procédés solaires étudiés par rapport aux procédés utilisant des sources d'énergie non renouvelables.

A cette époque, dans les années 50 et au début des années 60, la situation dans le domaine de l'énergie était telle que les seuls domaines où la compétitivité pouvait être démontrée étaient ceux des céramiques et alliages réfrac-

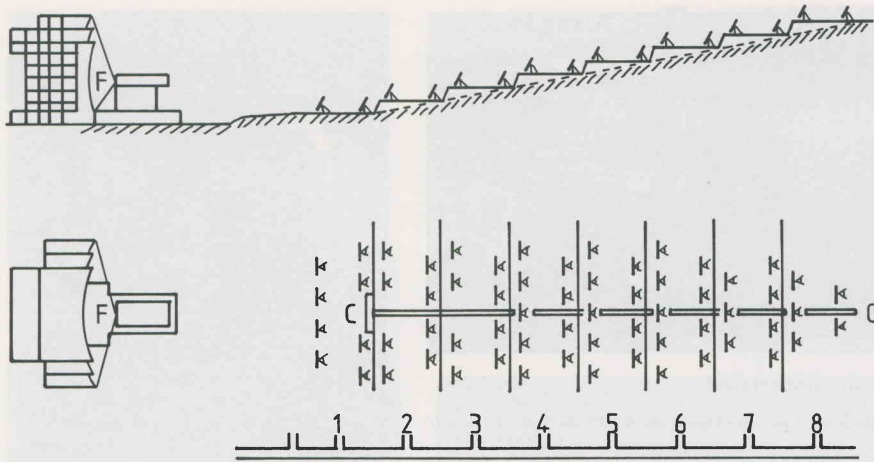


Fig. 3 - Schéma de principe d'implantation du four solaire de 1000 kWth d'Odeillo.

taires et des études de chocs thermiques sur des matériaux à usages spéciaux : finalement, le domaine d'applications dans lequel les caractéristiques spécifiques de l'énergie solaire focalisée peuvent être développées et appliquées tout particulièrement.

Ces conclusions ont servi de base et de direction à suivre pour développer les utilisations et les applications du four solaire de 1000 kW(th) d'Odeillo.

## 6 DÉMONSTRATION DES UTILISATIONS DES FOURS SOLAIRES: LE FOUR SOLAIRE DE 1000 kWth D'ODEILLO

### 6.1 Rappel général des performances comparées des fours de Montlouis et d'Odeillo

La première différence évidente entre les deux installations est le niveau de puissance : on passe d'une maquette à une installation de taille industrielle. Le four d'Odeillo permet d'accéder à un niveau de puissance comparable à celui d'un four à induction dans l'industrie.

Du fait d'une différence notable de leurs ouvertures optiques (rapport  $D/f$ , diamètre sur distance focale), Montlouis ( $D/f = 10/6$ ) était limité à 3000 °C et pratiquement à 2700 °C tandis qu'Odeillo ( $D/f > 54/18$ ) (fig. 3 et 4) est limité à 3800 °C, pratiquement plus de 3200 °C (la thorine a été fondue à environ 20 kg/h).

Une autre différence importante réside dans le fait qu'Odeillo permet d'obtenir des flux de chaleur élevés sur des surfaces de grandes dimensions (la puissance totale incidente est concentrée sur un cercle dans le plan focal de 0,80 m de diamètre environ) : les essais de matériaux peuvent ainsi porter sur des pièces de grandes dimensions. Par ailleurs le maximum de la densité de flux au voisinage du foyer est sensiblement plat le long de l'axe focal (éclairage pratiquement constant sur un matériau en dépit des effets de chocs thermiques, éclatement, frittage et ablation) (fig. 5).

Un avantage supplémentaire d'Odeillo par rapport à Montlouis est celui d'une installation à héliostats multiples

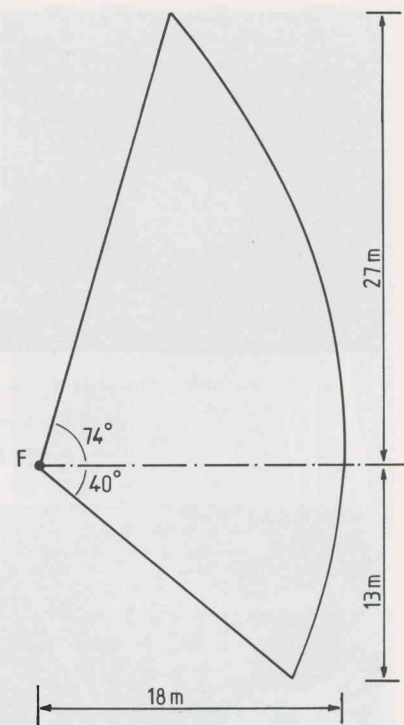


Fig. 4 - Coupe verticale schématique du concentrateur (four de 1000 kWth).

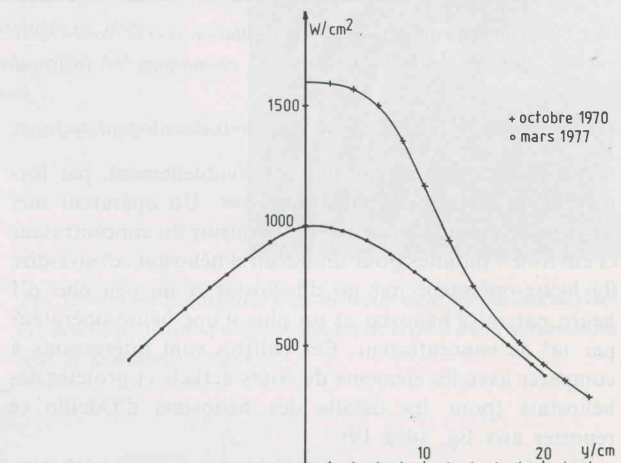


Fig. 5 - Répartitions des densités du flux le long de l'axe focal en 1970 et 1977.

par rapport à une installation à héliostat unique : possibilité d'ajuster simplement le niveau de puissance, et, dans une certaine mesure, les répartitions de densités de flux sur des surfaces en cours d'essais dans la zone focale (fig. 6 à 11).

### 6.2 Considérations générales sur l'utilisation du four solaire de 1000 kW(th) d'Odeillo

Le four d'Odeillo est une installation à facettes : 11 340 miroirs plans de 50 cm de côté sur les 63 héliostats et un peu plus de 9000 miroirs en verre trempé courbés sous tension sur le concentrateur parabolique de  $54 \times 40$  m (fig. 12 et 13). Chacun de ces miroirs a dû être réglé individuellement, après mise en place, pour atteindre les performances nominales du four. Une méthode de visée au théodolite, par autocollimation, a été utilisée pour les miroirs des héliostats, et les miroirs du concentrateur parabolique ont été



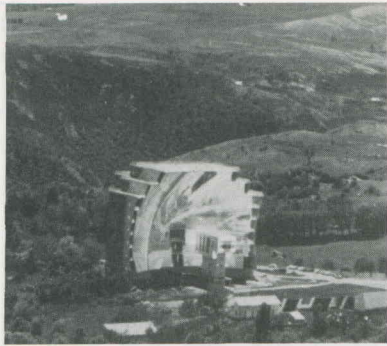


Fig. 6 - Vue générale vers le Sud-Est du site et du concentrateur.



Fig. 7 - Vue générale vers le Sud-Ouest du site et du concentrateur au premier plan le village d'Odeillo (1 650 m d'altitude).

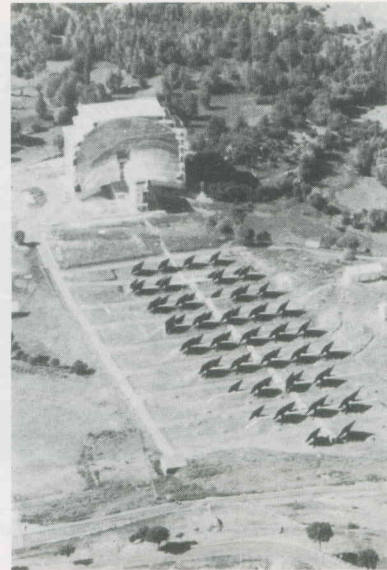


Fig. 8 - Vue générale aérienne de l'installation vers le Sud-Ouest : les héliostats sont asservis et éclairent le concentrateur.

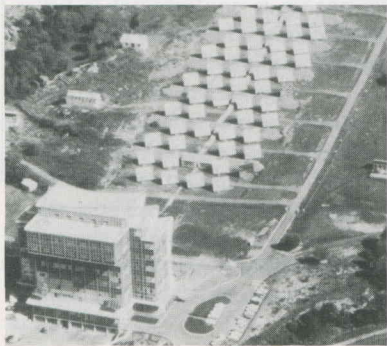


Fig. 9 - Vue générale aérienne de l'installation vers le Nord-Ouest : façade Sud du bâtiment laboratoire et support et héliostats asservis.



Fig. 10 - La salle de contrôle des héliostats dans le tout au foyer.

réglés en direction et courbure, individuellement, par formation de l'image du soleil au foyer. Un opérateur met environ 15 minutes pour régler un miroir du concentrateur et environ 9 minutes pour un miroir d'héliostat : c'est-à-dire 0,6 heure-opérateur par  $m^2$  d'héliostat et un peu plus d'1 heure par  $m^2$  de concentrateur. Ces chiffres sont intéressants à comparer avec les éléments de coûts actuels et projetés des héliostats (pour les détails des héliostats d'Odeillo se reporter aux fig. 14 à 19).

Fort heureusement ces réglages sont stables sur de longues périodes de temps (tant que l'on ne change pas de place les facettes, par exemple pour l'opération d'entretien des revêtements de protection dans le cas des héliostats).

L'entretien général annuel de l'installation concerne les circuits hydrauliques et la mécanique (500 heures-opérateurs par an), l'optique et l'électronique (100 heures-opérateurs par an). Toutes ces tâches peuvent être effectuées, pratiquement, sans interférence avec le fonctionnement normal de l'installation.

Après dix ans d'effets des intempéries sur le site, la détérioration des revêtements protecteurs des dos des miroirs des héliostats était très visible (fig. 20). Sur le four de Montlouis les revêtements des miroirs étaient encore en très bon état après 25 ans : cette durée de vie est en liaison directe avec la qualité des vernis et peintures utilisés pour protéger les dépôts d'argent et de cuivre. La cause principale de la dégradation semble être un phénomène d'abrasion (vent, particules de poussière, pluie, neige).

La dureté pourrait être l'une des propriétés les plus importantes à contrôler pour caractériser les revêtements,

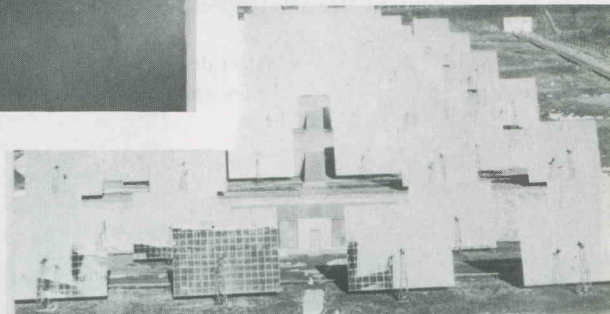


Fig. 11 - Le champ d'héliostats en fonctionnement vus du sommet du concentrateur.

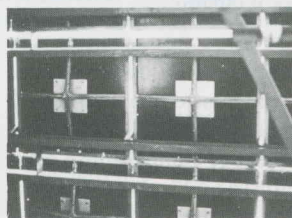


Fig. 12 - Vue arrière des facettes du concentrateur : détails de fixation et de mise sous contrainte.

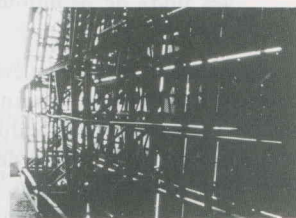


Fig. 13 - Vue générale arrière d'un étage du concentrateur.

en plus de tous les tests normalisés utilisés actuellement.

L'argente et les revêtements de protection ont été remplacés sur toutes les facettes des héliostats en 1978 et 1979 : ces revêtements avaient été testés préalablement en laboratoire pendant plus de 18 mois et ils semblent susceptibles de durer au moins 25 ans.

Refaire les revêtements de la glace polie des miroirs d'origine est plus intéressant que d'acheter de nouveaux miroirs en verre flotté : financièrement il y a un facteur 2 sur le coût et techniquement il y a un facteur 4 à 5 (pour du flotté ordinaire) sur la dispersion des faisceaux réfléchis.

Les performances de l'installation (puissance et niveau de densité de flux) avaient chuté d'environ 40 % en dix ans avec



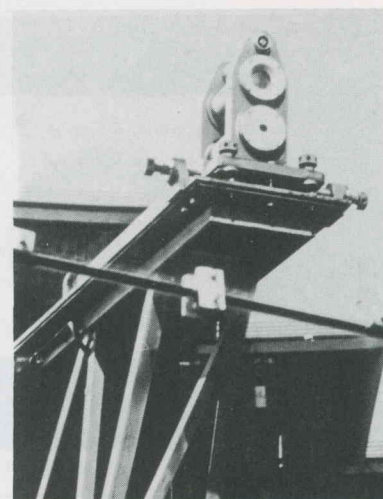
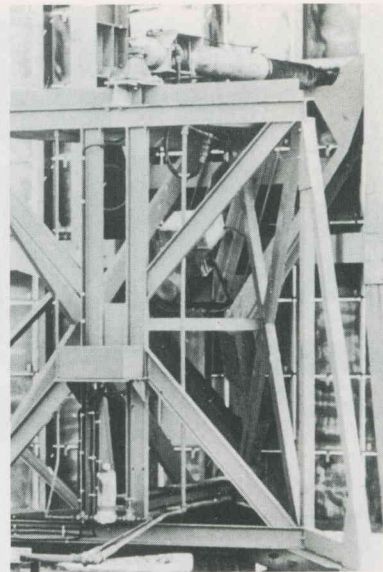
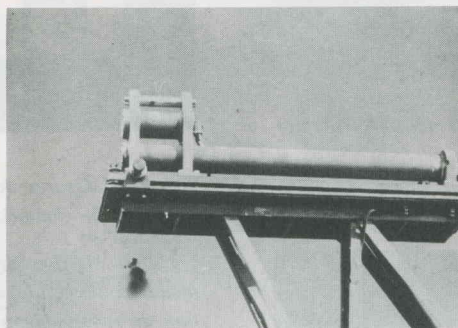
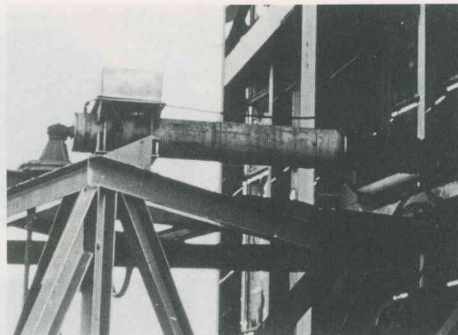
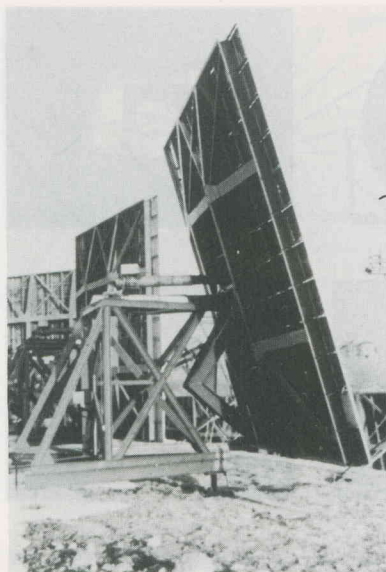


Fig. 14 - Vue générale arrière de quelques héliostats.

Fig. 15 - Vue rapprochée arrière d'un héliostat : détails des charpentes, vérins hydrauliques et axes.

Fig. 16 - Vue rapprochée arrière d'un héliostat : vue générale du pied d'un héliostat.

Fig. 18 - Vue rapprochée d'un ensemble lunettes recherche et guidage.

Fig. 17 - Les lunettes de recherche et de guidage sur leurs charpentes support devant les héliostats.

Fig. 19 - Image des lunettes d'un héliostat dans les miroirs de celui-ci ; détails de fixation des miroirs, et, en arrière plan, le concentrateur et le bâtiment support.

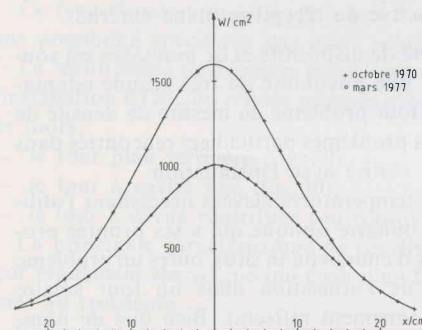


Fig. 21 - Répartition du flux dans le plan focal suivant l'axe Est-Ouest en 1970 et en 1977.

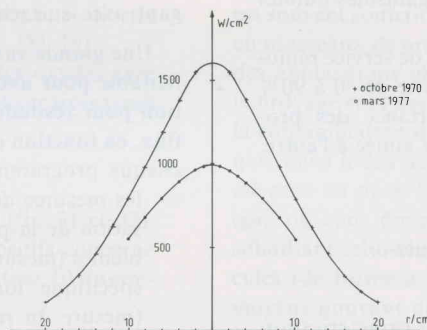


Fig. 22 - Répartition du flux dans le plan focal suivant l'axe vertical en 1970 et en 1977.

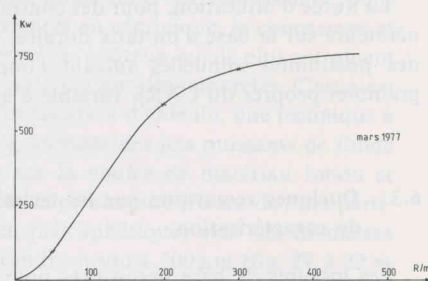


Fig. 23 - Répartition de la puissance incidente dans le plan focal en 1977.

une accélération marquée (12 % par an en 1977) (fig. 21 à 23).

Il est utile de remarquer que la perte de réflexion sur les miroirs est le facteur principal de détérioration des performances de l'installation et que, aucun effet de modification éventuelle des réglages d'origine n'a pu être mis en évidence.

En octobre 1979 l'installation avait retrouvé des performances voisines des performances d'origine.

Un autre aspect, d'importance pratique, de cette installation est la durée annuelle possible d'utilisation. En moyenne (statistique sur de nombreuses années) on dispose de 1 200 heures par an de fonctionnement possible avec un rayonnement solaire incident supérieur à  $600 W/m^2$ .

Le plein emploi de l'installation est assuré à la fois par les programmes propres du CNRS et par des contrats exté-



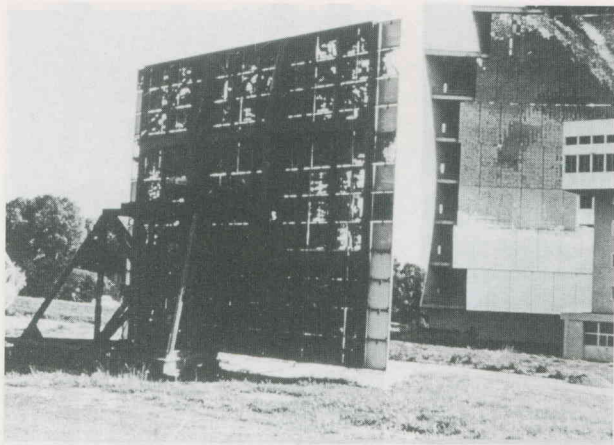


Fig. 20 - 1977: la dégradation des revêtements des miroirs transforme ceux-ci en glaces transparentes.

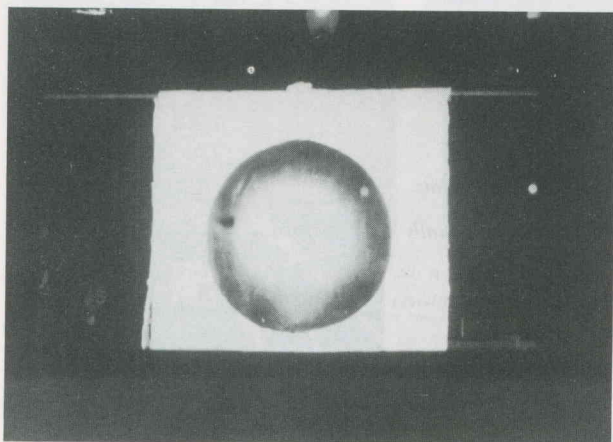


Fig. 24 - Mesure de répartition de puissance dans le plan focal: calorimètre intégral plan.

rieurs en France et à l'étranger avec des organismes publics ou privés.

La durée d'utilisation, pour des contrats de service rémunérateurs sur la base d'un taux horaire, varie de 30 à 90 % des possibilités annuelles suivant l'importance des programmes propres du CNRS variable d'une année à l'autre.

### 6.3 Quelques remarques sur les techniques de caractérisation

Les mesures de base nécessaires pour la caractérisation de ce type d'installation concernent: la puissance thermique, les répartitions de densité de flux et les températures.

Pour le four d'Odeillo des techniques de laboratoire ont été adaptées et développées pour réaliser ces mesures:

- puissance totale et répartition de puissance dans le plan focal: en utilisant de grands calorimètres du type intégral, à circulation d'eau, avec un revêtement absorbant dont le facteur d'absorption solaire est contrôlé pendant la mesure de puissance (fig. 24),
- répartition de densités de flux à l'aide de:
  - sphère intégrante
  - radiomètre à paroi mince

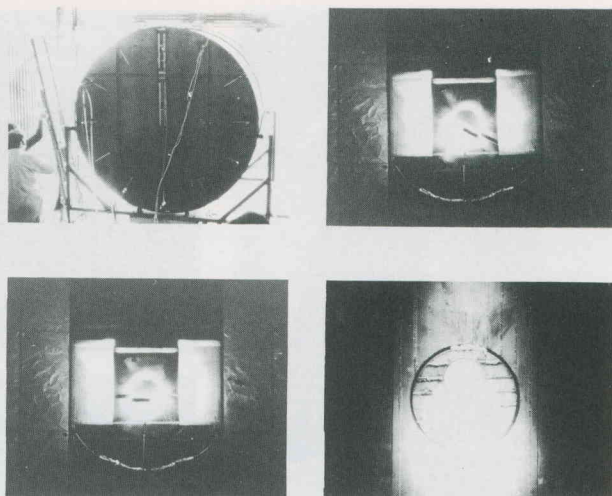


Fig. 25 - Mesures de répartitions de densités de flux dans une maquette de chaudière solaire: vue arrière.

Fig. 26 - Mesures de répartitions de densités de flux dans une maquette de chaudière solaire et à la périphérie de l'orifice de réception du rayonnement: vue de face.

Fig. 27 - Mêmes mesures que sur fig. 26: on voit en plus un bras horizontal permettant de mesurer les pertes par réflexion et le rayonnement incident.

Fig. 28 - Dispositif d'étalonnage en cours de fonctionnement; de haut en bas: radiomètre pyrométrique à réflectance, radiomètre à paroi mince réfrigéré, calorimètre de référence dans leur support réfrigéré.

radiomètres réfrigérés du type Gardon  
radiomètre pyrométrique à réflectance,  
tous ces dispositifs étant étalonnés à l'aide d'un étalon primaire de référence, constitué par un calorimètre de dimensions réduites à circulation d'eau (fig. 25 à 28).

Pour cet étalon de référence deux configurations sont utilisées: soit la cavité à faible ouverture soit le doigt de gant avec surface active de réception plane externe.

Une grande variété de dispositifs et de montages est souhaitable pour avoir une possibilité de très grande adaptation pour résoudre tout problème de mesure de densité de flux, en fonction des problèmes particuliers rencontrés dans chaque programme réalisé avec l'installation.

- les mesures des températures élevées nécessitent l'utilisation de la pyrométrie optique qui a ses propres problèmes (mesures d'émissivité in situ), outre un problème spécifique lors de l'utilisation dans un four solaire (mesure du rayonnement réfléchi). Bien que de nombreuses méthodes et techniques aient été conçues et utilisées pour des fours solaires de petites dimensions, peu d'entre elles peuvent être utilisées pour les grandes installations. Pour le four solaire d'Odeillo on utilise le plus souvent la pyrométrie optique dans le visible pour les mesures dans des cavités, et la pyrométrie optique dans l'infra-rouge dans les cas de mesures sur des cibles ne formant pas de cavité.

Parmi les techniques de caractérisation, le domaine des mesures de températures est celui où des efforts sont encore souhaitables pour développer des méthodes de mesures pratiques et d'une grande variété d'emploi.



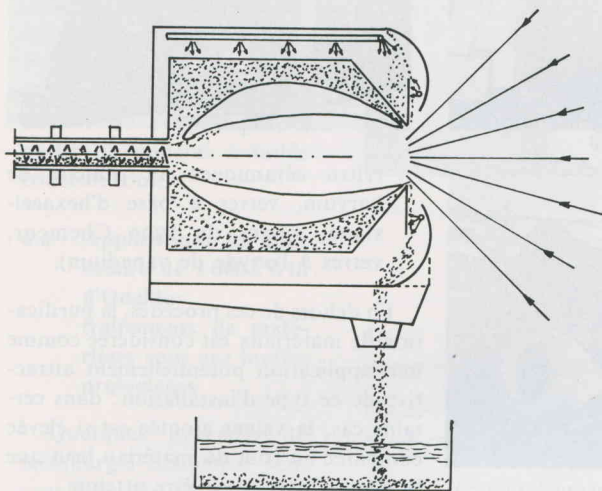
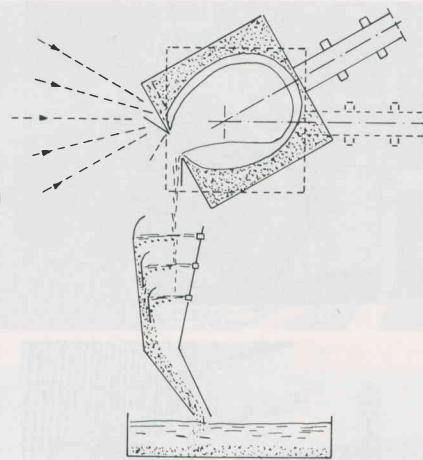
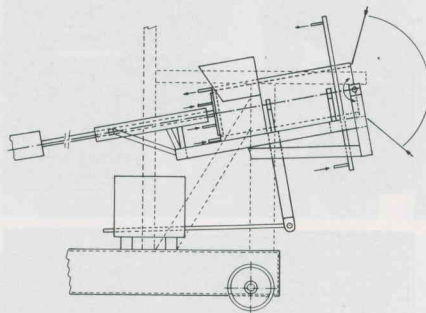
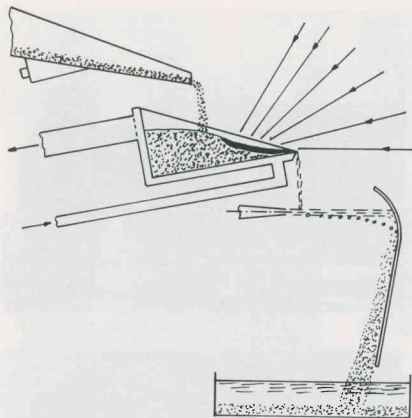


Fig. 29 - Schéma de principe de la fusion granulation des oxydes réfractaires: cas du four plan réfrigéré.

Fig. 30 - Schéma du four de fusion à cavité fixe.

Fig. 31 - Le four tournant à cavité; application coulée et granulation de réfractaire: schéma de principe.

Fig. 32 - Le four tournant à cavité; application fusion-coulée et granulation continue de réfractaires: schéma de principe.

#### 6.4 Applications du four solaire de 1 000 kWth d'Odeillo: traitements d'oxydes sous atmosphère oxydante

Ce type d'opération est le plus aisé à réaliser, et illustre une possibilité spécifique des fours solaires [8], [9].

La technologie développée pour fondre les oxydes avec l'installation d'Odeillo repose principalement sur trois types de fours :

- le four plan réfrigéré (fig. 29),
- le four à cavité fixe (fig. 30),
- le four à cavité centrifuge (ou rotative) (fig. 31 et 32).

La principale caractéristique de ces dispositifs concerne leur rendement thermique qui croît d'un facteur 10 du premier au troisième.

Cependant, outre son propre rendement, chaque dispositif a ses avantages et ses inconvénients particuliers : traitement continu ou discontinu, quantité de matière mise en jeu dans une opération, possibilité d'utiliser des périodes d'ensoleillement courtes ou longues. En fait ces trois types de fours se complètent et sont utilisés suivant les possibilités qu'ils offrent pour résoudre chacun des problèmes de traitements à réaliser (fig. 33 à 40). Actuellement il est possible de dire que le four centrifuge (ou tournant) est la technique la plus adaptée pour traiter de grandes quantités de matériaux avec les meilleurs rendements.

C'est la raison pour laquelle on a été amené ces dernières années à compléter le four rotatif discontinu que l'on avait

utilisé jusqu'alors, par tous les équipements annexes nécessaires pour réaliser des traitements continus sur des matériaux à l'état solide ou liquide à l'aide de cette technologie (alimentation continue en matériaux, récupération du produit traité et captation des gaz et des fumées).

Lors de la fusion de matériaux réfractaires pour la recherche appliquée ou en vue d'applications industrielles, il est souvent souhaitable d'éviter la solidification du matériau en morceaux de grandes dimensions car, par exemple, pour des applications ultérieures en céramique, le concassage et le broyage sont des procédés coûteux qui de plus entraînent la contamination du matériau par des impuretés. C'est ainsi que, dans le cas de l'installation d'Odeillo, une technique a été mise au point [10], utilisant des jets puissants de fluide (gaz ou eau) dirigés sur la coulée de matériau fondu et solidifiant celui-ci en le dispersant sous forme de fines particules (de forme à peu près sphérique) avec des diamètres moyens pouvant descendre jusqu'à 200  $\mu\text{m}$  (fig. 29 à 32 et 34).

Ce procédé de broyage sans contamination en phase liquide fonctionne avec le four plan réfrigéré et avec le four à cavité fixe : il est en cours d'adaptation sur le four tournant pour traiter de grandes quantités de matériaux pour l'industrie.

Pour illustrer ce domaine d'applications, il est intéressant de citer, même de façon limitative, un certain nombre de traitements typiques qui ont été développés avec l'installation d'Odeillo pour la recherche appliquée industrielle ou la production de masse :

- production de zircone stabilisée par fusion de l'oxyde



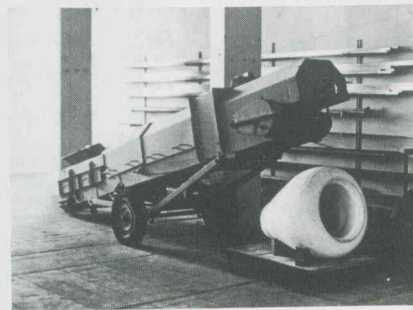
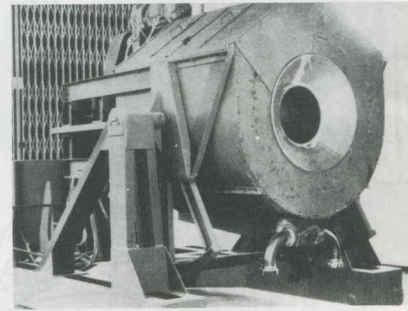
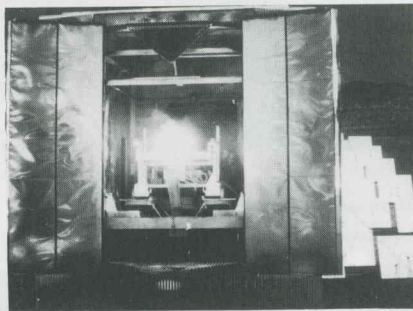
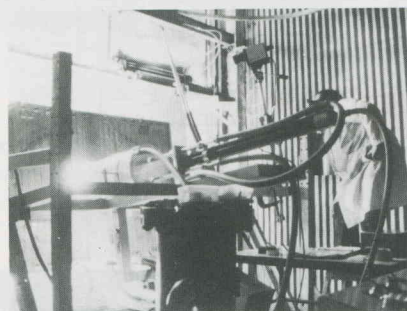
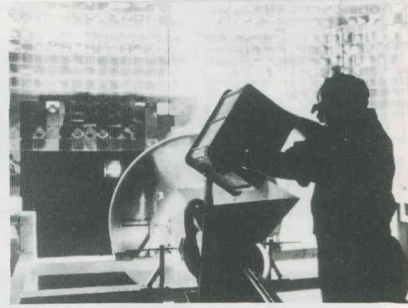
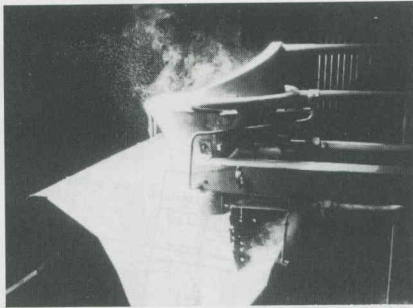
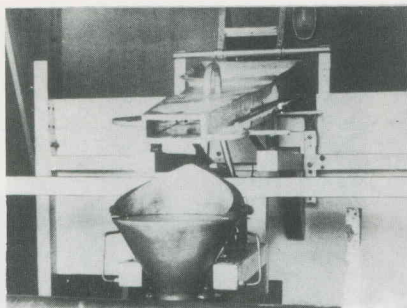


Fig. 33 - Dispositifs de fusion en tas et d'alimentation continue du produit à traiter.

Fig. 34 - Fusion-coulée et granulation en fonctionnement.

Fig. 35 - Chargement manuel d'un four à cavité fixe pendant une opération de fusion.

Fig. 36 - Opération de fusion-coulée à température contrôlée et débit fixé à l'aide du cylindre à cavité fixe.

Fig. 37 - Vue générale de la zone focale au cours d'un traitement de fusion de réfractaire.

Fig. 38 - Le four tournant à cavité (500 litres).

Fig. 39 - Le four tournant à cavité en fonctionnement au foyer; panaches de vapeur d'eau des circuits de réfrigération dans le faisceau focalisé.

Fig. 40 - Creuset de silice (340 kg) fondu dans le four tournant.

monoclinique précipité calciné mélangé avec différents ajouts stabilisants (chaux, magnésie, oxyde d'yttrium),

- production d'alumine de haute pureté à partir de l'oxyde obtenu par voie humide,
- production de matériaux céramiques à partir de mélanges de bauxites et de feldspath,
- synthèse d'alumine  $\beta$ ,
- synthèse de vitro-céramiques et de verres spéciaux

(vitro céramiques au titanate de baryum, verres à base d'hexacelsiane, verres du type Chemcor, verres à l'oxyde de vanadium).

En dehors de ces procédés, la purification de matériaux est considérée comme une application potentiellement attractive de ce type d'installation: dans certains cas, la valeur ajoutée est si élevée comparée au coût du matériau brut que la compétitivité peut être atteinte.

Par exemple il a pu être démontré avec l'installation d'Odeillo la possibilité de purifier:

- l'alumine de la pureté de 99,5 % à moins de 200 ppm d'impuretés totales,
- le quartz (cristal de roche) de 99,8 % de pureté initiale à moins de 100 ppm d'impuretés totales (un procédé ultérieur permettant d'obtenir la silice fondue).

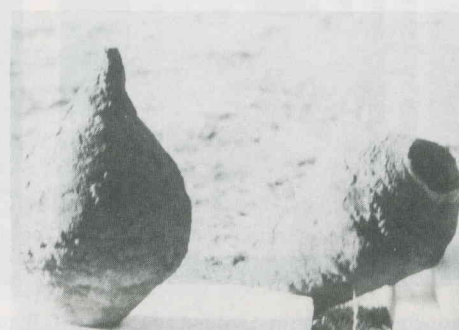
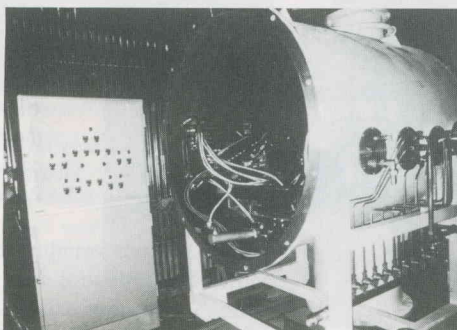
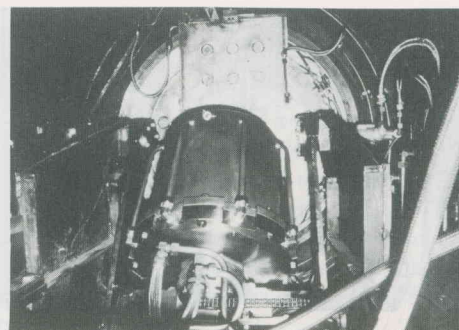
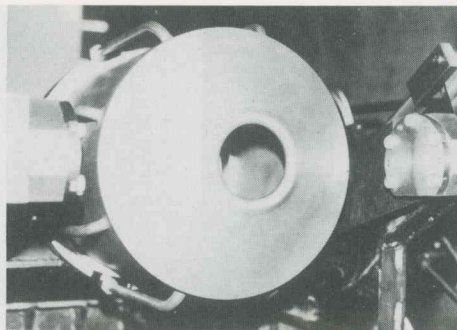
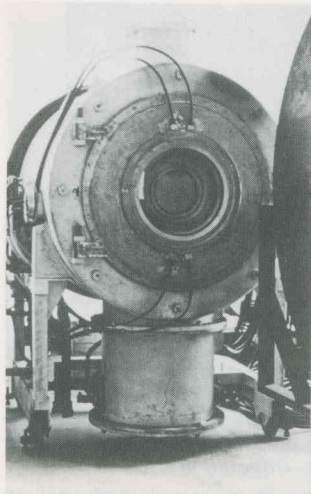
Ces deux procédés sont en cours d'étude, pour accroître les rendements horaires de production et les rendements thermiques, pour développer des applications industrielles rentables.

## 6.5 Applications du four solaire de 1 000 kWth d'Odeillo: traitement de minerais

Ce domaine, déjà largement abordé par des essais au four solaire de 50 kWth est repris actuellement, davantage d'ailleurs, sous l'aspect du génie chimique solaire [11] à mettre en œuvre pour ce type de traitements.

Par exemple, un programme, financé dans le cadre de l'Action Thématique Programmée «Thermo chimie et Génie Chimique Solaires» du PIRDES (Programme Interdisciplinaire de recherche et de développement de l'énergie solaire du CNRS), est en cours, portant sur l'étude et la mise au point d'une installation pilote ayant pour fonctions de permettre le chauffage d'un solide granulaire à plus de 800 °C avec transformation chimique et volatilisation partielle, alimentation et évacuation en continu de la phase solide, récupération des gaz de réaction et des condensats de volatilisation. Le cas particulier expérimental étudié





concerne le grillage de minéral de molybdénite et la volatilisation de l'oxyde de molybdène résultant, pour obtenir de l'oxyde pur, à partir de minéral à faible concentration.

#### 6.6 Applications du four solaire de 1000 kWth d'Odeillo: traitements de matériaux sous gaz inertes protecteurs

Quelques procédés de métallurgie extractive peuvent être réalisés avec des fours solaires sans dispositions particulières pour protéger les matériaux sous gaz inertes mais simplement à l'aide de flux de fusion de protection. Par exemple la possibilité d'extraire le chrome métallique de l'oxyde de chrome par réduction silico-thermique de l'oxyde a été démontrée dans un four tournant à cavité ouverte avec l'installation de Montlouis.

A l'opposé d'autres procédés métallurgiques nécessitent pour être réalisés l'utilisation d'atmosphères inertes ou réactives contrôlées (avec des teneurs faibles par exemple en  $N_2$ ,  $O_2$ ,  $H_2O$ ). C'est ainsi le cas de:

- l'extraction du chrome métallique par réduction du sesquioxyde de chrome par l'hydrogène [12], [13],
- la fusion et la coulée d'alliages de titane sous argon, pour produire des pièces de forme à partir d'éponge ou de copeaux.

Ces deux opérations ont été réalisées avec un four solaire de 2 kWth alors qu'un simple ballon de pyrex permet de résoudre le problème de l'atmosphère contrôlée, mais cela n'a pas été fait avec un grand four solaire.

Cependant, à l'occasion d'un autre programme, la démonstration a été faite qu'il est possible de réaliser des traitements sous atmosphère contrôlée avec un grand four solaire. Un four tournant étanche (fig. 41 à 46) a été conçu, réalisé et utilisé à l'intérieur d'une enceinte équipée d'une fenêtre de silice (quartz fondu) permettant au rayonnement

Fig. 41 - Enceinte à fenêtre de silice et sas pour la fusion-coulée sous atmosphère contrôlée.

Fig. 42 - Four tournant à circuit de réfrigération étanche pour la fusion-coulée sous atmosphère contrôlée.

Fig. 43 - Le four tournant à l'intérieur de son enceinte pour la fusion sous atmosphère contrôlée.

Fig. 44 - Vue générale arrière de l'enceinte ouverte avec son armoire de commande.

Fig. 45 - Creusets en bore fondus et mis en forme dans le four tournant sous argon.



de pénétrer dans le four à cavité pourvue d'une circulation de gaz.

Cet équipement a été utilisé avec succès pour fondre et couler du bore sous argon.

Il en serait de même pour la fusion et la coulée de certains borures, carbures, nitrures et alliages réfractaires qui pourraient être traités avec la même technique.

Des essais de pyrolyse flash ont pu être réalisés au four solaire de 1000 kW également sous atmosphère contrôlée [14].

En fait, il s'avère nécessaire qu'un effort de recherche appliquée soit encore consacré au problème technologique de l'atmosphère contrôlée autour de la zone focale des grandes installations à concentration, pour des applications industrielles potentielles de procédés chimiques en général.

#### 6.7 Applications du four solaire de 1000 kWth d'Odeillo: évaluations de matériaux, résistance aux chocs thermiques, mesures physiques

Ce domaine correspond à certaines caractéristiques spécifiques du rayonnement solaire focalisé et dans le cas de



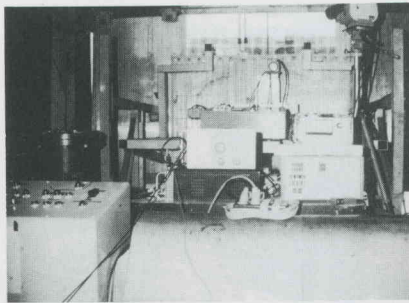
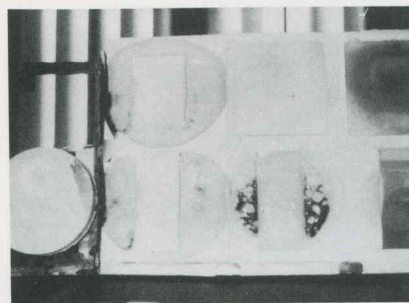
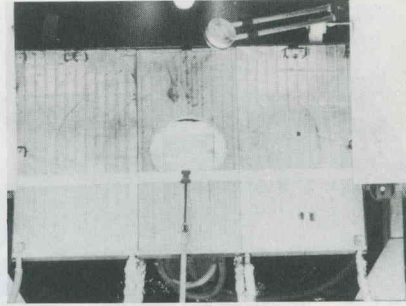
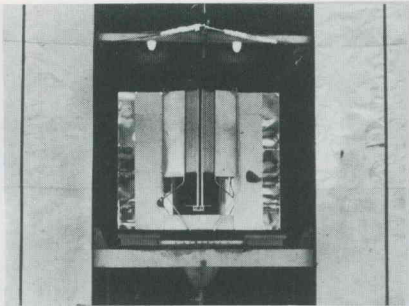
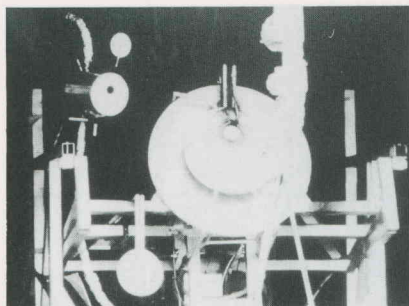


Fig. 47 - Obturateur rapide pour la programmation de chocs thermiques.

Fig. 48 - Dispositif d'essais pour chocs thermiques et mesures de performances radioélectriques sur échantillons de 2 pouces.

Fig. 49 - Série d'échantillons sur leur support après essais.

Fig. 50 - Vue arrière d'un banc d'essais de chocs thermiques.

Fig. 51 - Essai de choc thermique sur 2 briques (surface insolée 25 cm au carré), durée du cycle complet de montée en température 3 heures.

l'installation d'Odeillo à certains avantages particuliers du four solaire de 1 000 kW.

Des équipements annexes ont été conçus et réalisés, consistant en différents types d'obturateurs (dimensions, constante de temps) (fig. 47), offrant la possibilité de faire varier la puissance incidente au foyer, sur des cibles de dimensions variées soumises à des cycles thermiques couvrant un domaine de périodes allant de quelques secondes à quelques heures sous des densités de flux pouvant atteindre  $1\,600\text{ W/cm}^2$ .

De nombreuses recherches ont été réalisées [15], [16], [17], [18] avec le four d'Odeillo sur des matériaux pour des applications spatiales et stratégiques (fenêtres électromagnétiques, matériaux ablatifs) (fig. 47 à 51) ou civiles. Par exemple, des travaux dans ce domaine ont été réalisés ces dernières années pour l'évaluation des réfractaires pour la sidérurgie [19]. Les essais, réalisés sur ces matériaux avec le four solaire, ont mis en évidence plus de possibilités et de souplesse que dans le cas de n'importe quel autre moyen expérimental habituellement utilisé en laboratoire ou dans l'industrie.

L'évaluation de matériaux et les mesures physiques à moyennes et hautes températures sous flux radiatif, pour des applications solaires ou non, constituent une partie importante des applications de ce genre d'installation.

## 6.8 Applications du four solaire de 1 000 kWth d'Odeillo: essais de composants de centrales solaires

Ces quelques dernières années le four solaire d'Odeillo s'est avéré un outil de choix (niveau de puissance, souplesse d'utilisation, sûreté de fonctionnement, connaissance précise des performances) pour tester différents types de maquettes de chaudières pour des centrales solaires à tour pour la production d'énergie électrique: en 1976 une chaudière haute température, haute pression, à vapeur surchauffée [20], [21] a été testée pour l'Energy Research and Development Agency des USA (fig. 52); en 1976 et 1977 une «chaudière» à fluide caloporteur organique (fig. 53 à 55) a été testée, dans le cadre des activités du PIRDES en France sur la conversion thermodynamique de l'énergie solaire. Cette «chaudière» était reliée à une petite installation de conversion comprenant un stockage thermique, un générateur de vapeur et un turbo alternateur pour la production d'électricité. Le système fut connecté pour la première fois au réseau français en novembre 1976.

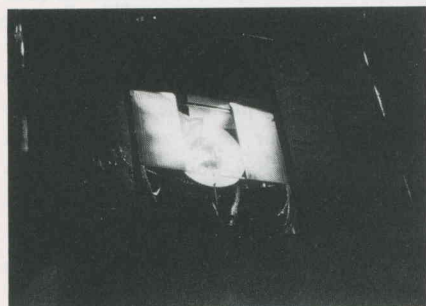


Fig. 52 - Chaudière à vapeur de l'ERDA en cours d'essai au foyer.

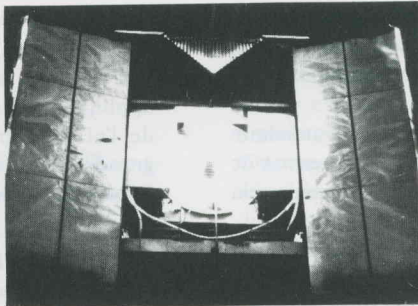


Fig. 53 - Chaudière PIRDES à Gilothem en fonctionnement.

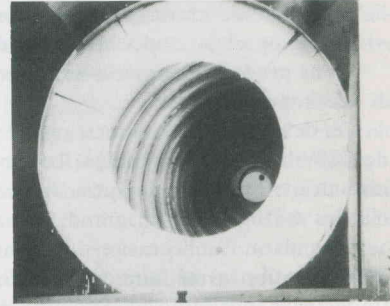


Fig. 54 - Chaudière PIRDES à Gilothem: vue rapprochée de l'intérieur de la cavité.



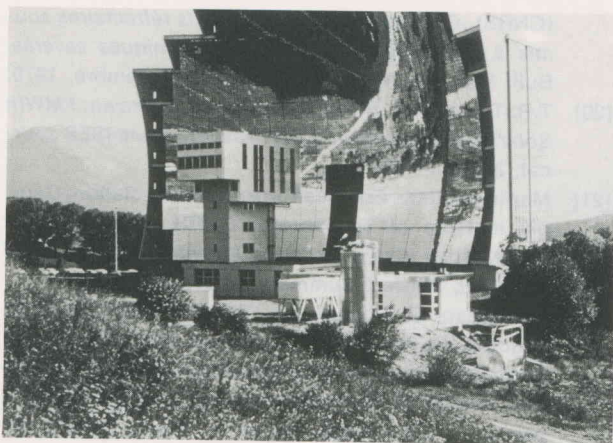


Fig. 55 - Au pied du concentrateur la petite centrale expérimentale du PIRDES pour la production d'électricité.

Ces essais de maquettes de chaudières sont très utiles pour démontrer la possibilité de faire fonctionner de telles chaudières avec du rayonnement solaire concentré, et pour évaluer leurs performances propres dans des conditions de fonctionnement solaire réel à une échelle significative.

Par exemple, un autre programme, financé dans le cadre de l'Action Thématique Programmée « Mécanique et Thermodynamique 1978 » du secteur Sciences Physiques pour l'Ingénieur et par une Action Spécifique du PIRDES, actuellement en cours, porte sur l'étude et les essais d'un système [11], [12] assurant à la fois la captation, le stockage et la restitution de chaleur « solaire » à 800 °C en faisant appel à un caloporteur solide granulaire : ce projet est couramment dénommé « chaudière à sable » ; il est susceptible à la fois d'applications énergétiques et d'applications chimiques.

## 7 CONCLUSION

En conclusion, et, dans une certaine mesure, en guise de synthèse à caractère prospectif, on peut dire qu'après avoir passé en revue particulièrement les applications du four solaire de 1 000 kWth, toutes les installations solaires thermiques d'essais existantes ont un rôle important évident à jouer dans l'exploration des possibilités d'utilisation de l'énergie solaire concentrée comme source renouvelable de chaleur à moyenne et haute température.

La tendance prédominante actuelle est de convertir cette chaleur en énergie électrique par conversion thermodynamique. Des installations pilotes sont en construction dans différents pays. Ces programmes permettent de développer une meilleure appréhension des possibilités de ces installations et des efforts souhaitables pour tenter d'abaisser les coûts des composants de ces installations pour rechercher la rentabilité et la compétitivité.

Cependant, et dans le même temps, il est nécessaire de consacrer de nombreux travaux pour établir, avec soin, les possibilités d'utilisation des futures installations pilotes de deuxième génération à concentration pour la chaleur industrielle. La fabrication de combustibles synthétiques, le stockage chimique, les traitements de matériaux, les procédés chimiques constituent une voie attractive pour l'utilisation de cette chaleur renouvelable à moyenne et haute température.

De nombreux procédés sont réalisables, un grand nombre d'entre eux restent encore à démontrer au niveau pilote de ces installations solaires thermiques d'essais.

Dans chaque cas, il y a un optimum à trouver quel que soit le type d'installation [23] (double ou simple réflexion) entre d'une part, les contraintes de cette source d'énergie thermique, les possibilités de ces installations et leurs coûts, et d'autre part, la valeur ajoutée résultant du traitement ou de la transformation effectués : les installations solaires thermiques d'essais à concentration ne devraient pas être à court de programmes d'essais.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] H. Connel PSL, *Large Scale Solar Energy Test facilities Proceedings*, national Science Foundation International Seminar, New Mexico State University, (november 18-19, 1974).
- [2] P. Lebeau, F. Trombe, *Les hautes températures et leurs utilisations en chimie*, Masson et Cie, Paris 1950.
- [3] Colloques Internationaux du CNRS, *Applications thermiques de l'énergie solaire dans le domaine de la recherche et de l'industrie*, Montlouis, 23-28 juin 1958, CNRS, Paris, 1961.
- [4] G. Chaudron, F. Trombe, *Les Hautes Températures et leurs utilisations en physique et en chimie*, Masson et Cie, Paris, 1973.
- [5] Journées d'Études d'Odeillo Font-Romeu, *Les Fours Solaires et les Fours à images*, 1-2 octobre 1971, Revue Internationale des Hautes Températures et des Réfractaires, 1973, t. 10, n° 4.
- [6] F. Trombe, A. Le Phat Vinh, C. Royere, *The French CNRS 1000 kW Solar Furnace: description, performance characteristics, present utilisations and perspectives*, in [1] op. cit.
- [7] Scientific American, *An early energy crisis*, (november 1977).
- [8] F. Trombe, L. Gion, C. Royere, J.F. Robert, *Traitement d'oxydes réfractaires au Four Solaire de 1000 kW du CNRS*, C.R. Acad. Sc Paris T272, pages 1971-1973, 14 juin 1972.
- [9] F. Trombe, L. Gion, C. Royere, J.F. Robert, *First Results obtained with the 1000 kW Solar Furnace*, Solar Energy, Vol. 15, pages 63-66, 1973.
- [10] F. Trombe, L. Gion, C. Royere, *Perfectionnement aux procédés et dispositifs de granulation et de sphéroidisation de matières, notamment de matières réfractaires*, Brevet ANVAR 2.098.951 du 14 février 1972.
- [11] C. Royere, *Solar Chemical Engineering research and test activities using the 1 MWth Solar Furnace at CNRS*, Solar Thermal Test Facilities Users Association, Facility operators and Experimenters Workshop, May 3-4 1979, Albuquerque NM, Proceedings pp. 24-29.
- [12] C. Royere, F. Trombe, *Étude au Four Solaire de la cinétique de réduction par l'Hydrogène du sesquioxyde de chrome pur ou dopé*, C.R. Acad. Sc. Paris, T 267, pages 1275-1278, 13 novembre 1968.
- [13] C. Royere, *Réduction des oxydes par l'hydrogène à Hautes températures. Application au sesquioxyde de chrome*, Rev. int. Htes Temp. et Réfrac. T. 10, pages 241-249, 1973.



- [14] M.J. Antal JR. Princeton University, C. Royere and A. Vialaron, CNRS Odeillo, France, *ACS Symposium series n° 130 thermal conversion of solid wastes and biomass*, pp. 237-255.
- [15] J.D. Walton, C. Royere, *Evaluating the thermal shock resistance of ceramics in a radiant thermal energy environment*, Sciences of Ceramics, 1973, p. 219-236.
- [16] E. Bilgen, C. Royere, *Transient Heat transfer at the Focal Plane of Solar Furnaces*, Fredericton, 26-30 mai 1975, Proceedings CANCAM, 1975.
- [17] D. Balageas, A. Sarremejeun, C. Royere, *High Temperature electrical evaluation of Slip-Cast, fused silica radome Using Solar Energy*, Office National d'Études et de Recherches Aérospatiales, 21-23 septembre, 1976.
- [18] B.A. Gordon, T.M. Knasel, M.D. Mr Donnel, R. Sievers, SAI S.H. Bomar GIT, C. Royere CNRS, *Design of a flux diverter and containment tube with results of tests at ACTF and CNRS, Presented at AS/ISES 1980, Annual Meeting*.
- [19] J.P. Carrie et H. Le Doussal (SFC), M. Chastant, L. Halm et M. Jon (IRSID), C. Royere et J.L. Tuhault (CNRS), *Comportement des produits réfractaires soumis à des sollicitations thermomécaniques sévères*, Bull. Soc. Fr. Ceram, n° 124, juillet-septembre, 1979.
- [20] T.R. Tracey, F.A. Blake, C. Royere, C.T. Brown, *1 MWth Solar steam generator. Solar Test Program*, ISES Journal, 30 avril 1977.
- [21] Martin Marietta, Engineering experiment station, Georgia Institute of Technology, CNRS, *1 MWth Bench Model Solar Cavity receiver Steam Generator Build and Test*, Phase 3 summary report june 1977.
- [22] A. Hassan, C. Royere, J.L. Tuhault, LES CNRS/ C. Laguerie, M. Peyman IGC Toulouse, *Evaluation of multistage fluidized bed heat exchanger to transfer thermal energy at high temperature to a gas from a granular solid storage heated by concentrated solar radiation*, Proceedings of annual meeting STTFUA, april 15-17, 1980, Las Cruces NM, pp. 145-156.
- [23] C. Royere, *Temperature limitations of solar point focussing facilities: optimization of cavity receivers*, Solar Thermal Test Facilities Users Association, april 11-12, 1978, Golden Co, Proceedings of annual meeting p. 79-90.