



JUN 12 1961

Distr.  
LIMITEEE/CONF.35/S/35/SUMMARY  
19 mai 1961  
FRANCAIS/ANGLAIS  
ORIGINAL: FRANÇAIS

UN/SA COLLECTION  
UNITED NATIONS  
CONFERENCE  
ON NEW SOURCES  
OF ENERGY

CONFÉRENCE  
DES NATIONS UNIES  
SUR LES SOURCES NOUVELLES  
D'ÉNERGIE

SOLAR ENERGY, WIND POWER AND GEOTHERMAL ENERGY

ÉNERGIE SOLAIRE, ÉNERGIE ÉOLIENNE ET ÉNERGIE GÉOTHERMIQUE

Point de l'ordre du jour/Agenda item:

III.F -

Application de l'énergie solaire aux opérations à haute température  
(fours solaires) -  
Matériel, recherche, utilisations possibles

Use of solar energy for high temperature processing (solar furnaces) -  
Equipment - research - potential uses

CONDITIONS DE TRAITEMENT ET MESURES PHYSIQUES  
DANS LES FOURS SOLAIRES

Par F. TROMBE, M. FOEX et Ch. Henry La BLANCHETAIS  
Laboratoire de l'énergie solaire du Centre national  
de la recherche scientifique, Montlouis, Pyrénées-Orientales, France

TREATMENT CONDITIONS AND PHYSICAL MEASUREMENTS  
IN SOLAR FURNACES

By F. TROMBE, M. FOEX and Ch. Henry La BLANCHETAIS  
Laboratory of Solar Energy, National Centre  
for Scientific Research, Montlouis, Pyrénées-Orientales, France

PAPERS HAVE BEEN CONTRIBUTED TO THE UNITED NATIONS CONFERENCE ON NEW SOURCES OF ENERGY BY INVITATION AND ARE FOR DISTRIBUTION AS WORKING PAPERS FOR THAT CONFERENCE. THEY ARE PUBLISHED AS PRESENTED BY THE AUTHORS, AND THE CONTENTS AND THE VIEWS EXPRESSED ARE THOSE OF THE AUTHORS.

(See notes overleaf)

LES AUTEURS ONT PRÉSENTÉ SUR INVITATION À LA CONFÉRENCE DES NATIONS UNIES SUR LES SOURCES NOUVELLES D'ÉNERGIE DES MÉMOIRES QUI SERONT DISTRIBUÉS COMME DOCUMENTS DE TRAVAIL DE LA CONFÉRENCE. CES MÉMOIRES SONT PUBLIÉS TELS QUE LES AUTEURS LES ONT RÉDIGÉS ET LES VUES QU'ILS CONTIENNENT SONT CELLES DES AUTEURS.

(Voir notes au verso)

## N O T E S

1. The working languages of the Conference are English and French. All papers contributed are reproduced in one or other of these two languages. Where a paper has been reproduced in both working languages for the convenience of a rapporteur, both language versions are provided as part of the Conference documentation.

2. Where any paper has been contributed in one of the official languages of the UN other than English or French, then it has been made available to the conference in that language. A translation of such papers in either English or French (according to the request of the relevant rapporteur) is provided.

3. Summaries of all papers, as presented by the authors, will be available in both working languages—English and French. Summaries will not include diagrams and photographs and should be read in conjunction with the paper proper, which will bear the same reference number as the summary.

4. Papers and summaries will not be generally available for distribution to other than participants and contributors to the Conference until after the Conference, under publication arrangements to be announced.

1. Les langues de travail de la Conférence sont l'anglais et le français. Tous les mémoires présentés sont reproduits dans l'une ou l'autre de ces deux langues. Lorsqu'un mémoire est reproduit dans les deux langues de travail sur la demande d'un rapporteur, la version anglaise et la version française du mémoire font toutes deux parties de la documentation de la Conférence.

2. Lorsqu'un mémoire est présenté dans une langue officielle de l'ONU autre que l'anglais ou le français, il est publié dans cette langue. Les mémoires appartenant à cette catégorie sont en outre publiés en traduction anglaise ou française (selon la demande du rapporteur chargé du sujet considéré).

3. Des résumés de tous les mémoires, établis par les auteurs eux-mêmes, seront publiés dans les deux langues de travail: anglais et français. Les résumés ne contiendront ni diagrammes ni photographies, et il conviendra de les rapprocher du mémoire lui-même, qui portera le même numéro de référence que le résumé.

4. Les mémoires et les résumés ne pourront en général être distribués à des personnes autres que les participants et les auteurs qu'après la Conférence et selon des modalités de publication qui seront annoncées ultérieurement.

CONDITIONS DE TRAITEMENT ET MESURES PHYSIQUES DANS  
LES FOURS SOLAIRES

par F. TROMBE, M. FOËX et Ch. HENRY LA BLANCHETAIS

Laboratoire de l'Energie Solaire du Centre National de la Recherche Scientifique  
Montlouis - France

---

Résumé

Introduction.

1. a) Le choix du mode de traitement d'une substance au foyer d'un appareil concentrant de l'énergie provenant d'une source à haute température dépend des caractéristiques de la substance traitée et des conditions dans lesquelles elle reçoit le rayonnement.
- b) Pour la concentration de l'énergie solaire, les systèmes utilisés comportent le plus souvent un dispositif plan orienteur éclairant un miroir parabolique fixe ; l'axe de ce dernier peut, suivant les utilisations envisagées, être vertical, horizontal ou incliné. Il peut être utile aussi d'employer des miroirs présentant un développement dissymétrique de leur surface réfléchissante pour conserver une densité d'énergie élevée sur la surface réceptrice, si celle-ci est inclinée par rapport à l'axe focal. De même, lorsqu'il s'agit de chauffer un cylindre, on peut avoir intérêt, pour obtenir la concentration d'énergie maximum, à développer le diamètre

apparent D de la surface parabolique au-delà de la valeur  $4 f$  ( $f =$  distance focale).

c) Les caractères de la substance à traiter, qui interviennent, sont à la fois d'ordre thermique et d'ordre optique.

i) La substance doit présenter un facteur d'absorption maximum pour le rayonnement utilisé et des facteurs de réflexion et de transmission minima. Ces facteurs, d'autre part, varient avec la température obtenue sur la substance.

ii) Le facteur d'absorption d'une substance réfléchissante peut être très amélioré en augmentant son état de division ou encore en le plaçant dans une enceinte corps noir.

iii) Les facteurs d'ordre thermique qui interviennent sont la chaleur spécifique et la conductibilité thermique ; cette dernière doit être aussi faible que possible. On peut la diminuer considérablement en augmentant l'état de division des substances.

### Traitements directs.

2. a) La substance à traiter est placée directement au "foyer" du système convergent. Si l'axe du système est vertical et la convergence réalisée du haut vers le bas, on peut ainsi traiter en surface des produits pulvérulents ou fragmentés reposant sur eux-mêmes dans un creuset qui reste froid. Ces produits peuvent être portés à haute température sans contamination.

b) Le traitement direct peut être effectué sur une substance soumise à un déplacement latéral, on obtient ainsi un renouvellement de la surface traitée et la formation de barres fondues ou frittées de longueur indéfinie. Le rendement de l'opération est amélioré.

- c) Le traitement direct peut être fait avec une installation à axe horizontal sur une surface cohérente, par exemple frittée.
- d) Le traitement direct peut être fait avec apport continu de matière sur une surface fondue dont la partie sous-jacente se solidifie progressivement.
- e) On peut calculer le temps  $t$  nécessaire pour porter à une température  $\theta$  une substance soumise à un éclairement énergétique donné :

$$\theta = \frac{2 \Phi}{\sqrt{\pi \lambda c \rho}} \sqrt{t}$$

$\Phi$  = éclairement énergétique

$\lambda$  = conductibilité thermique

$c$  = chaleur spécifique

$\rho$  = densité.

Cette formule est valable pour le corps noir. Pour les corps non noirs, la valeur de  $\Phi$  est à multiplier par leur facteur d'absorption. On a, pour la fusion de la zircone, à 2700°, un temps  $t$  de 7 secondes en accord avec les résultats expérimentaux. Pour les métaux plus conducteurs, les temps sont plus élevés.

### Traitement en cavité.

3. a) i) La matière est placée dans une cavité fixe ou tournante qui reçoit le rayonnement convergent par un orifice de surface aussi faible que possible. A l'intérieur de cette cavité, les réflexions internes permettent une bonne absorption de l'énergie. Cette disposition est particulièrement favorable pour un traitement des substances réfléchissantes qui sont malaisées à porter à haute température par chauffage direct.
- ii) L'homogénéité de température dans les cavités chauffées par rayonnement solaire dépend normalement de la nature des

parois et du rapport entre la surface de l'orifice d'accès du rayonnement et la surface interne de la cavité. Un orifice de faible surface et une grande surface interne donnent des effets "corps noir" très marqués. Pour les substances présentant un coefficient d'absorption du rayonnement solaire supérieur à 10 à 20 %, on peut augmenter la surface relative de l'orifice d'accès du rayonnement.

- iii) Au fur et à mesure que la température de la cavité s'élève, l'énergie qu'elle rayonne devient, pour une même énergie incidente, de plus en plus considérable.
- iv) La forme du four a également une grande importance, la paroi opposée à l'orifice étant ou non fortement éclairée suivant la profondeur du four.
- v) Le facteur d'émission des substances augmentent, en général, avec la température, les pertes d'énergie sont plus élevées que celles que l'on pourrait déduire de la loi du rayonnement du corps noir en fonction de la température.

b) Fours tournants dits fours centrifuges.

- i) Pour ces fours, constitués par des cavités cylindriques tournant autour de l'axe du cylindre, la vitesse est suffisamment grande pour que l'accélération centrifuge l'emporte sur les forces de gravité. Les substances sont maintenues sur les parois du cylindre et reçoivent le rayonnement solaire par un orifice axial. Les parois de la cavité sont refroidies par jet d'eau. Les fours centrifuges permettent de traiter les substances les plus diverses en profitant des deux avantages conjugués du traitement sans creuset, c'est à dire sans contamination et du traitement en cavité.

- ii) Les parois des fours centrifuges doivent être constituées de métaux bons conducteurs de la chaleur. L'aluminium et le cuivre, par exemple, résistent mieux que les aciers réfractaires, particulièrement à l'orifice des fours.
- iii) Les caractéristiques des fours centrifuges dépendent de l'usage que l'on désire en faire. Comme pour les traitements en cavité, les rapports profondeur/diamètre ont une grande importance.
- iv) Les fusions au four centrifuge s'effectuent, le plus souvent sans grande surchauffe du produit fondu, le produit sous-jacent, par sa fusion progressive, absorbant, en général, les calories apportées.
- v) Dans les opérations au four centrifuge, la cavité centrale dans le cas le plus général, augmente avec le temps de traitement, l'épaisseur du calorifuge diminuant parallèlement.
- vi) Les brassages des produits fondus peuvent être obtenus par simple variation de la vitesse de rotation.
- vii) Pour éviter l'agrandissement exagéré de la cavité centrale, on peut recharger le four en cours d'opération.
- viii) La vitesse de fusion, relativement lente au début, croît, passe par un maximum et s'annule après un certain nombre d'heures de travail.
- ix) Les fours centrifuges sont d'une utilisation très générale pour les composés oxygénés, halogénés ou même les métaux en réalisant un isolement thermique convenable des parois de la cuve.

#### Essais en atmosphère conditionnée.

4. a) Les essais en atmosphère conditionnée nécessitent l'emploi de parois transparentes au rayonnement solaire. Différents types de verres peuvent être utilisés, en particulier le verre Pyrex et le verre de silice. Le Pyrex laisse passer 85 % de l'énergie solaire et supporte un éclairage énergétique de l'ordre de 20 watts/cm<sup>2</sup>. La silice vitreuse laisse passer 89 % et supporte un éclairage énergétique de 500 watts/cm<sup>2</sup>. Pratiquement, en raison de condensations possibles, on prendra 5 et 50 watts/cm<sup>2</sup> comme densités énergétiques limites.
- b) i) Diverses matières plastiques peuvent également convenir, mais les densités d'énergie sur leur surface doivent être plus faibles que pour les verres. Les matières plastiques sont plus utilisables pour les atmosphères conditionnées sous pression normale que sous vide.
- ii) Une méthode très commode pour opérer en atmosphère conditionnée sous la pression atmosphérique consiste à utiliser des tubes en matière plastique très mince gonflés par une faible surpression interne.
- c) Les parois transparentes en verre ou en silice <sup>sont</sup> souvent obscurcies par des dépôts provenant de la volatilisation des produits traités. Il a été remarqué que ces dépôts se forment surtout dans les zones où n'intervient pas le rayonnement convergent. Il a été montré, par diverses expériences, qu'il s'agissait d'un phénomène de photophorèse positive.



Mesures physiques.

5. a) Mesure de l'énergie utilisable.

Cette mesure est faite à l'aide d'un calorimètre corps noir à circulation d'eau.

b) Mesures de température.

Voir communication de M. FOËX à cette même conférence.

c) Mesures de chaleurs spécifiques.

Une méthode calorimétrique a été expérimentée jusqu'à 2300° C.

d) Etudes dilatométriques.

La mesure de l'allongement d'un échantillon, chauffé dans un four corps noir, est réalisée par une méthode optique.

Combinaison de l'énergie solaire et d'une autre forme d'énergie.

6. Différents types d'apport d'énergie sont envisagés ; flammes, générateurs à plasma, bombardement électronique, induction haute fréquence

# TREATMENT CONDITIONS AND PHYSICAL MEASUREMENTS IN SOLAR FURNACES

By

F. TROMBE, M. FOEX and Ch. HENRY LA BLANCHETAIS

Laboratory of Solar Energy, National Centre for Scientific Research,  
Montlouis, France

## SUMMARY

### Introduction

1. (a). The choice of the method of treating a substance at the focus of a device concentrating energy from a high-temperature source depends on the characteristics of the substance treated, and on the conditions under which it receives the radiation.

(b). For concentrating solar energy, the systems employed most often comprise a plane orienting system illuminating a fixed parabolic mirror whose axis may be vertical, horizontal or inclined, according to the intended uses. It may also be useful to employ mirrors with bisymmetrically developed reflecting surface, in order to maintain a high density of energy on the receiving surface, if that surface is inclined with respect to the optical axis. Similarly, when a cylinder is to be heated, it may be desirable, in order to obtain the maximum energy concentration, to develop the apparent diameter  $D$  of the parabolic surface beyond the value  $4f$  ( $f$  = focal distance).

(c). The relevant characteristics of the substance to be treated are both thermal and optical.

(i) The substance must have a maximum absorption factor for the radiation employed and minimum reflection and transmission factors. These factors, on the other hand, vary with the temperature to which the substance is raised.

(ii) The absorption factor of a reflecting substance may be very much improved by increasing its degree of division, or by placing it in a blackbody enclosure.

### Direct Treatments

2. (a). The substance to be treated is placed directly at the "focus" of the convergent system. If the axis of the system is vertical and the convergence is downward, this method may be used for surface treatment of powdered or fragmented products resting on similar material in a crucible which remains cold. Such products may be brought to a high temperature without contamination.

(b). A substance subjected to lateral displacement may be given direct treatment. In this way the treated surfaces is renewed and fused, or fritten bars of indefinite length are obtained. The efficiency of the operation is improved.

(c). Direct treatment may be given, with an installation having a horizontal axis, to a coherent surface, fritted for instance.

(d). Direct treatment may be accomplished with continuous addition of new material onto a molten surface whose underlying portion is progressively solidifying.

(e). The time  $t$  necessary to bring to a temperature  $\theta$  a substance subjected to a given irradiancy may be calculated as follows :

$$\theta = \frac{2\phi}{\sqrt{\pi\lambda c\rho}} \sqrt{t}$$

where  $\phi$  is the irradiancy,  
 $\lambda$  the thermal conductivity,  
 $c$  the specific heat, and  
 $P$  the density.

This formula is valid for a blackbody. For a non-blackbody, the value of  $\phi$  must be multiplied by the absorption factor. For the fusion of zirconia at 2700°C, this formula gives a time  $t$  of 3 seconds, in agreement with the experimental results. For metal with higher conductivity, these times are longer

### Treatment in a cavity

3. (a) (i) The material is placed in a fixed or rotating cavity which receive the convergent radiation through an aperture of the smallest possible area. The internal reflections inside this cavity permit good absorption of the energy. This arrangement is especially favourable for treating reflecting substances, which are hard to bring up to high temperatures by direct heating.
- (ii) The homogeneity of the temperature in cavities heated by solar radiation normally depends on the nature of the walls, and on the ratio between the area of the radiation-access aperture and the area of the internal surface of the cavity. An aperture of small area and a large internal area give very marked "blackbody" effects. For substances with an absorption coefficient of over 10 to 20% for solar radiation, the relative area of the radiation-access aperture may be increased.
- (iii) As the temperature of the cavity rises, the energy radiated by it at given incident energy becomes greater and greater.

- (iv) The shape of the furnace is likewise very important, since the wall facing the aperture is strongly irradiated or not, according to the depth of the furnace.
  - (v) The emission factor of a substance, as a rule, increases with its temperature, so that the energy losses are higher than would follow from the law of blackbody radiation as a function of temperature.
- (b). Rotating furnaces, called centrifugal furnaces.
- (i) For these furnaces, which consist of cylindrical cavities rotating about the axis of the cylinder, the velocity is sufficiently high for the centrifugal acceleration to exceed the gravitational forces. The material is thus held against the walls of the cylinder and receives the solar radiation through an axial aperture. The cavity walls are cooled by water jets. Centrifugal furnaces may be used to treat the most varied substances, profiting by the two associated advantages of treatment without a crucible - that is to say, without contamination - and of treatment in a cavity.
  - (ii) The walls of a centrifugal furnace must be made of a metal that is a good heat conductor. For example, aluminium and copper are more resistant than refractory steels, especially at the furnace aperture.
  - (iii) The characteristics of centrifugal furnaces depend on the desired use. As for treatments in a cavity, the depth/diameter ratio is very important.
  - (iv) Melting in a centrifugal furnace is most often accomplished without great superheating of the molten product, since the underlying product, by reason of its progressive fusion, generally absorbs the excess heat transferred to it.
  - (v) In centrifugal furnace operations, the central cavity, in the most general case, becomes larger with time of treatment, and the thickness of the thermal insulation decreases accordingly.
  - (vi) A molten product can be mixed by merely changing the rate of rotation.
  - (vii) To prevent excessive enlargement of the central cavity, the furnace may be charged during operation.
  - (viii) The rate of fusion is relatively slow at first. It then rises, passes through a maximum, and falls to zero after a certain number of hours of operation.

- (ix) The centrifugal furnaces are of very general applicability for oxygen compounds, halogen compounds, and even for metals, provided the walls of the melting chamber are properly insulated.

#### Controlled atmosphere experiments

4. (a). Experiments in a controlled atmosphere require the use of walls transparent to solar radiation. Various types of glass may be used, especially Pyrex and silica glass. Pyrex passes 85% of the solar energy and maintains an irradiancy of the order of 20 watts/cm<sup>2</sup>. Silica glass passes 89% and maintains an irradiancy of 500 watts/cm<sup>2</sup>. Practically, owing to the possible condensation, 5 and 50 watts/cm<sup>2</sup> are taken as the limiting energy densities.

(b). (i) Various plastics may likewise be suitable, but the energy densities on their surface must be lower than for glass. Plastics are more usable for controlled atmospheres under normal pressure than in vacuum work.

(ii) A very convenient method for operating in a controlled atmosphere at atmospheric pressure makes use of very fine plastic tubes inflated by a slight internal overpressure.

(c). Transparent walls of glass or quartz are often darkened by deposits due to the volatilization of the products treated. It has been noted that these deposits are formed primarily in zones not subjected to the convergent radiation. Various experiments have shown this to be due to a phenomenon of positive photophoresis.

#### Physical measurements

4. (a). Measurement of useful energy.

This measurement is performed by the aid of a blackbody calorimeter with water circulation.

(b). Temperature measurements.

See the paper presented by M. Foex to this Conference.

(c). Specific heat measurements.

A calorimetric method has been tried up to 2300°C.

(d). Dilatometric studies.

The elongation of a specimen heated in a blackbody furnace is measured by an optical method.

#### Combination of solar energy and another form of energy.

6. Various types of energy contributions are envisaged : flames, plasma generators, electron bombardment, high-frequency induction.

