



TOGETHER
for a sustainable future

OCCASION

This publication has been made available to the public on the occasion of the 50th anniversary of the United Nations Industrial Development Organisation.



TOGETHER
for a sustainable future

DISCLAIMER

This document has been produced without formal United Nations editing. The designations employed and the presentation of the material in this document do not imply the expression of any opinion whatsoever on the part of the Secretariat of the United Nations Industrial Development Organization (UNIDO) concerning the legal status of any country, territory, city or area or of its authorities, or concerning the delimitation of its frontiers or boundaries, or its economic system or degree of development. Designations such as “developed”, “industrialized” and “developing” are intended for statistical convenience and do not necessarily express a judgment about the stage reached by a particular country or area in the development process. Mention of firm names or commercial products does not constitute an endorsement by UNIDO.

FAIR USE POLICY

Any part of this publication may be quoted and referenced for educational and research purposes without additional permission from UNIDO. However, those who make use of quoting and referencing this publication are requested to follow the Fair Use Policy of giving due credit to UNIDO.

CONTACT

Please contact publications@unido.org for further information concerning UNIDO publications.

For more information about UNIDO, please visit us at www.unido.org

08054-F-08072-F

ORGANISATION DES NATIONS UNIES POUR LE DEVELOPPEMENT INDUSTRIEL

Série "Mise au point et transfert des techniques"

N° 5

414

**TECHNIQUES
D'UTILISATION
DE L'ENERGIE
SOLAIRE**



NATIONS UNIES

ORGANISATION DES NATIONS UNIES POUR LE DEVELOPPEMENT INDUSTRIEL
Vienne

Série "Mise au point et transfert des techniques"
Numéro 5

TECHNIQUES D'UTILISATION DE L'ENERGIE SOLAIRE



NATIONS UNIES
New York, 1980

Les appellations employées dans cette publication et la présentation de données qui y figurent n'impliquent de la part du Secrétariat de l'Organisation des Nations Unies aucune prise de position quant au statut juridique de tel ou tel pays, territoire, ville ou région, ou de ses autorités, ni quant au tracé de ses frontières.

La mention dans le texte de la raison sociale ou des produits d'une société n'implique aucune prise de position en leur faveur de la part de l'ONUDI.

La reproduction, en tout ou en partie, du texte de la présente publication est autorisée. L'Organisation souhaiterait qu'en pareil cas il soit fait mention de la source et qu'elle soit communiquée un exemplaire de l'ouvrage où sera reproduit l'extrait cité.

Préface

La crise de l'énergie a fait ressortir le besoin de conserver les sources classiques d'énergie et, en même temps, d'explorer des sources nouvelles telles que le rayonnement solaire, les vents, la biomasse, les marées, la géothermie, etc. Il n'y a pas de raison pour que ces importantes ressources naturelles ne soient pas exploitées dans l'intérêt des pays en développement, notamment le rayonnement solaire qui est relativement abondant dans la plupart de ces pays. Une activité coordonnée pour l'exploitation des énergies nouvelles aiderait beaucoup les pays en développement à atteindre leur objectif : élever leur part de la production industrielle mondiale à 25 % avant l'an 2000. Conformément à une recommandation de la Table ronde ministérielle sur la coopération industrielle et technique entre pays en développement, réunie à New Delhi en janvier 1977, le rôle de l'Organisation des Nations Unies pour le développement industriel (ONUDI) consisterait à lancer des programmes de coopération pour la recherche appliquée et l'amélioration dans le secteur énergétique de l'industrie, en ayant recours à l'équipement et aux ressources humaines dont disposent déjà les pays en développement.

La présente publication traite des techniques d'exploitation de l'énergie solaire dans l'intérêt des pays en développement. On espère que, grâce aux progrès continus de cette technologie, l'énergie solaire pourra satisfaire non seulement les besoins évidents de l'industrie, mais aussi les besoins quotidiens de la population des zones rurales et écartées de ces pays. Cette publication reproduit essentiellement des communications présentées à la Réunion d'un groupe d'experts sur l'évaluation des techniques actuelles d'utilisation de l'énergie solaire et des possibilités de fabrication de matériel utilisant cette énergie dans les pays en développement, organisée par l'ONUDI en coopération avec l'Agence solaire et spatiale autrichienne (ASSA) et tenue à Vienne du 14 au 18 février 1977¹. En outre, elle contient des renseignements recueillis par l'ONUDI grâce à ses contacts dans de nombreux pays, industrialisés ou en développement. Du fait, d'une part, de la complexité de la technologie de l'énergie solaire et, d'autre part, du rythme accéléré des recherches et améliorations dans maintes parties du monde, le sujet n'a pas pu être traité de manière exhaustive. Néanmoins, en tant que premier pas de l'ONUDI sur ce terrain, cette publication devrait considérablement aider les gouvernements des pays en développement intéressés à prendre connaissance des tendances les plus récentes de la technologie solaire et à jeter les bases d'une action nationale.

La première partie contient deux articles : un programme d'action recommandé en vue de l'exploitation de l'énergie solaire dans les pays en développement, rédigé à l'ONUDI par le Conseiller interrégional principal pour les industries mécaniques; une synthèse de l'utilisation de l'énergie solaire dans les pays en développement, rédigée pour l'ONUDI par un consultant. La deuxième partie donne un aperçu des travaux effectués dans quelques pays et institutions. La troisième partie contient dix-sept communications techniques sur la conversion de l'énergie solaire en énergie mécanique ou électrique, les capteurs solaires, l'utilisation de l'énergie solaire pour le chauffage, la réfrigération, la distillation, le séchage et la cuisson et le transfert des techniques.

Dans tout le volume, les vues exprimées sont celles des auteurs et elles ne reflètent pas nécessairement les opinions du Secrétariat de l'ONUDI.

Dans le contexte de la prochaine Conférence des Nations Unies sur la science et la technique au service du développement, qui aura lieu à Vienne en août et septembre 1979, plusieurs pays en développement portent leur attention sur les applications de la technologie pour satisfaire certains de leurs besoins énergétiques. La présente étude – ainsi que d'autres qui seront préparées par l'ONUDI – est conçue comme une contribution à la Conférence et à ses activités préparatoires.

¹ Les recommandations de la Réunion figurent à l'annexe I, page 153.

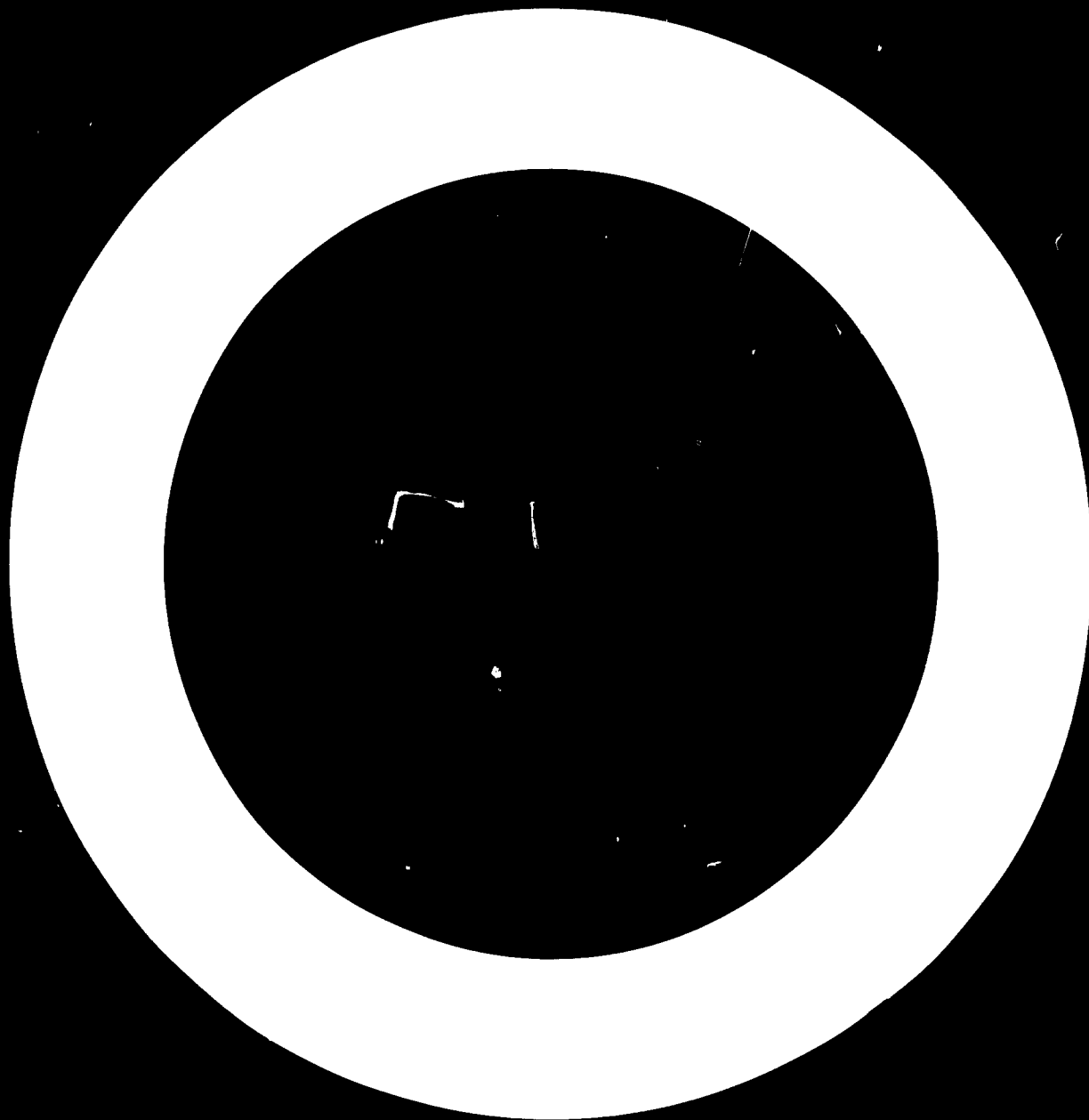


TABLE DES MATIERES

Première partie

Utilisation de l'énergie solaire dans les pays en développement

| | <i>Pages</i> |
|---|--------------|
| Energie solaire : Programme d'action recommandé pour les pays en développement <i>Secrétariat de l'ONUDI</i> | 3 |
| Développement de l'utilisation de l'énergie solaire dans les pays en développement <i>Assad Takla</i> | 7 |

Deuxième partie

Aperçus des programmes solaires de certains pays et organismes

| | |
|-------------------------------|----|
| Programmes nationaux | 43 |
| Programmes d'organismes | 50 |

Troisième partie

Sélection de communications techniques sur l'utilisation de l'énergie solaire

| | |
|---|----|
| Une centrale électrique de 10 kW <i>Hans Kleinrath</i> | 55 |
| Conversion de l'énergie solaire en énergie mécanique ou électrique : Inde <i>V. G. Bhide</i> | 57 |
| Utilisation de l'énergie solaire dans le développement des zones arides : pompes à eau solaires <i>Jean Paul Durand, Max G. Clemot, J. Pierre Girardier et Marc Y. Vergnet</i> | 64 |
| Conditions théoriques pour obtenir le maximum d'énergie du soleil <i>Kamal-Edin Hassan</i> | 67 |
| Capteurs plans <i>A. A. M. Sayigh</i> | 69 |
| Piscines à chauffage solaire <i>Gangolf Bräunlich</i> | 75 |
| Un équipement solaire pour serres <i>M. Posnansky</i> | 78 |
| Fours solaires de séchage du bois : leur intérêt pour les pays en développement <i>R. A. Plumptre</i> | 81 |
| Réfrigération solaire <i>Erich A. Farber</i> | 92 |

| | <i>Pages</i> |
|---|--------------|
| Chauffage et rafraîchissement solaires des locaux et chauffe-eau solaires <i>V. G. Bhide</i> | 95 |
| Données préliminaires pour une maison solaire à Riyad <i>A. A. M. Sayigh et E. M. A. El-Salam</i> | 104 |
| Réfrigération solaire dans les pays en développement <i>A. Eggers-Lura</i> | 110 |
| Distillation solaire : Etat des connaissances <i>B. W. Teimat</i> | 116 |
| Distillation solaire de l'eau <i>Carlo Mustacchi et Vincenzo Cena</i> | 123 |
| Perspectives des séchoirs agricoles solaires dans les régions en développement <i>T. A. Lawand</i> | 129 |
| Perspectives de la cuisson solaire dans les régions en développement <i>T. A. Lawand</i> | 137 |
| Evaluation des applications solaires en vue du transfert de techniques <i>Jyoti K. Parikh</i> | 142 |

Annexes

| | |
|---|-----|
| I. Recommandations de la réunion du Groupe d'experts sur l'évaluation des techniques actuelles d'utilisation de l'énergie solaire et des possibilités de fabrication de matériel utilisant cette énergie dans les pays en développement | 153 |
| II. Projets en cours de l'AIE touchant l'énergie solaire | 156 |
| III. Systèmes d'information sur l'énergie solaire | 158 |
| IV. Organismes s'intéressant à l'énergie solaire | 161 |

NOTES EXPLICATIVES

Sauf indication contraire, le terme dollar s'entend du dollar des Etats-Unis d'Amérique.

La barre transversale (/) entre deux millésimes, par exemple 1970/71, indique une campagne agricole, un exercice financier ou une année scolaire.

Le trait d'union (-) entre deux millésimes, par exemple 1960-1965, indique qu'il s'agit de la période tout entière, y compris la première et la dernière année mentionnées.

Sauf indication contraire, le terme "tonne" désigne une tonne métrique.

Les notes ci-après s'appliquent aux tableaux :

Trois points (...) indiquent soit que l'on ne possède pas de renseignements, soit que les renseignements en question n'ont pas été fournis séparément;

Le tiret (-) indique que le montant est nul ou négligeable;

Un blanc indique que la rubrique est sans objet dans le cas considéré.

En plus des règles, abréviations, symboles et termes habituels, on trouvera aussi dans la présente publication .

Abréviations et symboles techniques

(avec équivalents approximatifs)

| | |
|-----------|--|
| mil | millième de pouce |
| in. | pouce (1 in. = 2,54 cm) |
| tr/mn | tours par minute |
| hp | cheval-vapeur (1 hp = 746 W) |
| atm | atmosphère (1 atm = 1,013 bar) |
| bd ft | unité de volume de bois (1 bd ft = 2 360 cm ³) |
| gpm | gallon (Etats-Unis) par minute (1 gpm = 0,063 l/s) |
| psi | livre par pouce carré (1 psi = 0,069 bar) |
| psia | livre par pouce carré (pression absolue) |
| psig | livre par pouce carré (pression relative) |
| gal (US) | gallon des Etats-Unis (1 gal (US) = 3,785 l) |
| gal (Imp) | gallon britannique (1 gal (Imp) = 4,546 l) |
| ft | pied (1 ft = 30,5 cm) |
| Btu | unité thermique britannique (1 Btu = 1,055 kJ) |
| cal | calorie (1 cal = 4,186 J) |
| wt% | pourcentage en poids |
| PVC | chlorure de polyvinyle |
| PVF | fluorure de polyvinyle |
| PTFE | polytétrafluoréthylène |
| ABS | acrylonitrile-butadiène-styrène |
| R-A | recherche-amélioration |

Organisations

Organismes des Nations Unies

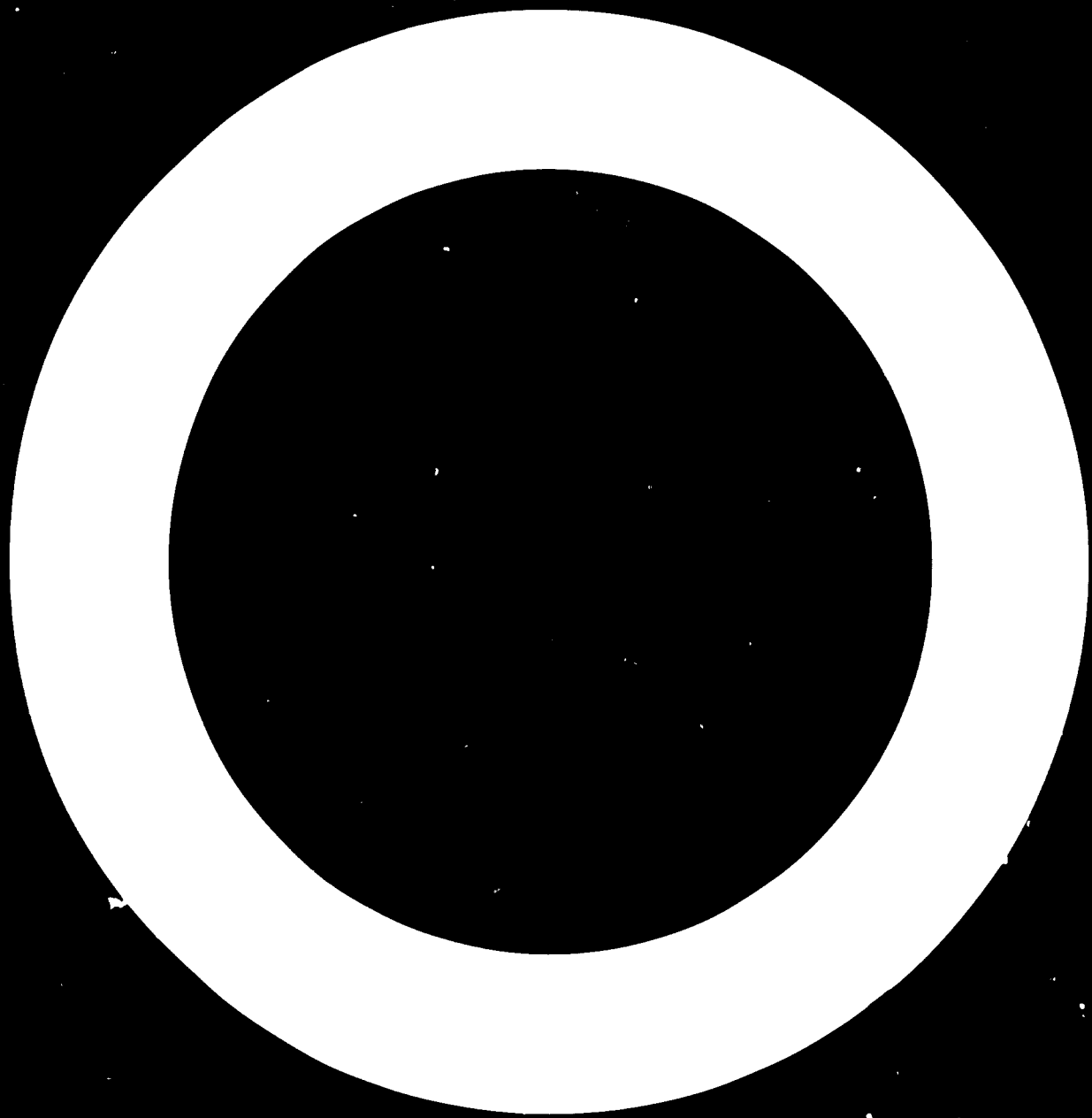
| | |
|--------|---|
| FAO | Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture |
| FISE | Fonds des Nations Unies pour l'enfance |
| PNUE | Programme des Nations Unies pour l'environnement |
| UNESCO | Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture |

Autres organismes

| | |
|-------|---|
| AIE | Agence internationale de l'énergie |
| ERDA | Energy and Research Development Administration (Etats-Unis) |
| IJAAS | Institut international d'analyse appliquée des systèmes |

Première partie

**UTILISATION DE L'ENERGIE SOLAIRE
DANS LES PAYS EN DEVELOPPEMENT**



Energie solaire : Programme d'action recommandé pour les pays en développement

Secrétariat de l'ONUDI

Comme le montre l'article suivant, il existe des possibilités bien définies d'application de la technologie solaire pour la distillation de l'eau, le chauffage de l'eau, le séchage, la cuisson, la réfrigération, la climatisation et la conversion du rayonnement solaire en énergie mécanique ou électrique. Il faut tout d'abord élaborer un programme de recherche-amélioration, puis un programme de production, en mettant l'accent sur les transferts de techniques des pays industrialisés vers les pays en développement, la promotion des talents et moyens locaux de recherche-amélioration, ainsi que la coopération entre pays en développement en matière de technologie solaire. Bien que les principes fondamentaux de la technologie solaire soient connus depuis des siècles, leur application industrielle et commerciale n'a vraiment retenu l'attention des pays industrialisés et des pays en développement que depuis quelques années.

L'analyse économique de la technologie solaire et de l'équipement approprié exige une philosophie et une démarche nouvelles. La production industrielle ne faisant que commencer et étant fort peu répandue, on ne peut pas encore déterminer le niveau économique optimum de production. Certes, les dépenses initiales d'investissement sont plus élevées que pour l'équipement classique similaire; en revanche, les frais d'exploitation sont bien moindres.

Les problèmes majeurs que posent la mise au point des techniques solaires, la conception des produits et leur fabrication sont les suivants :

a) La technologie est nouvelle et on manque encore de connaissances sur ce qu'elle permet de faire et sur la manière de l'appliquer;

b) L'équipement et le matériel solaires ne se trouvent pas encore sur le marché en grandes quantités;

c) Le coût initial de l'équipement est élevé, sans doute parce que les techniques en sont encore au stade expérimental et que l'on ne peut pas réaliser d'économies d'échelle.

La production commerciale est limitée à un petit nombre d'articles dans des pays industrialisés et seulement quelques pays en développement. Il existe un besoin certain de renseignements plus complets, d'évaluations *in situ* dans les pays en développement intéressés et, le cas échéant, de promotion des investissements. Aussi bien dans les pays en développement que dans les pays industrialisés, des institutions se sont lancées dans la recherche appliquée et ont élaboré des concepts technologiques valables, dont la mise à l'essai a permis d'aboutir à des prototypes, l'accent étant placé de façon significative sur les besoins des pays en développement. Il conviendrait donc de jumeler, en matière de technologie solaire, des institutions de recherche-amélioration dans des pays industrialisés et des pays en développement choisis. Enfin, il faut élaborer des programmes d'action intégrés dans le cadre de la coopération entre pays en développement. A cet égard, il faudrait choisir certaines institutions de pays en développement pour les renforcer et les transformer en "centres d'excellence" qui pourraient fournir une assistance aux autres pays en développement.

S'agissant d'élaborer un programme d'information et de vulgarisation de la technologie solaire dans les pays en développement, les gouvernements de ces pays pourraient prendre les mesures nécessaires pour établir et appuyer un programme modeste de technologie solaire dans une institution locale, en vue de lancer un programme efficace de recherche-amélioration avec la coopération d'autres institutions de pays en développement choisis, ainsi que celle d'organismes des Nations Unies.

Tout programme ainsi établi devrait répondre aux besoins des divers pays en développement et favoriser la coopération régionale et interrégionale dans le domaine de la technologie solaire. Ceci vise le rassemblement, l'analyse et la diffusion des renseignements, la recherche-amélioration, les évaluations et la promotion de la production.

Les préalables

Bien que les pays en développement soient conscients du besoin de recourir à des énergies nouvelles, ils n'ont pas apparemment de politiques et de programmes d'action intégrés à cette fin. Il semble que, dans la plupart des pays en développement, la R-A dans ce domaine soit menée dans une optique limitée.

Dans la plupart des pays en développement, les problèmes majeurs que pose l'utilisation des énergies nouvelles sont de trois ordres : manque de renseignements sur les connaissances acquises dans le monde; adaptation des techniques d'utilisation des énergies nouvelles aux conditions qui règnent dans les pays en développement; fiabilité des techniques que ces pays devront importer. En outre, l'élaboration par ces pays de politiques intégrées d'utilisation des énergies nouvelles doit prévoir la création d'institutions appropriées de R-A, ainsi que la promotion de la production locale, en mettant dûment l'accent sur les analyses techno-économiques, les essais *in situ* et les services de vulgarisation.

L'ONU/DEI, en consultation avec des experts en la matière, a identifié les points sur lesquels les pays en développement manquent de renseignements adéquats :

- a) Critères de base de la politique à suivre, notamment en matière d'utilisation de l'énergie dans les régions rurales;
- b) Structures et mécanismes gouvernementaux appropriés pour la planification du développement de l'utilisation des énergies nouvelles;
- c) Techniques locales d'utilisation des énergies nouvelles;
- d) Potentiel local pour le développement de l'ingénierie et la fabrication de biens d'équipement, ainsi que pour l'analyse de la demande de produits;
- e) Moyens d'enseignement, programmes de travail et personnel technique appropriés pour c et d ci-dessus.

Il faut disposer d'un équipement spécial pour utiliser le rayonnement solaire. Comme pour d'autres biens, cet équipement peut être obtenu par importation ou par production locale. Toutefois, l'exploitation de l'énergie solaire offre une occasion unique de coopération entre pays industrialisés et pays en développement, tout comme entre pays en développement.

En conséquence, si la production locale d'équipement solaire est l'ultime objectif des pays en développement, la R-A constitue un élément intrinsèque important de cette activité et doit s'exercer sur deux plans : conception et mise au point de produits locaux; adaptation de techniques importées. Dans les deux cas, la coopération entre pays en développement et le transfert de techniques

des pays industrialisés vers les pays en développement jouent un rôle important. En outre, une assistance internationale est nécessaire.

Il y a de nombreux préalables à la coopération internationale pour la R-A en matière d'énergie solaire. Trois d'entre eux exigent une action de la part des gouvernements des pays en développement eux-mêmes :

Elaboration d'une politique nationale de l'énergie;

Évaluation du rôle des énergies nouvelles;

Analyse réaliste de la contribution de l'énergie solaire à ce rôle.

L'étape suivante consisterait à confier à une institution nationale les activités touchant la R-A, le transfert des techniques, la vulgarisation et la promotion de la fabrication. Son programme comporterait non seulement l'évaluation technique de la technologie et des biens importés, mais aussi le développement de techniques et de produits locaux. Ces activités intégrées devraient être concentrées sur l'adaptation, la fabrication de prototypes, les essais, les analyses techno-économiques et, en fin de compte, la production locale de produits appropriés. Le programme devrait également comprendre la formation de personnel, le transfert de techniques et la coopération entre pays en développement; les installations devraient permettre des travaux de recherche technique, de conception et d'amélioration, des travaux de laboratoire et des essais *in situ*, ainsi que la fabrication de prototypes et la production en petites séries.

Programme recommandé

Compte tenu de l'état des connaissances mondiales et des possibilités des pays en développement, ces pays doivent élaborer un programme en trois phases pour l'immédiat (1980-1990), le proche avenir (1991-2000) et l'avenir plus lointain (après l'an 2000).

Pour ce faire, les pays en développement doivent connaître les réponses à deux questions :

Quel est l'état des connaissances sur l'énergie solaire dans les pays industrialisés ? Qu'est-ce qui peut être fait et quand ?

Quelles sont les techniques qui permettent de répondre aux besoins immédiats des pays en développement; quelles sont celles qui demandent plus de temps pour être vraiment au point, utilisables et commercialement exploitables ?

D'après l'analyse des renseignements dont on dispose actuellement, il est recommandé que le programme de R-A et de fabrication dans les pays en développement soit exécuté en trois phases, comme suit :

1980-1990. Programmes pour l'exploitation commerciale immédiate et la fabrication dans le pays d'équipement solaire à basse température réalisés d'après des techniques bien connues et bien établies. Il peut s'agir de capteurs plans et de matériel tel que les appareils de chauffage de l'eau, de séchage, de distillation de l'eau, de chauffage des locaux et de cuisson. Ce sont là les seuls articles dont on puisse envisager la fabrication locale. En pareil cas, le programme de R-A devra englober la fabrication de prototypes et la promotion de la production. L'assistance internationale à la R-A peut consister en diffusion de renseignements, échange de prototypes, aide aux organismes de recherche appliquée et promotion de la fabrication, en mettant l'accent sur les coûts et les critères de réalisation et d'acceptation.

1991-2000. Pour être prêts à une exploitation commerciale éventuelle de l'énergie solaire pendant cette période, les pays en développement doivent peut-être lancer dès maintenant des programmes de R-A touchant la technologie des moyennes et hautes températures. Ces techniques seront essentiellement fondées sur l'emploi de capteurs paraboliques, équipés ou non d'un mécanisme d'orientation. Les articles qui en découleront pourront être des réfrigérateurs, des congélateurs, des pompes à eau et de petites centrales électriques. Bien que les principes soient connus, les travaux en sont encore au stade expérimental et même les pays industrialisés ne fabriquent encore que des prototypes. Les pompes et génératrices solaires qui ont été installées dans quelques pays en développement par des pays industrialisés ne sont que des prototypes; on n'a pas encore évalué exactement les possibilités commerciales et encore moins les possibilités de fabrication dans les pays en développement. Par conséquent, les programmes de R-A dans les pays en développement devront faire l'objet d'une évaluation soignée. Ils devront porter essentiellement sur les points suivants: connaissance des travaux de R-A effectués dans les pays industrialisés; évaluation, adaptation et assimilation des techniques importées; coopération régionale entre pays en développement. A ce sujet, il faudra s'efforcer de prévenir les doubles emplois et concevoir un système pour promouvoir les échanges de renseignements en matière de R-A entre pays en développement. Comme les travaux de R-A sont coûteux, les pays en développement devront faire des choix en tenant compte des besoins nationaux et de leur priorité. Il pourrait être utile d'envisager des programmes communs de R-A, en mettant l'accent sur la fabrication de prototypes dans des centres régionaux choisis et des pays en développement également choisis. En outre, leurs résultats devraient être mis gratuitement à la disposition d'autres pays en développement, grâce à un réseau approprié; cela pourrait conduire à l'évaluation des performances *in situ* et, éventuellement, à la promotion de la fabrication commerciale.

Après l'an 2000. Pour être prêts à tirer pleinement parti des possibilités commerciales qui se feront jour pendant "l'ère solaire", dès le début du vingt et unième siècle, les pays en développement doivent établir dès maintenant un programme judicieux de R-A. Cependant, il faut bien admettre que ce sont des pays industrialisés qui se sont engagés dans la technologie complexe des hautes températures. Parmi les réalisations envisagées, on peut citer les transmissions par fibres optiques, les centrales solaires à tour et la technologie des piles solaires, des semi-conducteurs, de la conversion photovoltaïque, etc. Ces travaux de R-A sont très coûteux. Les pays industrialisés eux-mêmes savent bien dans quelle voie ils se sont engagés, mais ils ne connaissent pas toutes les réponses. Le rôle des pays en développement est donc complexe. Ce domaine ouvre de belles perspectives à la coopération internationale, notamment entre pays industrialisés et pays en développement. Il faudra partager les efforts et les résultats; il faudra notamment jumeler des instituts de recherche de pays industrialisés et de pays en développement pour l'exécution de programmes déterminés de recherche appliquée. Les préalables pour les pays en développement sont les suivants:

- a) Identification des institutions locales en mesure d'entreprendre de tels programmes communs de R-A, grâce à un système de jumelage; il faudra sans doute renforcer les institutions existantes et former du personnel;
- b) Echange de renseignements, création de bourses et organisation de séminaires et de programmes d'information.

Action intégrée dans le système des Nations Unies

Compte tenu du programme en trois phases exposé ci-dessus, l'élément le plus important pour le lancement de programmes de R-A consiste à fixer des objectifs réalistes, déterminés d'après la situation présente et les perspectives probables de l'énergie solaire. Il convient d'être sélectif dans le choix des programmes de R-A. L'objectif final est le développement de la production locale; mais il faut tenir compte de plusieurs préalables; la coopération internationale dans ce domaine consistera à renforcer les institutions existantes, à promouvoir le transfert des techniques, à former du personnel et à promouvoir la coopération entre pays en développement.

En principe, le programme d'action intégré dans le système des Nations Unies porte sur les deux points suivants:

- a) Evaluation des techniques actuelles d'utilisation de l'énergie solaire, en vue de déterminer les techniques adaptées aux besoins des pays en développement;

b Elaboration d'un programme d'assistance technique visant à développer l'utilisation de l'énergie solaire, à intensifier les travaux de R-A, à lancer la fabrication de matériel et à promouvoir les transferts de techniques entre pays en développement.

Ce programme devra comporter les mesures suivantes :

Identification d'institutions appropriées dans les pays en développement et dans les pays industrialisés;

Programmes pratiques de R-A;

Mise au point de prototypes, de spécifications et de normes;

Promotion de la production industrielle;

Transfert de techniques des pays industrialisés aux pays en développement;

Coopération entre pays en développement.

Activités de l'ONUDI touchant les énergies nouvelles

Le programme de l'ONUDI en matière d'énergies nouvelles porte actuellement sur le soleil, les vents, la pyrolyse et la biomasse; plus tard, il pourra porter également sur la micro-hydraulique, la géothermie et la photosynthèse. Pour ce qui est de l'aide aux pays en développement, on met l'accent sur l'adaptation et la vulgarisation des techniques importées, la promotion des activités de R-A et la vulgarisation des techniques locales, en s'attachant particulièrement à la promotion de la fabrication de matériel et au développement de l'infrastructure nécessaire. A ce sujet, on insiste tout particulièrement sur la promotion de la coopération entre pays en développement.

Au début de 1977, l'ONUDI a organisé, en coopération avec l'Agence solaire et spatiale autrichienne, la Réunion d'un groupe d'experts sur l'évaluation des techniques actuelles d'utilisation de l'énergie solaire et des possibilités de fabrication de matériel utilisant cette énergie dans les pays en développement (voir la préface et l'annexe I). Les conclusions et les recommandations de ce groupe d'experts peuvent être considérées comme la base du programme d'action de l'ONUDI et de ses activités d'assistance technique dans le domaine de la technologie solaire.

Assistance possible de l'ONUDI aux pays en développement

A la demande des gouvernements des pays en développement, l'ONUDI est prête à les aider dans la promotion et le développement de l'utilisation de l'énergie solaire, conformément aux recommandations ci-dessus. L'assistance technique de l'ONUDI peut être fournie sous forme d'experts, de matériel ou de bourses pour des projets déterminés et approuvés. Normalement, les éléments de cette assistance technique sont financés au moyen de fonds alloués par le Programme des Nations Unies pour le développement (PNUD), conformément aux Chiffres indicatifs de planification (CIP) pour chaque pays en développement et pour un cycle donné. (Le prochain cycle est la période 1978-1982.) Par conséquent, les gouvernements des pays en développement auraient intérêt à donner une priorité aux projets d'assistance technique financés par le PNUD-CIP dans le domaine de l'énergie solaire. En outre, l'ONUDI dispose de ressources financières modestes pour une assistance directe.

Développement de l'utilisation de l'énergie solaire dans les pays en développement

Assad Takla

Société d'ingénieurs-conseils Afamia, Abu Dhabi (Emirats arabes unis)

Introduction

L'histoire montre que l'énergie solaire est utilisée depuis fort longtemps, mais c'est seulement au cours du siècle dernier que virent le jour des appareils tels que des chaudières équipées de miroirs, des moteurs à vapeur, des moteurs à air chaud et des appareils de cuisson. Le développement intensif des moteurs thermiques et électriques ainsi que le prix extrêmement bas des sources d'énergie, notamment de celles importées du tiers monde, ont quelque peu découragé les recherches sur l'énergie solaire. Maintenant que le prix des sources d'énergie a atteint un niveau normal et que les découvertes de nouvelles ressources pétrolières deviennent rares, les pays industrialisés lancent des programmes intensifs de recherche sur l'énergie solaire. Par exemple, aux Etats-Unis d'Amérique, l'Energy and Research Development Administration (ERDA) avait pour l'exercice 1976 un budget de 115 millions de dollars. Les projets dans ce domaine de l'Agence internationale de l'énergie (AIE), dont les membres sont tous des pays industrialisés, sont décrits à l'annexe II, page 156.

Certaines méthodes d'utilisation de l'énergie solaire ont atteint un stade tel qu'elles sont devenues économiquement compétitives avec des méthodes faisant appel aux sources d'énergie classiques. Comme la plupart des pays en développement sont situés dans des régions ensoleillées, il est de leur propre intérêt de développer l'utilisation de l'énergie solaire, qui est gratuite, inépuisable, universelle (pas de problèmes de transport ou de distribution) et non polluante. Cette énergie peut être convertie en énergie mécanique, électrique ou chimique utilisable dans divers domaines, tels que la production d'électricité, le dessalement de l'eau, l'irrigation, la cuisson, la conservation des aliments par congélation, le séchage des produits de la pêche, des fruits et des légumes, le chauffage des locaux et la climatisation.

L'objet de cette étude est de donner un aperçu techno-économique du développement de la recherche sur l'énergie solaire et de son utilisation.

Elle vise essentiellement à mettre en relief les principaux problèmes que pose l'utilisation de l'énergie solaire dans les pays en développement; il faut espérer qu'elle pourra servir de guide initial aux techniciens, économistes et organes directeurs de ces pays.

Il y a eu prolifération des sociétés commerciales s'occupant de l'énergie solaire. Malheureusement, certaines d'entre elles ont demandé des prix extrêmement élevés pour le transfert de techniques solaires d'une valeur douteuse. La plupart des pays en développement ont donc besoin de moyens pouvant les aider à améliorer leur position dans la négociation du transfert de techniques solaires aux fins de R-A. Cette étude est le premier effort visant à leur offrir de tels moyens. Pour de plus amples détails sur divers aspects de l'étude, il faudra consulter des ouvrages plus spécialisés. On trouvera plus loin une liste annotée de publications importantes. Il faudra également consulter l'annexe III, page 158, qui décrit des systèmes d'information, et l'annexe IV, page 161, qui donne une liste d'institutions s'occupant de l'énergie solaire.

Cette étude traite essentiellement des perspectives à court terme et à moyen terme, car les données disponibles ne sont pas suffisantes pour des projections valables à long terme. Toutefois, du fait de l'évolution rapide de la technologie, des études du même genre devraient être faites de temps à autre et la question de l'utilisation de l'énergie solaire dans les pays en développement devrait être examinée périodiquement par des groupes d'experts.

Cette étude n'est ni un manuel ni une analyse générale et détaillée de tous les aspects de l'utilisation de l'énergie solaire. Ses rubriques ne sont pas équilibrées: de manière générale, l'auteur a accordé plus d'importance aux domaines qui ne sont pas encore très vulgarisés.

La première rubrique décrit les applications générales des techniques existantes et contient des renseignements recueillis par l'auteur au cours de visites dans des centres de recherches et au cours de

réunions internationales. Dans la rubrique II, on trouvera quelques comparaisons d'ordre technico-économique qui montrent que le matériel solaire pourrait être utilisé économiquement, à court et à moyen terme, par les pays en développement. Des équations générales illustrent les comparaisons; on donne un exemple de leur application.

L'auteur a visité quelques grands centres de recherches sur l'énergie solaire et l'énergie éolienne dans des pays industrialisés (Allemagne, République fédérale d', Canada, Etats-Unis d'Amérique, France et Pays-Bas) et dans des pays en développement (Grèce, Inde, Mexique et Trinité-et-Tobago). Quelques conclusions et évaluations fondées sur ces visites constituent la rubrique III. On y traite des problèmes et des solutions possibles, ainsi que de la tendance générale de la coopération entre pays industrialisés et pays en développement et entre pays en développement.

Les renseignements contenus dans cette étude n'émanent pas de l'auteur, à l'exception bien sûr de ceux qui sont le fruit de son travail et de ses conclusions. Ces renseignements sont fondés sur la documentation technique disponible, sur des notices ou des déclarations de fabricants, ainsi que sur des contacts directs et des discussions dans des organismes spécialisés.

1. DEVELOPPEMENT ET ETAT DES CONNAISSANCES

Conversion de l'énergie solaire en énergie mécanique

Considérations générales

Le terme "moteur solaire" désigne un moteur fonctionnant grâce au rayonnement solaire. Le cycle thermodynamique d'un tel moteur peut être le suivant: le rayonnement solaire chauffe un fluide en phase liquide, qui se vaporise; la vapeur se détend dans un moteur alternatif ou rotatif et fournit ainsi un travail; la vapeur s'écoule ensuite vers un échangeur de chaleur, où elle se condense; le fluide condensé est ensuite réinjecté par une pompe (généralement actionnée par le moteur solaire lui-même) dans un autre échangeur de chaleur, où il se vaporise; le cycle est ainsi fermé.

Le rendement du moteur dépend essentiellement du rendement du cycle de Carnot

$$\eta_c = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

où T_1 est la température absolue de la source chaude (en l'occurrence l'échangeur de chaleur où le fluide se vaporise) et T_2 la température absolue de la source froide (l'échangeur de chaleur où le fluide se condense).

Il ressort de cette équation que, théoriquement, on devrait utiliser la température la plus haute possible pour la source chaude et la température la plus basse possible pour la source froide. Dans la pratique, T_1 dépend de la performance des capteurs solaires et de la pression que les matériaux du moteur peuvent supporter; par exemple, la pression du Fréon 22 est déjà de 20 bars à 50 °C seulement. D'un autre côté, T_2 ne peut pas être inférieur à la température du fluide de refroidissement (l'eau ou l'air), en convection naturelle ou forcée.

Il n'existe pas de normes définissant les basses, moyennes et hautes températures. Cependant, dans la présente étude, on entend par "basse température" une température inférieure à 100 °C. Les capteurs plans, qui captent le rayonnement solaire direct et diffus, fonctionnent à basse température. Les "moyennes" et "hautes" températures seront donc des températures supérieures à 100 °C; pour les obtenir, il faut utiliser des capteurs à foyer, qui suivent la course du soleil et ne captent que le rayonnement direct.

L'air peut être porté à une température relativement élevée par l'énergie solaire et utilisé comme fluide de travail dans un moteur solaire. On peut utiliser deux cycles:

a) *Cycle fermé (Stirling)*. De l'air est comprimé dans un espace froid; il est ensuite mis au contact d'une source chaude, où sa pression augmente, et il se détend dans un cylindre moteur; il revient ensuite dans l'espace froid, et le cycle est fermé.

b) *Cycle ouvert (Ericson)*. De l'air comprimé est introduit dans un espace chaud; il se détend et s'échappe ensuite dans l'atmosphère.

Moteurs solaires à basse température

Pratiquement, les moteurs solaires à basse température fonctionnent au-dessous de 80 °C. Un fluide de travail (Fréon 22, Fréon 12, Fréon 11, Fréon 114 ou butane) est vaporisé directement dans des capteurs solaires plans ou au contact d'eau chauffée dans des capteurs et circulant dans un échangeur de chaleur (évaporateur) (voir figure 1). En phase gazeuse, le fluide de travail se détend dans un moteur alternatif ou rotatif. Il passe ensuite dans un condenseur refroidi à l'air ou à l'eau; en phase liquide, le fluide est réinjecté dans l'évaporateur grâce à une pompe actionnée par le moteur solaire lui-même. Dans quelques applications, lorsqu'on utilise de l'eau chaude pour vaporiser le fluide de travail, une pompe également actionnée par le moteur solaire est utilisée pour accélérer la circulation de l'eau chaude et améliorer le transfert de chaleur dans l'évaporateur. En pareil cas, le démarrage doit être fait à la main.

La vaporisation directe du fluide de travail dans des capteurs solaires peut être économique dans le cas

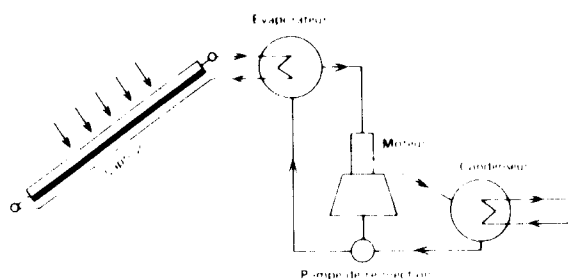


Figure 1. Moteur solaire à basse température, le fluide de travail étant vaporisé par l'eau chaude provenant des capteurs solaires

de petites installations; mais il serait très difficile de recourir à cette méthode dans de grandes batteries de capteurs, du fait de la difficulté d'obtenir une parfaite circulation du fluide.

Moteur SOFRETES

La Société française d'études thermiques et d'énergie solaire (SOFRETES) a déjà installé ou installé actuellement une cinquantaine de pompes solaires, la plupart de 1 kW.

Cependant, la technique n'est pas encore parfaitement au point. SOFRETES a essayé le butane et divers type de Fréon, notamment le Fréon 12 et le Fréon 11; elle semble maintenant préférer le Fréon 114. Sa technique a évolué en ce qui concerne les échangeurs de chaleur. Elle a utilisé d'abord des condenseurs et des évaporateurs à serpentins en coque, puis des condenseurs à serpentins coaxiaux; elle utilise maintenant des échangeurs de chaleur à plaques semblables à ceux de l'industrie alimentaire.

Dans l'une des pompes de 1 kW avec le butane comme fluide de travail et des capteurs plans d'une surface totale de 60 m², la température de l'eau à la sortie des capteurs est d'environ 70 °C; la température à la sortie de l'évaporateur et à l'entrée du moteur à mouvement alternatif est d'environ 67 °C, la température à la sortie du moteur étant d'environ 50 °C. La température de condensation (condenseur refroidi par l'eau pompée) est d'environ 30 °C. Avec un bon ensoleillement, un tel moteur peut fonctionner environ 6 heures par jour sans stockage d'énergie solaire, mais pas tout le temps à pleine puissance. Dans une autre pompe de 1 kW, les températures à l'entrée et à la sortie du moteur et à la sortie du condenseur sont respectivement de 55 °C, 40 °C et 30 °C.

En collaboration avec le Gouvernement mexicain, SOFRETES a installé une centrale solaire de 25 kW à San Luis de la Paz. L'alternateur est entraîné par une turbine tournant à 7 200 tr/mn, sous l'action du Fréon 11 vaporisé sous une pression d'environ 3 bars. La température du fluide est de 57 °C à l'entrée et d'environ 30 °C à la sortie. Le Fréon 11 est

vaporisé dans un échangeur de chaleur en aluminium produisant 1 740 MJ/h avec une surface utile d'environ 350 m²; la température de l'eau est de 62 °C à l'entrée et de 58 °C à la sortie.

L'eau chaude pour l'évaporateur provient de capteurs solaires ayant une surface utile de 1 200 m². Le fluide de travail est condensé dans un condenseur en acier inoxydable produisant 1 590 MJ/h avec une surface utile d'environ 100 m². Le Fréon condensé est réinjecté dans l'évaporateur par une pompe de 3 kW actionnée par l'alternateur. Cette installation fonctionne depuis environ un an; elle ne pose aucun problème technique sérieux, mais le système de commande est très complexe.

Moteur à vapeur V-2

Erich A. Farber (Laboratoire de l'énergie solaire et de la conversion de l'énergie, Université de Floride, États-Unis d'Amérique) a conçu le moteur à vapeur V-2, qui utilise comme fluide de travail du Fréon vaporisé directement dans les capteurs solaires. Ce moteur comprend essentiellement deux cylindres perpendiculaires, ayant chacun un alésage de 51 mm et une course de 39 mm. Des tiroirs contrôlent l'admission et l'échappement de la vapeur, respectivement après des rotations de 90° et de 140° du régulateur. Le moteur, qui a 25 cm de hauteur, 35 cm de longueur et 23 cm de largeur, est monté dans une culasse de 40 cm de diamètre et 25 cm de hauteur. Le déplacement total est de 305 cm³ par tour.

La vapeur pénètre dans le moteur à travers la culasse, après avoir fourni un travail, elle est refoulée dans la culasse. Ainsi, toute fuite accidentelle est sans danger, puisque la culasse retient toute la vapeur sortant du moteur. De la culasse, la vapeur passe dans le condenseur.

La vitesse du moteur est contrôlée par un régulateur centrifuge ajustable, qui commande le débit de vapeur dans le moteur.

Le condenseur, refroidi à l'eau, est un cylindre de 76 cm de diamètre et de 61 cm de long, qui contient sept serpentins ayant un diamètre de 3,5 cm et une longueur totale de 13,5 m. La vapeur est condensée dans ce serpentins.

Le mode de fonctionnement et le diagramme idéal température-entropie (*T-S*) sont donnés par la figure 2. Le segment 1-2 représente la détente de la vapeur dans le moteur, qui convertit une partie de l'énergie thermique en travail mécanique; le segment 2-3 représente le changement de phase du fluide dans le condenseur; le segment 3-4 représente l'action de la pompe qui élève la pression jusqu'à celle des générateurs solaires de vapeur; le segment 4-1 représente les changements qui s'opèrent dans l'évaporateur, fermant le cycle. Le même cycle est présenté dans la figure 3, qui donne le diagramme pression-enthalpie (*p-H*) avec le Fréon 11 comme fluide de travail. On a considéré des conditions de fonctionnement pouvant être facilement réalisées

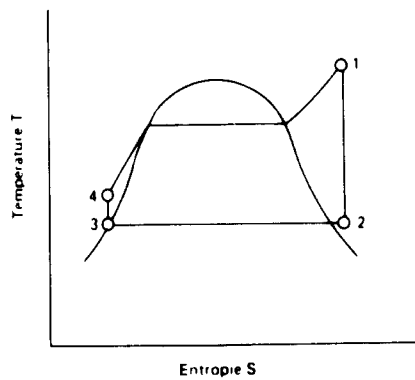


Figure 2. Diagramme idéal température-entropie du moteur solaire à vapeur V-2

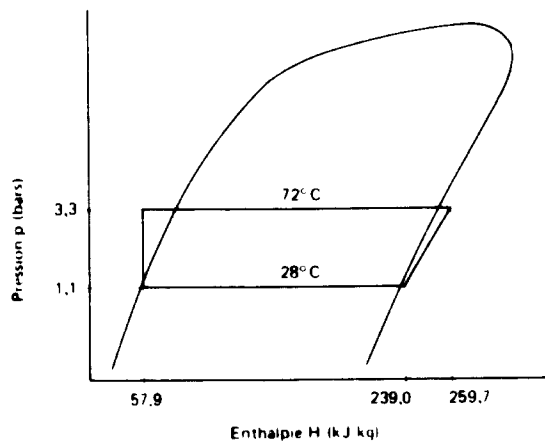


Figure 3. Diagramme pression-enthalpie du moteur V-2 avec le fréon 11 comme fluide de travail (échelle non respectée)

avec de tels systèmes. A la sortie des capteurs plans, le fréon 11 est en phase gazeuse à une température de 72 °C; à la sortie du condenseur, il est en phase liquide à une température de 28 °C. Les pressions correspondant à ces températures sont modérées et ne posent aucun problème pour la fabrication des appareils.

Les changements d'état de l'air dans les cylindres du moteur, d'un même côté des pistons, sont indiqués dans le diagramme idéalisé pression-volume ($p-V$) de la figure 4 (en réalité, les coins sont arrondis).

La figure 5 montre le rendement réel du moteur pour des pressions à l'admission maintenues constantes à 2,39, 2,74, 3,08 et 3,45 bars et correspondant respectivement à des températures de 51°, 56°, 60° et 65 °C pour le fréon 11. Les courbes sont caractéristiques du rendement du moteur. La vitesse maximale est obtenue sans charge; la vitesse diminue à mesure que la charge augmente. Si l'on trace les courbes de la puissance délivrée en fonction de la vitesse de rotation, chaque courbe accuse un maximum. On peut obtenir des températures et des

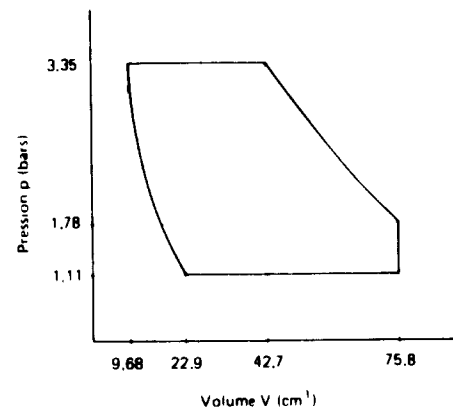


Figure 4. Diagramme pression-volume de l'air dans les cylindres du moteur V-2

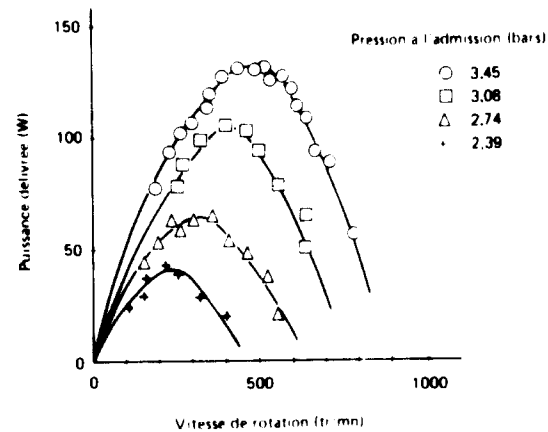


Figure 5. Courbes de puissance pour le moteur V-2

pressions plus élevées que celles indiquées sur le diagramme, mais ce n'est possible que pendant une très brève partie de la journée.

Le montage de deux cylindres en V compact permet à ce moteur de démarrer automatiquement, ce qui présente un grand avantage lorsque le ciel est couvert par intermittence.

Moteur Sun Power Systems

Sun Power Systems a mis au point un moteur rotatif conçu essentiellement pour utiliser l'énergie de déchets industriels. Cependant, le fluide de travail (fréon) peut être vaporisé par de l'eau chaude fournie par des capteurs solaires plans. La conception du moteur est fondée sur le cycle de Rankine. Une centrale électrique de 10 kW a été essayée à Albuquerque, Nouveau-Mexique (Etats-Unis), par une équipe de consultants travaillant pour le Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE), avant d'être envoyée à Sri Lanka pour un projet du PNUE. Cette installation fonctionne maintenant à pleine puissance, avec un débit horaire de 12 m³

d'eau à 90 °C dans l'évaporateur. On espère qu'une surface utile de 276 m² de capteurs fournira l'énergie nécessaire pour chauffer l'eau. Cette installation comporte deux échangeurs de chaleur classiques, fabriqués par une société qui produit des appareils de réfrigération et de climatisation; l'un des échangeurs, ayant une surface utile de 23 m², sert d'évaporateur; l'autre, ayant une surface utile de 35,2 m², sert de condenseur. Le moteur tourne à 1 800 tr/mn; son poids est d'environ 80 kg. Il actionne un alternateur de 60 Hz. L'ensemble moteur, échangeurs de chaleur, pompe de réinjection et alternateur est très compact.

La puissance de 10 kW est atteinte pour une différence de 55 °C entre les températures de vaporisation et de condensation; mais, en pratique, une telle différence ne peut pas être obtenue avec des capteurs plans: des capteurs de ce type ne permettent qu'une différence d'environ 40 °C. La puissance maximale possible est d'environ 7 kW. Comme dans les moteurs SOFRETES, la lubrification est assurée par un lubrifiant dissout dans le Fréon. La surface actuelle de l'évaporateur semble insuffisante, notamment lorsque la température de l'eau à l'entrée de l'évaporateur est d'environ 70 °C. Selon le fabricant, l'un de ses petits prototypes a été essayé pendant 10 000 heures sans problème particulier. Cependant, il faut noter que les essais ont été faits à proximité de l'usine et non *in situ*.

Moteur Gironnet-ENSAM

L'Ecole nationale supérieure des arts et métiers (ENSAM) a mis au point un prototype de moteur à mouvement alternatif, à faible vitesse, qui délivre une puissance de moins de 1 kW; elle négocie maintenant avec une société industrielle la fabrication d'un prototype de 2 kW. Le seul problème technique restant à résoudre est celui de la lubrification. On

pourrait utiliser le même système de lubrification que dans le moteur SOFRETES ou le moteur Sun Power Systems, mais on s'efforce de mettre au point un système de lubrification à sec, dont on pense qu'il serait meilleur.

Le coût de fabrication des prototypes de 2 kW est estimé à 4 000 dollars, non compris les capteurs solaires; avec un régime d'ensoleillement favorable, la surface des capteurs devrait être de l'ordre de 50 à 60 m².

Le premier prototype est essayé avec de l'air comprimé. De tels essais ne permettront pas une évaluation valable. Toutefois, la conception du moteur est simple et son prix estimé est relativement bas.

Moteur Messerschmidt-Bölkow-Blohm (MBB)

Messerschmidt-Bölkow-Blohm GmbH, à Ottonbrunn (République fédérale d'Allemagne), travaille sur une centrale solaire de 10 kW (voir figure 6). Elle est conçue comme une centrale autonome pour des communautés rurales écartées. Outre la puissance de pointe de 10 kW, les spécifications exigent une réserve d'énergie pour la nuit: 12 kWh avec une puissance de 1 kW. Cette exigence implique un système optimal de stockage de l'énergie. MBB a retenu les capteurs plans utilisés pendant près de deux ans dans des travaux préliminaires sur le chauffage solaire de locaux. Pour obtenir la puissance de pointe spécifiée, il faut une surface totale de capteurs d'environ 700 m². MBB espère pouvoir réduire à environ 350 m² la surface utile des capteurs. Toutefois, les spécifications définitives pour la surface des capteurs dépendront fortement des conditions climatiques et de la demande au lieu d'implantation; il faudra tenir compte également de la capacité de stockage requise pour assurer un cycle de fonctionnement de 24 heures, ainsi que du comportement des

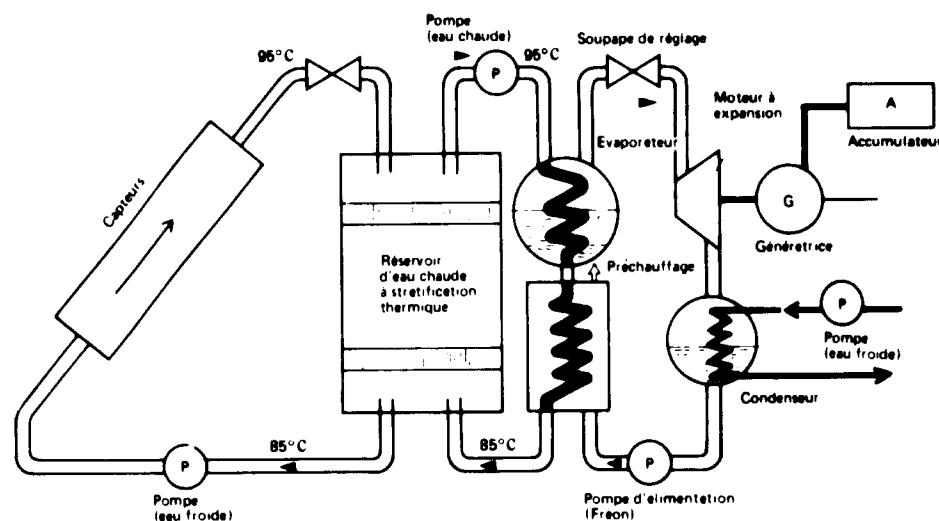


Figure 6. Schéma de la centrale solaire MBB

divers éléments de la centrale sous charge partielle. Un moteur à vis mis au point par la société Linde, utilisant le Fréon 114 comme fluide de travail, sera retenu du fait du très bon rendement escompté sous charge partielle. Ce moteur présente d'autres avantages : faible poids spécifique (rapport poids/puissance), faible encombrement et absence de soupapes.

Les capteurs plans de MBB sont du type modulaire, à double vitrage. Les dimensions extérieures de la surface absorbante de chaque module sont : $60 \text{ cm} \times \text{cm} \approx 1 \text{ m}^2$. L'absorbeur est en aluminium roll-bond protégé contre la corrosion par un inhibiteur et revêtu d'une peinture thermique à facteur d'absorption élevé (0,96) (cette peinture a été mise au point pour des applications spatiales); l'isolation thermique est assurée par une couche de polyuréthane expansé. La température de l'eau peut atteindre 95°C .

MBB a déjà réalisé un prototype, qui a subi plusieurs essais de brève durée avec de l'eau chaude fournie par une chaudière électrique. Quelques modifications sont maintenant à l'étude. Le moteur lui-même est très compact; normalement utilisé pour la climatisation de trains, il a été légèrement modifié pour être monté dans la centrale. Il serait très difficile d'atteindre la température de vaporisation du Fréon 114 avec des capteurs plans ordinaires. Il faudrait avoir recours à une technique complexe et utiliser notamment des surfaces sélectives; il n'a pas encore été établi que de tels capteurs puissent être fabriqués facilement et à un prix raisonnable. Toutefois, MBB est prête à envisager toute modification possible concernant les températures de fonctionnement ou des changements dans la conception de la centrale.

Moteurs à haute température

L'obtention de vapeur est le principal problème avec un moteur solaire à haute température. Le rendement de Carnot, η_C , est relativement élevé, mais les autres rendements doivent être pris en considération. Par exemple, dans le cas d'un héliostat, le rendement total est donné par :

$$\eta = \eta_C \eta_d \eta_r \eta_s \eta_a \eta_i \eta_h \eta_t \eta_m$$

les rendements autres que η_C , qui dépend de T_1 et T_2 (voir plus haut), ayant les valeurs caractéristiques suivantes :

| | | |
|----------|---|---------|
| η_d | facteur rayonnement solaire diffus-direct | 0.80 |
| η_r | réflectivité du miroir | 0.80 |
| η_s | facteur couchant-levant | 0.70 |
| η_a | absorption focale et pertes géométriques | 0.70 |
| η_i | pertes de chaleur | 0.70 |
| η_h | facteur passage de nuages | 0.80 |
| η_t | facteur distance de l'héliostat | 0.6 |
| η_m | rendement mécanique | 0.5-0.8 |

Ces chiffres montrent que le rendement total ne peut pas être supérieur à 5%-8% du rendement de Carnot. Par exemple, avec une température de la vapeur de 200°C ($T_1 = 473^\circ \text{K}$) et une température de condensation de 30°C ($T_2 = 303^\circ \text{K}$), le rendement de Carnot est d'environ 36% et le rendement total du système est de 1,9-3,0%. Avec un ensoleillement favorable, il faut environ 40 m^2 d'héliostat pour obtenir une production moyenne de 1 kW pendant le jour. Quelques sociétés cherchent à obtenir un rapport de 10-15 m^2/kW , mais il s'agit généralement d'une puissance de pointe, et non de puissance moyenne (la puissance de pointe est la puissance délivrée par le moteur lorsque le rayonnement solaire est maximal).

Plusieurs institutions travaillent sur de très grandes centrales thermiques. Par exemple, le Centre national de la recherche scientifique (CNRS), en collaboration avec Electricité de France, travaille sur une centrale à haute température de 10 MW, dans laquelle la pression pourrait atteindre 80 bars. Une chaudière de 100 kW est mise au point conjointement par le CNRS, Babcock-Wilcox, Heurtey, Saint-Gobain et Renault (SERI); elle utilise des héliostats et devait être mise en marche à Odeillo au début de 1977.

Parmi les sociétés qui ont déjà réalisé un prototype de petit moteur à vapeur, il faut citer Maschinenfabrik Augsburg-Nürnberg AG (MAN) (République fédérale d'Allemagne) qui, en collaboration avec Deutsche Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt, à Stuttgart, construit une batterie de capteurs comprenant 12 rangées de 6 miroirs paraboliques (facteur de concentration : 30) qui suivent le déplacement du soleil. Chaque capteur a une longueur de 2,5 m et une ouverture de 1 m^2 . Les capteurs sont disposés sur une plate-forme inclinée suivant un angle correspondant à la latitude. La surface utile totale des miroirs du prototype est d'environ 180 m^2 , la température de travail est de 200°C et la production moyenne d'énergie thermique par jour est d'environ 700 kWh (pour un fonctionnement de 7 heures à 17 heures). Avec un moteur à vapeur et un alternateur (puissance de pointe de 10 kW), la production de courant électrique est d'environ 70 kWh par jour (rendement total d'environ 6%). A la sortie du condenseur, l'eau a une température de 95°C ; on envisage de l'utiliser pour la fourniture d'eau chaude, le chauffage de locaux ou la climatisation de l'air. Pour augmenter la production de courant électrique tout en diminuant la surface utile des capteurs, on envisage des températures de travail plus élevées. Le tableau I donne les spécifications envisagées pour différents stades de développement.

En construction modulaire, cet ensemble pourrait être transformé en centrales de plusieurs centaines de kW électriques.

MAN travaille également sur un moteur à vis, entraîné par la vapeur surchauffée de Fréon 114.

TABLAU I. SPÉCIFICATIONS DE LA CENTRALE SOLAIRE MAN A DIFFÉRENTS STADES DE DÉVELOPPEMENT

| Spécifications | Proto- type | Présérie | Série opti- malisée |
|---------------------------------|----------------|----------|---------------------------|
| Surface utile (m ²) | 180 | 130 | 100 |
| Température de travail (°C) | 200 | 250 | 300 |
| Capacité thermique (kWh/j) | 700 | 480 | 390 |
| Capacité électrique (kWh/j) | 70 | 69 | 68 |
| Rendements (%) | | | |
| Capteurs | 58 | 54 | 59 |
| Cycle | 20 | 24 | 28 |
| Moteur/alternateur | 50 | 60 | 63 |
| Total | 6 | 8 | 10 |

La citation ci-dessous est extraite d'un rapport de MAN :

"Les chances de succès avec un moteur solaire à basse température sont très faibles. Contrairement aux capteurs à foyer, les capteurs plans utilisent partiellement le rayonnement diffus. Toutefois, cette partie du rayonnement est en moyenne inférieure à 10% pour les régions considérées et joue donc un rôle mineur. Un inconvénient majeur des capteurs plans est que le rendement diminue fortement lorsque la température du capteur augmente. En outre, l'insolation de capteurs à pente fixe est plus faible le matin et l'après-midi. De ce fait, le rendement diminue encore. Un inconvénient supplémentaire est qu'il faut utiliser un fluide de travail à faible température d'ébullition, comme le Fréon. Cela exige l'emploi d'échangeurs de chaleur coûteux.

"Le rendement thermique augmente en même temps que la température des capteurs. Cependant, on ne peut obtenir des rendements suffisamment élevés que si l'on utilise pour l'enveloppe des capteurs des matériaux réfléchissant les rayons infrarouges (matériaux qui sont chers) ou si l'on applique des peintures sélectives (qui se dégradent avec le temps).

"Les capteurs à foyer sont, par exemple, des réflecteurs paraboliques ou des miroirs de Fresnel qui concentrent le rayonnement solaire direct sur un tube absorbant monté dans l'axe du foyer. Ces capteurs ont de très hauts rendements environ 50% dès que le facteur de concentration est de 20-30.

"Les capteurs à foyer doivent suivre la course du soleil. Ainsi, le rendement élevé reste presque constant du matin au soir. Un autre avantage majeur contrairement aux capteurs plans est que l'on peut utiliser des moteurs à vapeur classiques du fait des températures de travail plus élevées."

Le moteur à vapeur utilisé dans l'installation MAN est un moteur classique, fabriqué dans les

années 60. Sa puissance est supérieure à celle que peuvent fournir les capteurs solaires disponibles.

Le coût unitaire (dollars/kW) de l'installation se décompose comme suit (1976) :

| | |
|---|--------------|
| Moteur à vapeur et alternateur, y compris les structures et les commandes | 810 |
| Condenseur | 140 |
| Pompes, tuyauteries, isolation et instruments de contrôle du cycle | 200 |
| Stockage, isolation et ballon d'eau | 530 |
| Capteurs | 1 110 |
| Total | 2 790 |

Aux Etats-Unis d'Amérique, de nombreuses petites sociétés ont été créées pour construire des capteurs à foyer suivant automatiquement la course du soleil. L'une d'elles, Sun Power Systems Corporation, à Tempe (Arizona), a mis au point des capteurs cylindro-paraboliques. Un de ces capteurs a la fiche technique suivante :

Description : Réflecteurs paraboliques en aluminium, disposés en série; le nombre de réflecteurs dans une installation dépend de la demande d'énergie. L'axe des réflecteurs est constamment dirigé vers le soleil par un système électronique qui comprend diverses protections : désalignement si la température devient trop élevée, antigel si elle devient trop basse, comparateur de températures garantissant que le système ne chauffera que l'eau dans le ballon de stockage.

Dimensions standards d'un réflecteur : 4 ft x 10 ft (1,22 m x 3,05 m; surface utile : 3,41 m²).

Surface du réflecteur : aluminium anodisé, garanti plus de cinq ans. La poussière est sans effet sensible sur le rendement.

Energie produite quotidiennement (à la latitude 32° N et pour un ensoleillement 100%) :

| | Par unité de surface | | Par réflecteur | |
|-------------|-------------------------|------------------------|----------------|--------|
| | (MJ/m ²) | (Btu/ft ²) | (MJ) | (Btu) |
| 21 juin | 21,41 | 1 885 | 73,0 | 69 190 |
| 21 décembre | 13,05 | 1 149 | 44,5 | 42 170 |
| Moyenne | 17,23 | 1 517 | 58,7 | 55 680 |

Facteur de concentration : 44.

Fluide absorbant : eau.

Débit du fluide absorbant : 0,3 l/s (5 gpm), mais le système fonctionne aussi bien avec des débits plus lents ou plus rapides.

Température de l'eau : 177 °C (350 °F) (eau circulant en circuit fermé entre huit capteurs et un ballon isolé thermiquement de 150 litres [40 gallons]).

Pression maximale de fonctionnement : 20 bars (300 psi).

Poids des capteurs : poids spécifique, 7,3 kg/m² (1,5 lb/ft²); poids du réflecteur, 27,2 kg (55,1 lb) (tout compris : châssis, éléments, eau).

Matériau absorbant : tuyauterie en cuivre dur de 1 in., avec revêtement noir sélectif.

Châssis : acier tubulaire (rectangulaire) de 0.065 in. (1.65 mm).

Moteur d'orientation : 2,8 tr./mn., rapport de transmission 1/780:1, intensité du courant : 1 A; précision : écart inférieur à 10 minutes du temps solaire.

Fixation des capteurs : adaptable.

Stockage recommandé par unité de surface de capteur : 60 l./m² (1.5 gal/ft²).

Orientation : une orientation nord-sud est préférable, mais n'est pas nécessaire.

Montage : un toit plat est préférable, mais n'est pas nécessaire.

Esthétique : l'ensemble a un profil très bas; il peut être facilement installé derrière un parapet le rendant pratiquement invisible.

Adaptabilité : l'ensemble peut être monté sur n'importe quelle structure existante; on peut ajouter des réflecteurs si la demande d'énergie le justifie.

Entretien : nul. Les capteurs peuvent être lavés de temps à autre, mais ce n'est pas nécessaire.

Protection contre l'orage : par temps très couvert, les réflecteurs sont automatiquement retournés en position de nuit, afin de minimiser les dommages éventuels.

Garantie : un an pour tous les matériaux et éléments, à l'exception de ceux pour lesquels d'autres fabricants ont imposé des limites inférieures.

Certes, ces capteurs à foyer fonctionnent, mais on n'en a pas une expérience suffisamment longue pour évaluer leur durée de vie, leurs performances et les effets des conditions climatiques et des poussières. En 1976, le coût de ces capteurs était d'environ 100 dollars/m².

Résumé

Les moteurs solaires à moyennes et hautes températures peuvent être associés à des moteurs à vapeur et des turbines à vapeur classiques. (Il n'y a là rien de nouveau : au début du siècle, un moteur solaire à vapeur a fonctionné avec succès en Egypte.) Toutefois, il n'y a pas encore de petites turbines sur le marché.

Le rendement thermique de ces moteurs est meilleur que celui des moteurs à basse température, parce que le rendement de Carnot est plus élevé.

Ces moteurs fonctionnent grâce au rayonnement solaire direct, que l'on ne peut pas toujours capter.

Les capteurs à foyer doivent suivre la course du soleil, ce problème peut être résolu du point de vue technique à un prix raisonnable. (Cependant, aucun

système de ce genre n'a encore été essayé sur une longue période.)

Les centrales solaires à moyennes et hautes températures donneront sans doute de meilleurs résultats en grandes qu'en petites installations.

Le problème du stockage de l'énergie reste le problème le plus important, il doit être résolu de manière satisfaisante avant que l'on ne puisse s'attaquer à de nombreux autres problèmes.

Moteurs à air chaud

Moteur Stirling

Dans un moteur à combustion interne classique, la chaleur est obtenue en brûlant une certaine quantité de combustible à l'intérieur du cylindre. Dans le moteur Stirling, la chaleur est fournie au fluide de travail dans le cylindre par chauffage externe et un échangeur de chaleur.

Tout d'abord, un certain volume de gaz froid retenu dans un cylindre par un piston est comprimé (figure 7a), puis chauffé par une source de chaleur extérieure (figure 7b). La température du gaz augmentant, sa pression augmente également et le piston est refoulé vers le bas du cylindre, faisant ainsi tourner le vilebrequin. Après détente (figure 7c), le gaz est refroidi par une source extérieure de refroidissement (figure 7d). Sa pression diminue et le gaz est de nouveau comprimé (figure 7a). Comme la pression pendant la détente est très supérieure à la pression pendant la compression, il y a une production nette de travail. Le cycle complet se déroule pendant une révolution du vilebrequin, au lieu de deux dans un moteur classique.

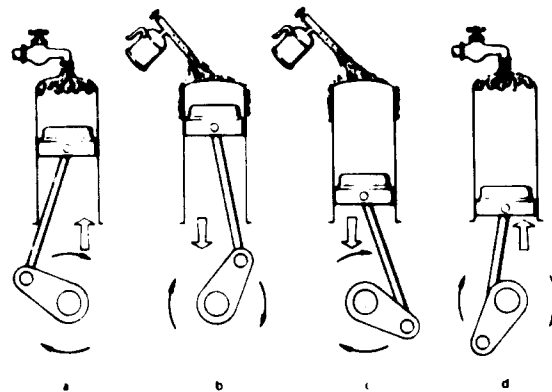


Figure 7. Représentation simplifiée du principe de fonctionnement du cycle de Stirling

Evidemment, on ne peut pas procéder dans la pratique aux changements de source chaude et de source froide comme on l'a fait dans la figure 7. L'invention de Stirling a consisté à réaliser cet échange de sources en ajoutant un mécanisme appelé

piston de circulation (que nous appellerons par la suite piston secondaire), qui sert à faire circuler le gaz entre une source chaude stationnaire et une source froide également stationnaire (figure 8). Ces sources (représentées par des serpentins dans la figure 9) sont reliées aux deux extrémités de la partie supérieure du cylindre. Lorsque le piston secondaire se déplace vers le haut du cylindre (figure 9a), le gaz chaud se trouvant en haut du cylindre est d'abord envoyé dans le serpentins de chauffe. Il passe ensuite dans le serpentins de refroidissement, où sa température est abaissée jusqu'à ce que la plus grande partie du gaz se trouve dans la section froide, au-dessous du piston secondaire. Du fait que le gaz est froid, sa pression est faible. Le mouvement du piston secondaire vers le bas (figure 9b) renvoie le gaz vers le serpentins de refroidissement, puis vers le serpentins de chauffe; le gaz est chauffé, puis renvoyé dans la section chaude au-dessus du piston secondaire. Le gaz étant chaud, sa pression est élevée. Il n'y a pas de soupape dans ce circuit, de sorte que lorsque la pression est élevée dans la section supérieure, elle l'est aussi dans la section inférieure.

Il faut encore ajouter un mécanisme pour rendre le système pratique : le régénérateur (figure 10). Placé entre la source chaude et la source froide, le régénérateur emmagasine de la chaleur qui serait autrement perdue pendant le processus de refroidisse-

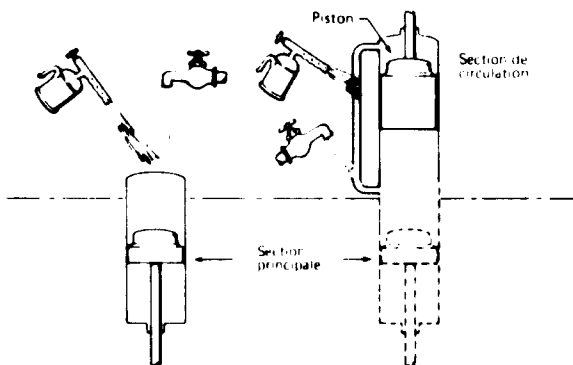


Figure 8. Représentation simplifiée du piston de circulation

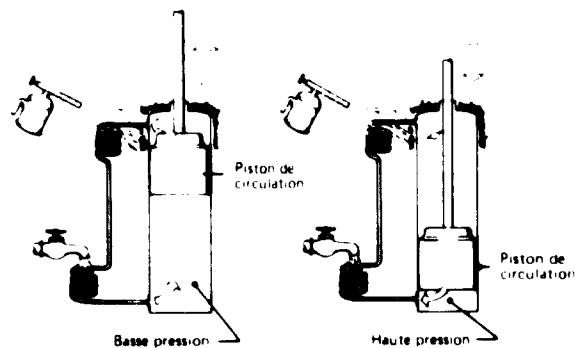


Figure 9. Action du piston de circulation

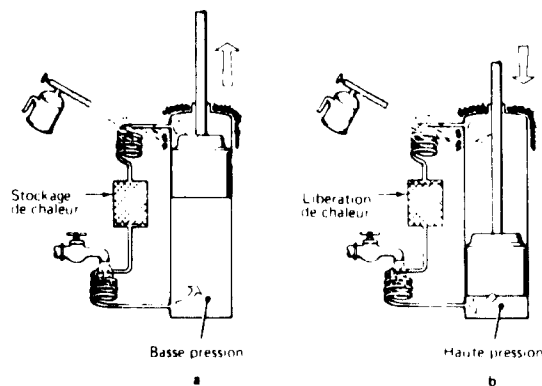


Figure 10. Action du régénérateur

ment et permet de récupérer cette chaleur pendant la phase d'échauffement. En fait, la quantité de chaleur ainsi emmagasinée est plusieurs fois supérieure à la quantité de chaleur fournie par la source extérieure.

La figure 11 montre l'ensemble du moteur Stirling : piston principal, piston secondaire, système de chauffe et de refroidissement du gaz; elle ne montre pas le lien mécanique entre les pistons, qui assure leur maintien en phase. En 11a, le gaz refroidi est comprimé par le piston principal, comme dans un moteur à combustion interne classique. En 11b, le gaz comprimé est chauffé et sa pression augmente parce que le piston secondaire refoule une partie du gaz dans la section supérieure (chaude) du cylindre. L'augmentation de pression agit sur le piston principal, qui est refoulé vers le bas. En 11c, le gaz chaud à haute pression a terminé son cycle d'échauffement sous l'action du piston secondaire qui descend dans le cylindre; le piston principal a également terminé de fournir un travail. En 11d, le piston secondaire remonte dans le cylindre pour refouler le gaz vers la source de refroidissement, diminuant ainsi sa pression. Le piston principal est maintenant prêt à recommencer la phase de compression, comme dans 11a; le cycle est complet.

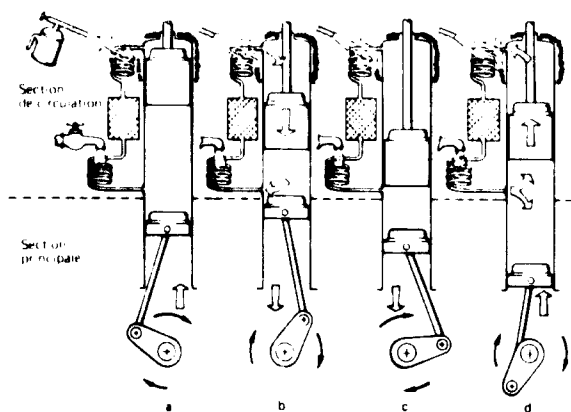


Figure 11. Cycle de Stirling complet, avec section de circulation et régénérateur

Moteur à air chaud en circuit fermé

Moteur Philips

Philips a mis au point depuis longtemps de petits moteurs à air chaud. L'un de ces moteurs (750 W (1 hp) à 1 500 tr/mn) a été modifié par KJANA, en Inde, pour fonctionner à l'énergie solaire. Le système de chauffage (une tête de cylindre de 6 cm de diamètre), conçu pour fonctionner au kérosène, a été remplacé par un système de chauffage solaire. On a utilisé un ensemble de miroirs ayant une surface totale de 8 m². Ce moteur pouvait actionner un alternateur de 200 W, mais le rendement théorique du cycle Stirling n'a pas pu être atteint.

Moteur Farber

Plusieurs prototypes de moteur à air chaud en circuit fermé ont été mis au point par le Laboratoire de l'énergie solaire et de la conversion de l'énergie, Université de Floride (Etats-Unis). Un prototype intéressant est un moteur suralimenté, à injection d'eau, dans lequel une soupape réglable permet au moteur de se suralimenter lui-même en aspirant de l'air frais ou de l'eau pendant la partie du cycle où la pression est inférieure à la pression atmosphérique.

Le moteur peut fonctionner à l'énergie solaire ou, sans modification, au bois, au charbon ou aux combustibles liquides. Pour utiliser le rayonnement solaire, il suffit de concentrer celui-ci à l'extrémité du cylindre de circulation (cylindre secondaire), à l'intérieur du foyer. Le moteur peut être construit avec des machines-outils très simples.

Un cylindre secondaire, ayant un alésage de 70 mm et une longueur interne de 257 mm, est installé au-dessus du moteur. Il contient un piston ayant un alésage de 68 mm et une longueur de 203 mm. Sa course étant de 50 mm, le piston peut se déplacer librement dans le cylindre.

Le cylindre secondaire est conçu de telle sorte qu'il peut être chauffé à une extrémité par un gaz, un combustible liquide ou le rayonnement solaire, et refroidi à l'autre extrémité par de l'air ou de l'eau (en circuit fermé ou ouvert). Le piston est mû par une tige de 12 mm pénétrant dans le cylindre par un manchon.

Le cylindre secondaire est relié par un embout de 18 mm au cylindre principal, dans lequel se déplace un piston ayant 60 mm d'alésage et 38 mm de course.

Le lien mécanique entre le piston secondaire et le piston principal permet le phasage du moteur. En fonctionnement normal, le piston secondaire précède le piston principal d'environ 100°. La régénération se produit entre le piston secondaire et les parois de son cylindre. La chaleur est emmagasinée dans ces parois durant une partie du cycle; elle est libérée et utilisée pendant l'autre partie. Le fluide de travail se déplace dans un sens, puis dans l'autre; ce faisant, il abandonne de la chaleur, puis en absorbe, l'empêchant ainsi de quitter le système; il y a régénération interne.

Le moteur est lancé lorsque la pression à l'intérieur du système est égale à la pression atmosphérique. De ce fait, la pression interne tombe au-dessous de la pression atmosphérique pendant une partie du cycle. Pendant le fonctionnement du moteur dans des conditions normales, cette baisse de pression est accrue par le passage de fluide de travail (air) à travers le manchon du piston secondaire vers l'extérieur pendant la partie du cycle où la pression est plus élevée que la pression atmosphérique et vers l'intérieur pendant la partie du cycle où elle est plus faible.

Il s'est révélé extrêmement difficile d'empêcher ou même de minimiser ce passage d'air sans augmenter considérablement les pertes par frottement. On a mis au point deux méthodes pour résoudre le problème :

a) Injection d'air. Une petite soupape à bille réglable, montée comme le montre la figure 12, permet à de l'air frais de pénétrer rapidement pendant la partie du cycle où la pression est inférieure à la pression atmosphérique. Cette addition très simple permet au moteur de fonctionner avec un volume moyen plus important de fluide de travail, ce qui se traduit par une puissance plus élevée.

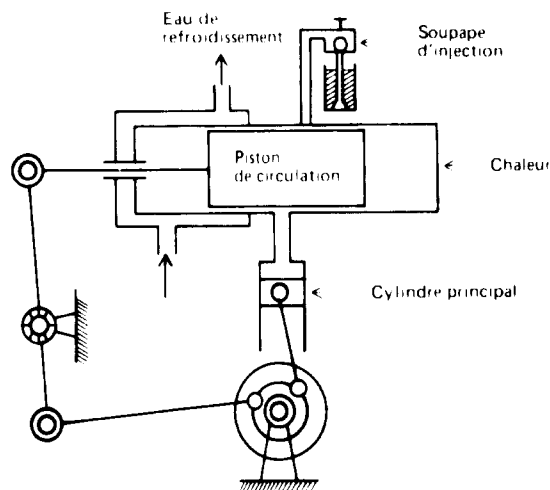


Figure 12. Moteur Farber à injection d'air ou d'eau

b) Injection d'eau. Si la tête de la soupape est plongée dans l'eau, on injecte de l'eau dans le système et non plus de l'air. Cela permet de faire entrer dans le système une quantité encore plus importante de fluide, étant donné qu'il est ajouté en phase liquide, et l'augmentation de puissance est encore plus forte. Un autre avantage de l'injection d'eau (ou autre liquide) est que cela accroît considérablement le transfert de chaleur à l'extrémité chaude du cylindre.

Ainsi, l'injection automatique d'air ou d'eau peut améliorer sensiblement la performance du moteur à air chaud en circuit fermé (voir figure 13).

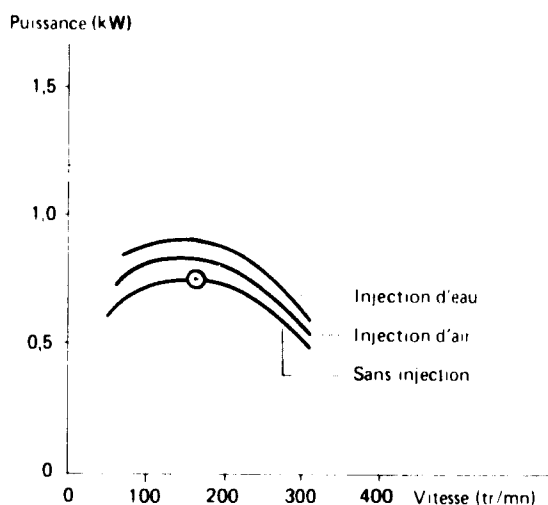


Figure 13. Courbes puissance-vitesse du moteur Farber, montrant le gain de puissance dû à l'injection

Les moteurs de ce type peuvent être considérés comme "hybrides", car ils combinent les avantages du cycle Stirling à ceux d'autres modèles.

Moteur à air chaud en circuit ouvert

Dans le moteur à air chaud en circuit ouvert, de l'air est absorbé, comprimé, puis chauffé par le rayonnement solaire; l'air comprimé se détend et est libéré dans l'atmosphère. Un compresseur est associé au moteur (qui peut aussi être une turbine). L'avantage de ce système est que la vitesse du moteur est indépendante du cycle d'échauffement de l'air.

Moteur KHANA

On a entièrement démonté et refait un petit moteur à air chaud en circuit ouvert, pris sur un vieux ventilateur à kérosène. Les parties usées ont été remplacées et le moteur a été modifié de façon appropriée. Il tournait à une vitesse moyenne de 250 tr/mn. La chaleur était dissipée à l'extrémité froide grâce à de grandes ailettes épaisses, soudées le long du corps du moteur. Pour permettre un fonctionnement régulier et continu, un disque creux de 38 mm d'épaisseur a été posé sur le fond du cylindre. Ce disque était en cuivre et l'espace creux a été rempli de sable sec. On a ainsi obtenu un contact parfait entre les surfaces métalliques. Tout le cylindre, d'une longueur de 216 mm, a été enfermé dans un tube en verre pyrex d'un diamètre légèrement supérieur, fermé à une extrémité. De la sorte, on a pu augmenter la température à l'extrémité chaude et assurer un fonctionnement continu et régulier du moteur.

Associé à une petite pompe à eau, à mouvement alternatif, ce moteur a été monté avec les trois réflecteurs métalliques décrits plus haut et utilisé pour des expériences de pompage à différentes

profondeurs. L'ensemble ne développait qu'une puissance de 45 W, la moitié de ce que l'on avait prévu.

Plus tard, un autre moteur à air chaud, d'une puissance à peu près double du précédent, a été modifié et monté en position verticale sur un trépied en fer. On l'a utilisé avec des concentrateurs à miroirs plans. Associé à la pompe à eau, ce moteur développait une puissance d'environ 95 W. Un petit réflecteur métallique, cylindro-parabolique, a été placé derrière le cylindre pour assurer un échauffement uniforme de la partie chaude du cylindre et assurer ainsi un fonctionnement régulier.

Pompes solaires

Des pompes classiques peuvent être actionnées par des moteurs solaires; cependant, des prototypes de pompes à eau sans parties mobiles sont mis au point par l'Institut technologique et scientifique Birla, à Pilani (Inde). Le principe en est décrit ci-dessous.

Un mélange de fractions de pétrole ayant des températures d'ébullition de 35-40 °C est vaporisé dans des capteurs plans; ensuite, le fluide en phase gazeuse se détend dans un réservoir rempli d'eau et installé dans un puits. La pression du fluide fait monter l'eau à une hauteur qui dépend de la pression. La vapeur se condense pendant la nuit dans les capteurs. Ce mode discontinu de pompage est très simple, mais le rendement est faible. On peut également condenser la vapeur en la faisant passer dans un condenseur refroidi par l'eau pompée. En utilisant deux réservoirs d'eau et un ensemble de valves de contrôle, on peut réaliser un pompage semi-continu. Outre les capteurs solaires et le réservoir de vaporisation, l'installation comporte deux réservoirs d'eau installés près de la nappe d'eau et un condenseur situé au niveau du sol. La figure 14 donne le schéma de l'installation.

Le fluide de travail passe des capteurs dans le caisson de vaporisation; puis la vapeur est envoyée dans l'un des réservoirs d'eau, déplaçant celle-ci (les réservoirs sont pleins). L'eau déplacée condense la vapeur sur les parois du condenseur, lorsqu'elle le traverse dans un serpent. Lorsque le premier réservoir est vide, la vapeur est envoyée dans le second. En même temps, la vapeur dans le premier réservoir est condensée par l'eau que l'on pompe du deuxième. Au fur et à mesure de la condensation, la pression dans le premier réservoir diminue et l'eau pénètre dans ce réservoir par une soupape à clapet. Ainsi, le premier réservoir se remplit à mesure que le second se vide. En renversant le cycle, grâce à un jeu de valves, on vide le premier réservoir et on remplit le second. De la sorte, l'eau peut être pompée continuellement.

Pour empêcher le fluide de travail de pénétrer dans les tuyauteries d'eau, on maintient toujours une petite quantité d'eau dans les réservoirs. Le fluide

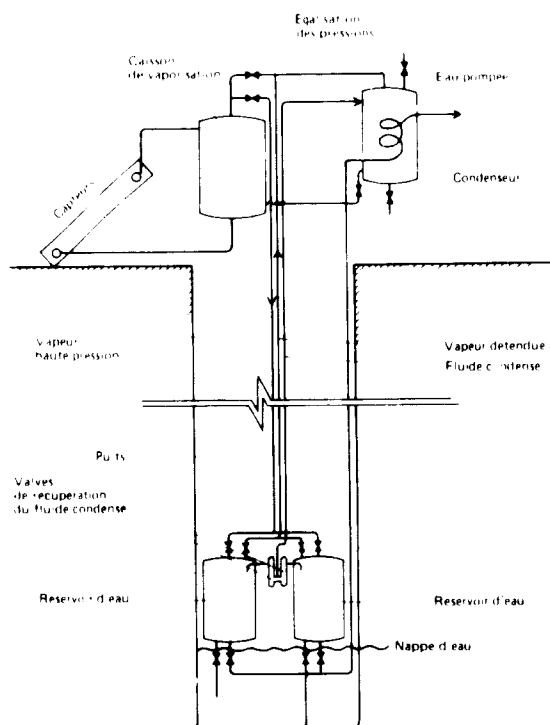


Figure 14. Pompe solaire

condensé dans les réservoirs d'eau peut être pompé vers le condenseur au début de chaque cycle, au moyen de valves de récupération dont le principe est le même que celui d'une trappe de vapeur. En outre, le condensé peut être transféré au caisson de vaporisation, périodiquement ou à la fin de la journée, par égalisation des pressions.

On peut augmenter la capacité de la pompe en ajoutant des capteurs solaires, ce qui ne modifie que la durée du cycle.

Le fluide de travail devrait être insoluble dans l'eau, avoir un point d'ébullition légèrement supérieur à la température de l'air ambiant, être non toxique, inflammable, peu coûteux et facile à obtenir. Le pentane remplit toutes ces conditions, sauf qu'il est inflammable.

Une fraction de pétrole ayant des propriétés semblables à celles du pentane serait meilleur marché et plus facile à se procurer que le pentane. Cette fraction de pétrole - un mélange d'hydrocarbures - présente un avantage supplémentaire. On peut la composer pour tenir compte des conditions atmosphériques dans une région donnée. Par exemple, dans une région où la température nocturne est d'environ 2 °C et la température diurne de 15 °C, en choisissant un mélange contenant davantage d'huiles légères, avec un point d'ébullition de 15-20 °C, on peut pomper l'eau à une hauteur assez élevée, même avec des températures très faibles des capteurs. Dans des régions comme Pilani (au bord du désert de Thar), où les conditions climatiques sont extrêmes, on peut

modifier les propriétés du fluide de travail pour répondre aux variations saisonnières : il suffit d'ajouter de petites quantités d'huiles légères ou d'huiles lourdes pour obtenir un bon rendement de la pompe.

En pratique, deux fluides sont toujours plus ou moins solubles l'un dans l'autre; de ce fait, le contact permanent du fluide de travail avec l'eau fraîche dans chaque cycle entraîne une certaine perte de fluide. Heureusement, les conditions de fonctionnement de la pompe sont telles que les transferts de masses à l'interface sont extrêmement faibles la plupart du temps. En conséquence, la perte de fluide de travail est négligeable.

Voici les spécifications proposées pour une pompe à eau du type décrit ci-dessus :

| | |
|---------------------------------|---|
| Surface des capteurs plans | 100 m ² |
| Débit de pompage | 150 m ³ /j |
| Exhaure | 18 m |
| Dimensions des réservoirs d'eau | 150 cm de hauteur, 90 cm de diamètre |

Le coût de l'installation, en supposant que le prix des capteurs soit de 35 dollars/m², serait de 6 000 dollars.

Pour mettre au point de tels prototypes, il faut encore résoudre de nombreux problèmes techniques, en particulier la commande du système de valves. Le mécanisme de contrôle électrique proposé actuellement ne répond pas aux exigences d'une pompe solaire pour une région rurale, car une telle pompe doit être indépendante de toute source extérieure d'énergie.

Conversion directe de l'énergie solaire en énergie électrique

Les piles photovoltaïques produisent un potentiel électrique lorsqu'elles sont éclairées par le rayonnement solaire. Les plus connues sur le marché sont celles qui utilisent les semi-conducteurs Si et CdS, les premières ayant une plus longue durée de vie. D'importants programmes de R-A sont entrepris pour augmenter les performances, simplifier les techniques et réduire les coûts. En 1976, le coût des photopiles était d'environ 15 000 dollars/kW; les programmes de recherche tendent à la réduire à 8 000 dollars en 1980 et à quelques centaines de dollars en 1985.

A l'heure actuelle, la technologie semble encore trop complexe pour la plupart des pays en développement; la fabrication, même en petites séries, ne peut pas être envisagée à moyen terme. C'est pourquoi ce sujet ne sera pas discuté plus avant dans cette étude, en dépit d'un avenir très prometteur.

Réfrigération et climatisation solaires

La climatisation signifie le conditionnement de l'air pour obtenir des valeurs bien définies de température, d'humidité, de mouvement et de pureté

de l'air dans un volume donné. On n'étudiera ici que la question du refroidissement, afin de traiter en même temps la réfrigération et la climatisation. La température est généralement plus basse dans le cas de la réfrigération, particulièrement s'il s'agit de la production de glace ou de la conservation d'aliments. Des valeurs bien définies de la température et de l'humidité ne peuvent pas être obtenues dans le cas de la climatisation sans l'appoint d'une source extérieure d'énergie pour actionner les ventilateurs, les pompes et les systèmes de commande.

La réfrigération peut être réalisée avec un moteur solaire actionnant un compresseur classique, mais on ne traitera ici que des machines frigorifiques à absorption. Ce type de machine peut fonctionner en continu ou par intermittence. En régime continu, une source extérieure d'énergie est nécessaire, ne serait-ce que pour actionner les pompes et le système de commande. Les fluides les plus communément utilisés sont des solutions aqueuses d'ammoniac ou de bromure de lithium: les premières conviennent mieux aux capteurs plans.

Principe de fonctionnement (figure 15)

La solution aqueuse d'ammoniac est chauffée directement par le rayonnement solaire dans un générateur (bouilleur) ou indirectement par de l'eau elle-même chauffée par l'énergie solaire. Lorsque la température de la solution augmente, l'ammoniac commence à s'évaporer du fait que sa solubilité dans l'eau est fonction inverse de la température. La

vapeur passe dans un condenseur, refroidi à l'eau ou à l'air, où elle se condense. Le cycle devient maintenant semblable à celui d'une machine frigorifique classique à compression. Un liquide sous-refroidi est disponible à la sortie du condenseur. La pression de l'ammoniac, qui augmente en même temps que la température, est contrôlée par la température de condensation. Le liquide passe dans la vanne de détente et commence à s'évaporer; sa température et sa pression diminuent. La vapeur froide, à basse pression, atteint l'évaporateur, dans lequel elle absorbe la chaleur du fluide à refroidir (par exemple, de l'eau froide pour la climatisation ou de l'eau salée pour la production de glace). La température de la vapeur augmente et elle s'écoule vers un absorbeur où elle est absorbée par une pellicule de solution aqueuse d'ammoniac à faible concentration. L'absorption est exothermique; pour maintenir la température de la solution dans des limites permettant d'obtenir la concentration désirée, il faut refroidir l'absorbeur. La concentration de la solution augmente, elle est pompée vers le générateur et le cycle est fermé.

En conclusion :

a) Un refroidissement est nécessaire dans le condenseur et dans l'absorbeur; s'il est obtenu par convection naturelle, les échangeurs de chaleur doivent avoir une grande surface;

b) Il faut disposer de pompes actionnées par une source extérieure d'énergie, au moins pour envoyer la solution de l'absorbeur dans le générateur; s'il était utilisable, un thermosiphon diminuerait fortement la productivité;

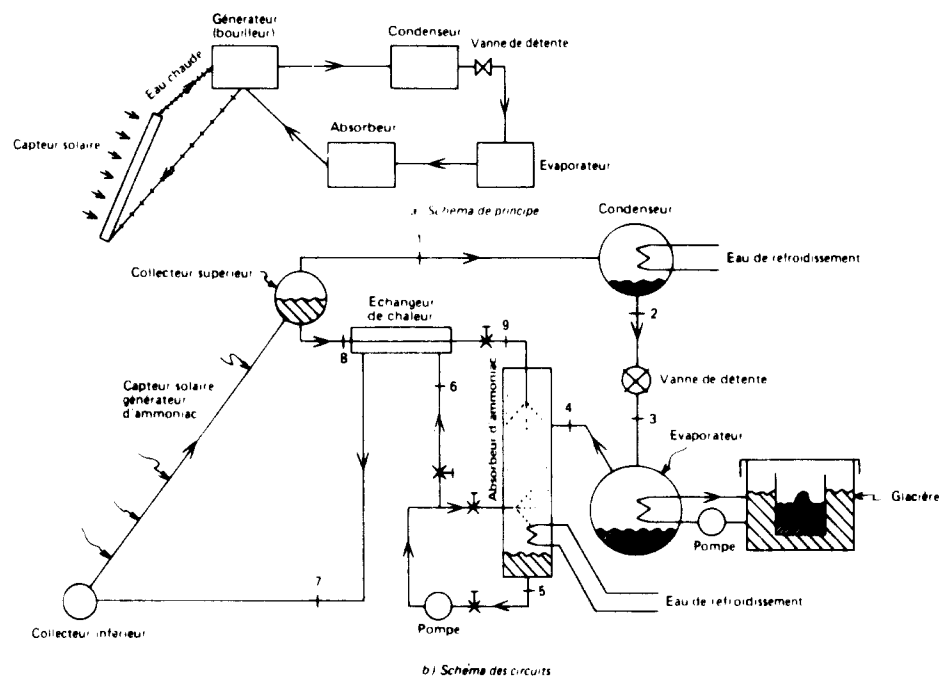


Figure 15. Cycle de réfrigération, ammoniac-eau

c) Le fonctionnement doit être continu dans le cas de la climatisation.

d) Un échangeur de chaleur entre le condenseur et l'absorbeur peut améliorer la productivité.

On fait actuellement des expériences (par exemple à l'Institut du froid de l'Université technique de Delft, aux Pays-Bas) en vue de produire par jour 4 kg de glace par capteur plan de 2 m² avec une machine à absorption à solution aqueuse d'ammoniac, fonctionnant par intermittence sans l'appoint d'une source extérieure d'énergie. La condensation de l'ammoniac est obtenue pendant la nuit grâce au rayonnement céleste sur les capteurs solaires.

Premier exemple : *Réfrigérateur à solution aqueuse d'ammoniac, Laboratoire de l'énergie solaire et de la conversion de l'énergie, Université de Floride*

Un capteur plan de 1,20 m (4 ft) de côté sert de bouilleur. Le capteur est constitué de tubes en acier de 25 mm (1 in.) reliant un collecteur inférieur de 31 mm et un collecteur supérieur de 62 mm. Les tubes d'acier sont espacés de 100 mm (4 in.) et soudés sur une tôle de fer galvanisé de 20. Cet ensemble est enfermé dans un boîtier en métal galvanisé, entre un simple vitrage et une isolation en mousse de styrène de 25 mm (1 in.)

Le capteur est incliné de 30° sur l'horizontale; cet angle est un compromis pour permettre à la fois un bon captage du rayonnement solaire et un bon écoulement ainsi qu'un bon transfert de chaleur du bas vers le haut du capteur. Il fait face au sud pour offrir la meilleure orientation moyenne pendant toute la journée.

Le condenseur est un réservoir tubulaire de 75 mm, avec 4 tubes de fer noir de 12,5 mm, de 1,2 m (48 in.) de long, donnant une surface de transfert de chaleur de 0,325 m² (3,5 ft²).

L'évaporateur est un réservoir tubulaire de 100 mm, avec 7 tubes de fer noir de 12,5 mm, de 1,2 m (48 in.) de long, donnant une surface de transfert de chaleur de 0,572 m² (6,15 ft²).

L'absorbeur est un réservoir tubulaire de 150 mm, avec 11 tubes de fer noir de 12,5 mm, de 0,9 m de long (36 in.), donnant une surface de transfert de chaleur de 0,573 m² (6,16 ft²); les parois servent de support à la pellicule liquide sur laquelle une partie de la vapeur d'ammoniac est réabsorbée.

L'unité de production et de stockage de la glace est un caisson cubique en métal galvanisé de 46 cm (1,5 ft) de côté, entouré d'une isolation en mousse de styrène de 10 cm (4 in.), le tout protégé par un mince panneau de contreplaqué.

L'échangeur de chaleur est du type passage unique, contre-courant et tubes coaxiaux.

La pompe de circulation de la solution antigel est du type centrifuge classique; la pompe de circulation

de la solution aqueuse d'ammoniac est du type rotatif, à galets de nylon. Un circuit de dérivation sur la pompe permet de régler la quantité de solution distribuée aux divers éléments du système.

Outre la vanne de détente, le système comporte quatre valves qui permettent de régler les débits dans les différents éléments de l'ensemble. Des jauges de pression, des thermomètres, des thermocouples et des voyants à niveau liquide permettent de contrôler constamment les conditions de fonctionnement. La concentration de l'ammoniac dans la solution varie de 48 à 60 % en poids.

L'appareil a subi des tests hydrostatiques à une pression de 20 bars; on estime qu'un fonctionnement à 13-15 bars est sans danger. Ceci correspond à une température dans le bouilleur d'environ 66°C (150°F).

Afin d'obtenir de la glace dans le caisson métallique, la température de l'évaporateur doit être maintenue entre 6 et 9°C, ce qui correspond à une pression d'environ 3 bars.

La figure 16 donne les résultats d'un essai effectué le 6 juillet 1968. Le ciel était sans nuage, mais le rayonnement diffus était important du fait d'une hygrométrie relativement élevée. Ceci a été révélé par une légère augmentation de température du bouilleur-absorbeur avant même que le rayonnement direct ne frappe la surface frontale du capteur.

Au début de la journée, la vanne de détente était fermée et on a laissé le système s'échauffer. (La capacité thermique de l'ensemble absorbeur-bouilleur d'ammoniac était d'environ 1,9 kJ/°C [46 Btu/°F].) Une partie de l'énergie utilisée pour l'échauffement a été restituée au système en fin d'après-midi, lorsque la chaleur emmagasinée a été libérée par suite de la baisse de température.

Les pressions et les températures dans le réfrigérateur ont été contrôlées en faisant varier les débits dans les différentes parties du système, grâce aux diverses valves. Pendant la journée, environ 41 MJ (39 x 10³ Btu) ont atteint l'absorbeur-bouilleur; la production de glace s'est élevée à 18,6 kg (41 lb) (avec de l'eau à 24°C [75°F]), soit une productivité du capteur de 12,5 kg/m² (2,56 lb/ft²).

On peut faire les remarques suivantes :

a) Il est possible de concevoir et de construire un réfrigérateur solaire compact, qui donnera des résultats satisfaisants;

b) Des capteurs plans peuvent capter une quantité importante d'énergie solaire, même par temps nuageux; le fonctionnement d'un réfrigérateur solaire est possible avec des températures de l'absorbeur solaire aussi basses que 43°C (110°F);

c) L'utilisation de l'énergie solaire pour produire de la glace résout le problème du stockage;

d) La combinaison capteur solaire-générateur d'ammoniac en un seul élément élimine les pertes thermiques assez élevées entre l'absorbeur et le

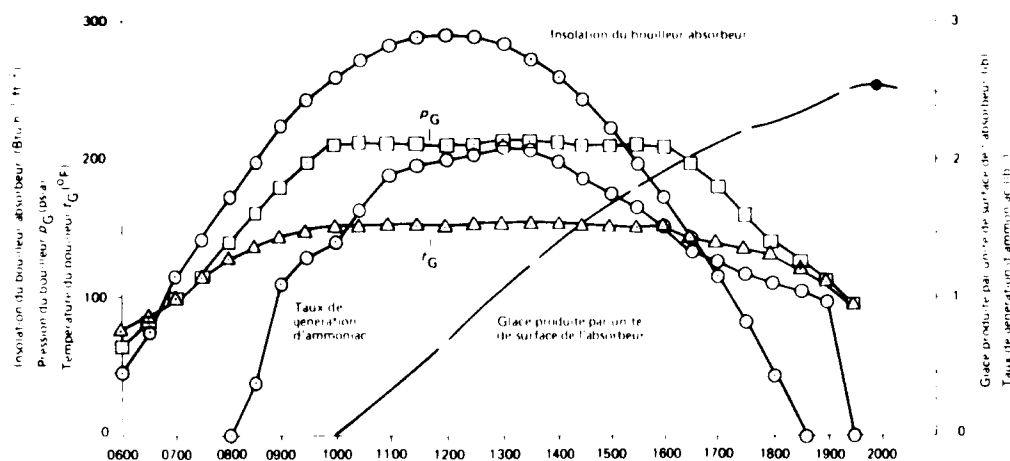


Figure 16. Résultats d'essais d'une machine frigorifique solaire, le 6 juillet 1968

générateur que l'on constatait dans les systèmes précédents. Toutefois, cet avantage ne peut être obtenu que dans le cas de petits appareils; dans de grands appareils, il pourrait se poser des problèmes de circulation du fluide en deux phases et des problèmes d'étanchéité:

e) Une analyse théorique poussée du système, notamment de la combinaison absorbeur-bouilleur, a montré que la conception de l'ensemble peut être déterminée théoriquement et que l'on peut obtenir la performance souhaitée:

f) Etant donné que la production maximale de glace est d'environ 20 kg/j avec un appareil comprenant deux pompes actionnées par une source extérieure d'énergie ainsi qu'un condenseur et un absorbeur refroidis à l'eau, le système ne délivre qu'environ 10,5 MJ (2,4 Mcal) de refroidissement par jour.

Deuxième exemple : *Climatiseur à absorption, à solution aqueuse d'ammoniac et refroidissement par air, avec de nouvelles températures du bouilleur. Division de l'énergie et de l'environnement. Laboratoire Lawrence Berkeley, Université de Californie (1976)*

Partie d'un projet subventionné par l'ERDA, cet appareil est conçu pour fonctionner à des températures du bouilleur de 80-99 °C (175-210 °F), soit dans la gamme de températures des capteurs plans.

Le climatiseur a comme éléments de base le condenseur, l'absorbeur, l'évaporateur et la pompe de circulation du réfrigérant Arkla ACB-60-00, qui est un réfrigérant à absorption, à solution aqueuse d'ammoniac, fonctionnant au gaz avec une capacité théorique de réfrigération de 3,5 kW (5 tonnes de

réfrigération). La puissance totale des pompes et du ventilateur est de 1,6 kW. On y a ajouté les éléments suivants: bouilleur, préchauffeur, rectifieur, réservoirs de stockage, soupapes de détente réglables et instruments de mesure (6 jauges de pression, 25 thermocouples, 2 compte-tours et 2 éprouvettes pour la mesure de la concentration).

Le bouilleur est un échangeur de chaleur à tour et à contre-courant. La solution fortement concentrée ruisselle à travers les plateaux à mailles d'acier de la tour, entrant en contact avec quatre serpentins d'eau chaude montés en parallèle. La surface extérieure totale des serpentins est de 3,3 m² (36 ft²). Le condenseur et l'absorbeur sont des échangeurs de chaleur à contre-courant, refroidis à l'air, avec des tubes à ailettes dont la surface extérieure totale est de 1,3 m² (14 ft²) et 2,0 m² (22 ft²), respectivement. Les ailettes sont des feuilles d'aluminium de 0,25 mm (0,01 in.) d'épaisseur, espacées de 1,55 mm.

Pour faire démarrer l'appareil, on pompe de l'eau chaude, à une température d'admission constante, à travers les serpentins du bouilleur. Le ventilateur du condenseur-absorbeur et les pompes de circulation de la solution sont mis en route lorsque la pression dans le bouilleur atteint environ 10 bars (150 psig). Il faut environ 15 minutes pour échauffer l'ensemble et atteindre les conditions de fonctionnement (avec une charge de solution d'environ 29 kg [65 lb] et une concentration de 55 % d'ammoniac). Les débits de l'ammoniac et de la solution à faible concentration sont alors réajustés aux valeurs voulues au moyen de soupapes de détente.

Tous les tests effectués durant la période initiale d'essai ont confirmé les calculs du cycle fondés sur l'hypothèse des états d'équilibre. En d'autres termes, étant donné les débits mesurés et les pressions et températures également mesurées, les équilibres d'énergie entre les éléments peuvent être satisfaits, aux erreurs expérimentales près (environ plus ou

moins 5 %), en utilisant les enthalpies d'équilibre thermodynamique. Les équilibres de masses peuvent être satisfaits en utilisant les concentrations d'équilibre.

Le fonctionnement de l'ensemble est très stable. On n'a observé aucune modification sensible après des heures de fonctionnement. Cette stabilité est assurée jusqu'à un rapport de circulation (masse d'absorbant par unité de masse de réfrigérant) aussi élevé que 27.

Le fonctionnement du système aux conditions extrêmes (c'est-à-dire Δx voisin de zéro, où x est la concentration massique de l'ammoniac dans la solution) exige plus d'énergie et une pompe plus puissante pour faire circuler la solution. Par exemple, si l'on impose à la puissance de pompage une limite de 48 mW par watt de refroidissement, la valeur de Δx doit être supérieur à 0,03, ou le rapport de circulation doit être inférieur à 16 (en supposant que la pompe a un rendement de 40 %). La figure 17 donne les températures possibles de fonctionnement dans ces conditions d'un climatiseur à absorption, à solution aqueuse d'ammoniac.

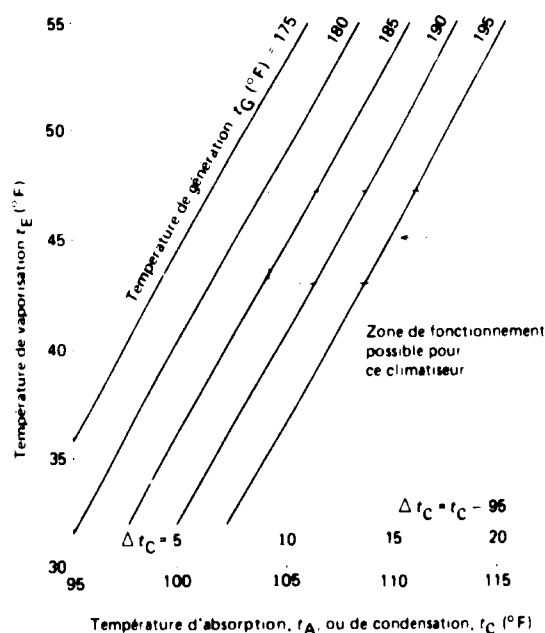


Figure 17. Température de vaporisation, t_E , dans un climatiseur à absorption à ammoniac-eau en fonction des températures d'absorption, t_A , de condensation, t_C , et de génération, t_G , dans les conditions suivantes : baisse de pression dans l'absorbant $p = 0,2$ bar (3 psi), différence de concentration $\Delta x = 0,03$, et $t_A = t_C$.

Pour un refroidissement et une déshumidification acceptables, en utilisant des serpentins d'eau froide de taille raisonnable, t_E doit être inférieur à 8°C (47°F). Avec des capteurs plans peu coûteux, on peut raisonnablement obtenir une température du bouilleur, t_G , inférieure à 90°C (195°F).

Les contraintes pratiques ci-dessus se combinent pour imposer des températures de condensation et d'absorption inférieures à 43°C (110°F). Cette dernière contrainte peut être satisfaite en doublant à la fois les débits d'air de refroidissement et la taille du condenseur-absorbant, par comparaison à ceux qui sont utilisés dans des appareils classiques à gaz utilisant un condenseur et un absorbant à tubes à ailettes. (Ces conditions sont déjà satisfaites en grande partie du fait que le condenseur, l'absorbant et le ventilateur sont de plus grandes dimensions que nécessaire.)

Il est indispensable de doubler le débit d'air de refroidissement, mais de nouveaux modèles de condenseurs-absorbants plus efficaces peuvent pallier l'exigence de doubler la taille (et le prix) de ces échangeurs de chaleur. Pour doubler le débit d'air de refroidissement, il faut évidemment porter la puissance du ventilateur de 24 mW à 48 mW par watt de refroidissement, donnant une performance de 10 W de refroidissement par watt de courant électrique fourni (comparée à environ 2 W par watt pour une machine à compression).

Le coefficient de performance (CP) dépend fortement de l'efficacité du préchauffage, η_{PH} , et de Δx , et ne dépend pratiquement pas de la valeur des autres paramètres. Pour avoir $CP > 0,65$, avec $\Delta x = 0,03$, η_{PH} doit être au moins de 90 %. Cette valeur de η_{PH} n'est pas très chère à obtenir, étant donné qu'il y a suffisamment de pression dans la solution faiblement concentrée pour atteindre des coefficients élevés de transfert de chaleur. Une valeur élevée de η_{PH} est essentielle pour éviter la libération dans l'absorbant de la chaleur contenue dans la solution faiblement concentrée.

L'expérience acquise avec le climatiseur décrit ci-dessus montre qu'il est techniquement possible d'utiliser le cycle à absorption avec une solution aqueuse d'ammoniac pour la réfrigération, avec une température de la source chaude inférieure à 93°C (200°F) et une température de la source froide (avec refroidissement par air) inférieure à 43°C (110°F).

Troisième exemple : *Climatiseur à absorption, au bromure de lithium, Université d'Etat de l'Ohio (1975)*

Cet appareil a été conçu pour la climatisation d'un laboratoire en rez-de-chaussée, ayant une surface couverte de 204 m^2 ($2\,200\text{ ft}^2$) et construit sur un sous-sol de 1,2 m (4 ft) de profondeur. En outre, il y a trois cours fermées, mais non climatisées. La surface vitrée du bâtiment est limitée à six vastes, ayant une surface totale de $1,7\text{ m}^2$ (18 ft^2). L'éclairage naturel provient essentiellement des cours. Les piliers des murs et les poutres du toit en terrasse sont en acier; ils supportent, outre les charges habituelles pour tout bâtiment, plus de $1\,500\text{ kg}$ ($3\,300\text{ lb}$) de capteurs et de tuyauteries. Les murs et le toit sont isolés avec 50 mm (2 in.) et 75 mm (3 in.) de mousse de styrène.

calfatée afin de minimiser les infiltrations et les échanges de chaleur avec l'extérieur. Les valeurs de U pour les murs et le toit sont, respectivement, de 0,07 et 0,05 Btu h⁻¹ ft² °F⁻¹ (0,40 et 0,28 W m⁻² °C⁻¹).

Les capteurs installés sur le toit sont orientés face au sud et inclinés de 45°. La batterie comprend 37 capteurs montés en parallèle (surface totale : 61 m² [660 ft²]). Les capteurs sont constitués de deux feuilles de verre trempé de 3 mm (1/8 in.) d'épaisseur, au-dessus d'un absorbeur en aluminium "roll-bond" noir. L'isolation thermique est assurée par une épaisseur de 90 mm (3,5 in.) de fibres de verre. La tuyauterie est en cuivre, avec des joints diélectriques à chacune des deux extrémités des capteurs. On a pris grand soin de rincer toute la tuyauterie et de la remplir avec de l'eau distillée. L'appareil a fonctionné ainsi pendant un an, puis a été modifié pour utiliser une solution aqueuse de glycol comme fluide de travail dans les capteurs.

Le système de stockage de l'énergie thermique est constitué par deux réservoirs en acier de 1,5 m (5 ft) de diamètre et 3,7 m (12 ft) de long, recouverts de Tinkolite. Ces réservoirs sont placés horizontalement dans le sous-sol de l'une des cours. Afin de minimiser les pertes d'énergie thermique, tout le sous-sol autour des réservoirs a été rempli de polyuréthane expansé sur place.

Le réfrigérateur solaire est une machine à absorption Arkla de 3 tonnes (10,5 kW) à solution aqueuse de bromure de lithium, qui a été modifiée par Arkla Industries pour fonctionner à l'eau chaude. La circulation dans la machine résulte de l'effet de thermosyphon de la pompe, qui exige une température d'admission dans le générateur d'au moins 88 °C (190 °F) pour assurer le démarrage. Outre la source d'eau chaude, la machine frigorifique exige une source d'eau froide. La libération de chaleur est assurée par une tour de refroidissement Marley de 7,5 tonnes (26 kW). La présence de cet appareil entraîne celle de deux moteurs consommateurs d'énergie : une pompe d'eau de refroidissement de 1/2 hp (375 W) et un ventilateur pour la tour de refroidissement de 1/3 hp (250 W).

La figure 18 donne le rendement des capteurs en fonction du rapport $\Delta t/HR$, où $\Delta t = t_{in} - t_a$ est la différence entre la température d'admission et la température ambiante et HR est l'insolation. La machine frigorifique à absorption exige un apport constant de chaleur de 16 kW (55 × 10³ Btu/h) pour assurer un refroidissement de 10,6 kW (36 × 10³ Btu/h). Pour obtenir ce résultat, la batterie de capteurs doit capter l'énergie solaire à raison de 262 W/m² (83 Btu/h/ft²). Si la température ambiante est de 32 °C (90 °F) et la température d'admission du fluide dans les capteurs est de 85 °C (185 °F), nous avons $\Delta t = 53$ °C (96 °F); il résulte de la figure 18 que HR doit être égal à 946 W/m² (300 Btu/h/ft²) et le rendement des capteurs égal à 28 %, ce qui représente le maximum possible pour la batterie.

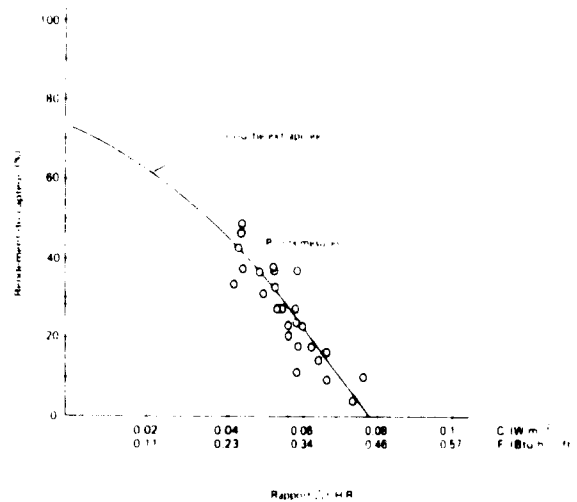


Figure 18. Rendement d'un capteur en fonction du rapport entre la différence des températures (admission - ambiante) et l'insolation

La température des réservoirs de stockage au début de l'été 1975 n'a jamais dépassé 71 °C (160 °F); en conséquence, aucune réfrigération solaire n'a été effectuée. Une vérification a révélé qu'il y avait d'importantes pertes thermiques des réservoirs. Avec un système approprié de réglage, il a été possible d'obtenir périodiquement une température de l'eau de 93 °C (200 °F); toutefois, l'ensemble était extrêmement sensible au passage des nuages. Un nuage devant le soleil pouvait entraîner une très forte chute du flux et les pertes dans les capteurs entraînaient une chute rapide de la température du circuit. Les valves de réglage, actionnées par un moteur, ne pouvaient pas fonctionner dans de telles conditions; on a donc abandonné ce système.

La comparaison ci-dessous entre l'énergie requise par une machine classique à compression et une machine solaire à absorption montre que la réfrigération par absorption exige trois fois plus d'énergie que la réfrigération par compression.

| Machine solaire à absorption | | Machine classique à compression | |
|---|--------|---------------------------------|-------|
| Apport d'énergie (W) | | | |
| Electrique | | | |
| Pompe des capteurs | 560 | Compresseur | 5 400 |
| Pompe de la machine | 125 | Soufflante | 640 |
| Pompe du générateur | 350 | Ventilateur du condenseur | 620 |
| Ventilateur Arkla | 560 | | |
| Pompe de l'eau de refroidissement | 350 | | |
| Ventilateur de la tour de refroidissement | 250 | | |
| Total partiel | 2 195 | | 6 660 |
| Solaire | 16 100 | | |
| Total | 18 295 | | 6 660 |
| Réfrigération (W) | | | |
| CP (production/apport) | 0,58 | | 1,76 |

Cette comparaison montre un avantage significatif de la machine solaire à absorption : ses six moteurs électriques n'exigent que le tiers de l'énergie nécessaire aux trois moteurs de la machine classique à compression. Ceci est important lorsqu'il faut économiser l'énergie électrique.

L'appareil décrit ci-dessus présente les inconvénients suivants :

- Le bromure de lithium exige une température minimum d'environ 90°C , qui est très difficile à obtenir avec des capteurs plans, à moins d'utiliser des matériaux sélectifs très coûteux;
- L'appareil est encombrant;
- Avec six moteurs indépendants, l'appareil est compliqué; il exige un système de commande tout aussi complexe que celui d'une machine classique.

Chauffage solaire des locaux

De nombreuses études ont été faites sur les aspects économiques du chauffage solaire des locaux. Les économies d'énergie varient de 30 à 80 % de la chaleur totale consommée. Elles dépendent notamment des conditions climatiques, de la forme, de l'emplacement et de l'orientation des bâtiments, du nombre d'étages, de la surface extérieure vitrée, des matériaux de construction, de la méthode et du type d'isolation thermique et de l'utilisation des locaux.

Des travaux de mise au point ont été entrepris dans des pays industrialisés comme dans des pays en développement, par exemple : aux Etats-Unis, en France, en Inde, aux Pays-Bas et dans la République fédérale d'Allemagne. Du point de vue technique, le chauffage solaire des locaux est déjà opérationnel. Néanmoins, des programmes de R-A sont entrepris pour augmenter le rendement, trouver de meilleures solutions architecturales et réduire les coûts. Dans de nombreux cas, le chauffage solaire des locaux permet également la fourniture d'eau chaude, comme les systèmes de chauffage classiques.

Il existe deux modes de chauffage solaire des locaux : passif et actif.

Systeme passif

Le principe du système passif est illustré par la figure 19. Le rayonnement solaire chauffe une surface absorbante : la surface extérieure noire du mur orienté vers le sud (dans l'hémisphère Nord). Dans l'espace entre la surface absorbante et le double vitrage, l'air s'échauffe et monte par l'effet de thermosiphon, puis pénètre dans le local par une ouverture à la partie supérieure du mur. A mesure que cet air chauffe le local, il se refroidit, descend et sort par une ouverture à la partie inférieure du mur.

Un système aussi simple est très facile à réaliser. Les murs constituent le système de stockage. A

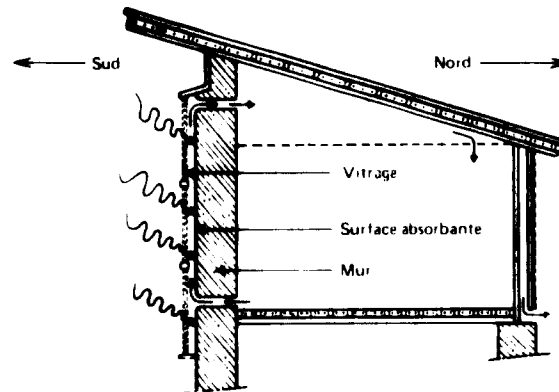


Figure 19. Système passif de chauffage solaire des locaux

Odeillo, dans le sud de la France, des installations de ce genre ont fourni 60-70 % du total de l'énergie nécessaire au chauffage.

Systeme actif

De l'eau, chauffée dans des capteurs plans, est envoyée dans un réservoir et circule dans des radiateurs ou des convecteurs installés dans les locaux à chauffer. L'eau chaude peut aussi passer dans des serpentins sur lesquels on souffle de l'air; ainsi, l'espace est chauffé par l'air chaud. Dans des conditions climatiques normales, on peut être obligé d'utiliser également une source auxiliaire de chaleur (figure 20).

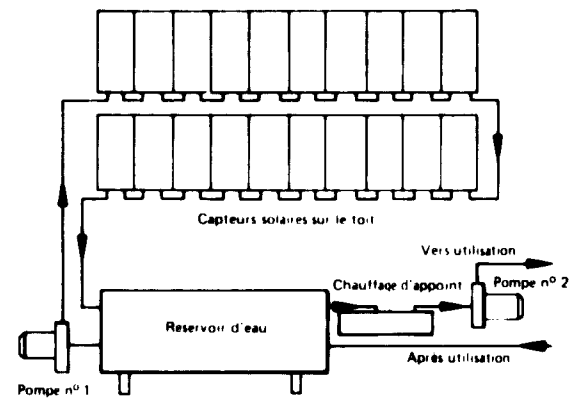


Figure 20. Système actif de chauffage solaire des locaux, chauffage d'appoint

Chauffage solaire de l'eau

Des chauffe-eau solaires sont déjà assez largement utilisés en Australie, à Chypre, aux Etats-Unis d'Amérique et au Japon. On a déjà dépassé le stade de la R-A, ainsi que celui des projets pilotes; la

technologie est fiable et bien établie. Il existe plusieurs modèles sur le marché international. Le plus courant consiste essentiellement en un capteur plan de 2 m² et un ballon de 200 litres.

Dans maints pays, des chauffe-eau solaires pourraient fournir toute l'eau chaude nécessaire aux ménages pendant toute l'année. Dans d'autres pays, ayant un ensoleillement moins favorable, un appareil classique d'appoint serait nécessaire.

Le développement des chauffe-eau solaires dépend de l'amélioration des capteurs plans à d'autres fins, telles que le chauffage des locaux ou les moteurs solaires.

Le chauffe-eau solaire mis au point par l'Institut de recherche Brace de l'Université McGill (Canada)

pourrait être utilisé dans une vaste gamme de pays en développement. La figure 21 donne un schéma de cet appareil.

Distillation solaire de l'eau

Généralités

La distillation de l'eau de mer ou des eaux saumâtres peut être obtenue avec des distillateurs solaires ou par des méthodes classiques : effet multiple, compression thermique, osmose inverse électrodialyse, humidification-déshumidification et congélation-dessalement. On ne traitera ici que de la

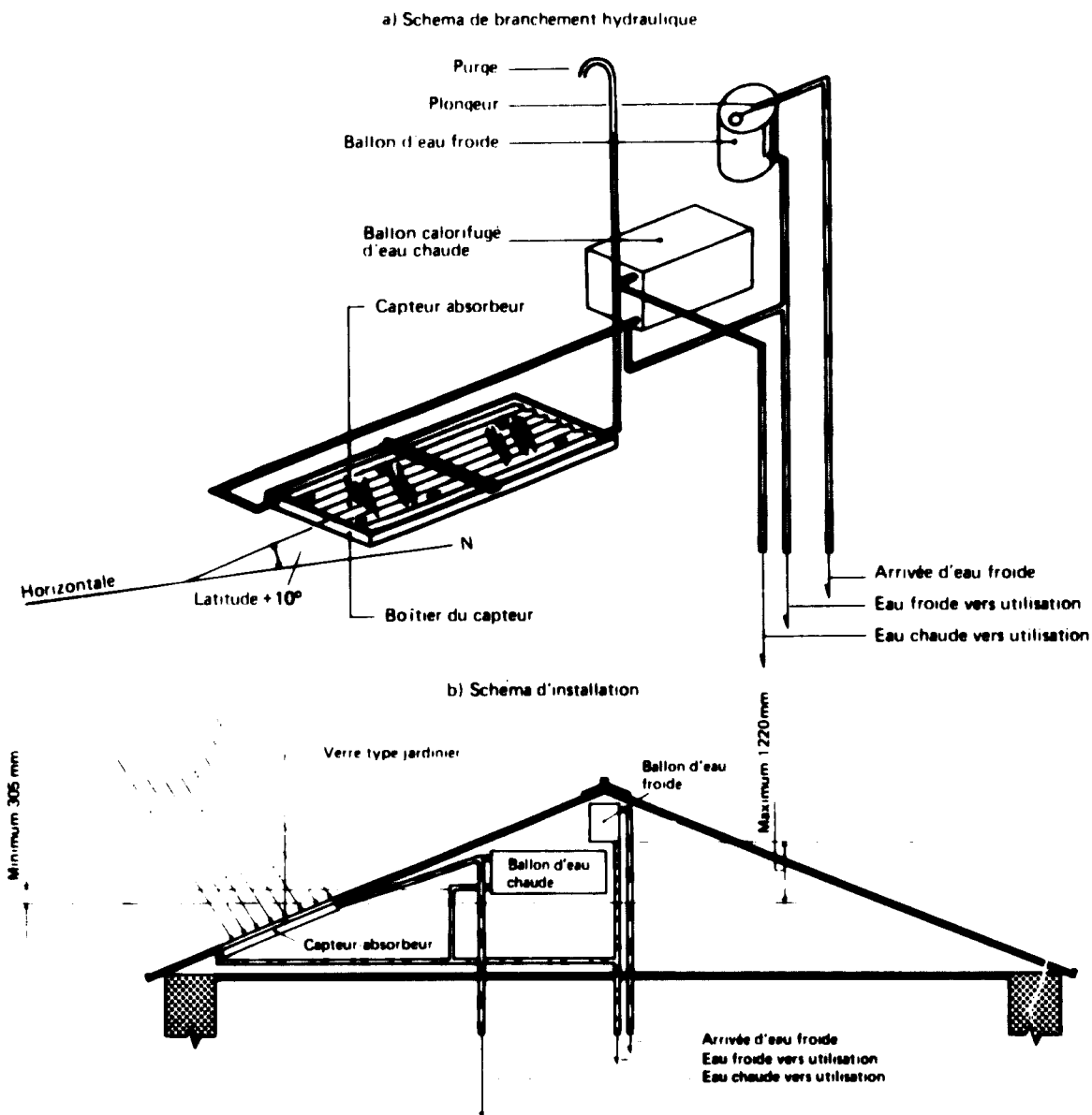


Figure 21. Chauffe-eau solaire de l'Institut de recherche Brace (Canada)

distillation directe dans des appareils solaires qui n'exigent pas de source extérieure d'énergie.

Le principe de la distillation solaire de l'eau est fondé sur l'effet de serre. Un certain volume d'eau salée ou saumâtre est introduit dans un bassin étanche à l'air et à l'eau, recouvert d'un vitrage ou de tout autre matériau transparent. Le fond du bassin est noir; il absorbe une large partie du rayonnement solaire et chauffe l'eau; il y a vaporisation. La vapeur atteint la couverture transparente plus froide; il y a condensation. Un dispositif approprié permet de recueillir l'eau de condensation.

Maintes installations de dimensions variables ont été construites dans plusieurs pays. En 1973,

Delyannis (Commission grecque de l'énergie atomique) a publié la liste reproduite dans le tableau 2 et illustrée par la figure 22. La figure 23 indique les variations annuelles de la productivité de l'installation de Nisiros (Grèce) pendant la période 1969-1973.

Le nombre des variables régissant la productivité des distillateurs solaires est très élevé; ces variables sont souvent interdépendantes. Parmi les plus importantes, citons :

Régime d'ensoleillement;

Vitesse du vent;

Précipitations;

TABLEAU 2. DONNEES SUR LES PLUS GRANDS DISTILLATEURS SOLAIRES CONSTRUITS, 1872-1973

| Pays ou région | Site | Type ^a | Année de construction | Surface (m ²) | Eau à distiller | Couverture | Etat en 1973 |
|----------------|-------------------|-------------------|-----------------------|---------------------------|-----------------|--------------|--------------|
| Australie | Muresk I | e | 1963 | 372 | Saumâtre | Verre | Refait |
| | Muresk II | e | 1966 | 372 | Saumâtre | Verre | En service |
| | Cooper Pedy | e | 1966 | 3 160 | Saumâtre | Verre | En service |
| | Caiguna | e | 1966 | 372 | Saumâtre | Verre | En service |
| | Hamelin Pool | e | 1966 | 557 | Saumâtre | Verre | En service |
| | Griffith | e | 1967 | 413 | Saumâtre | Verre | En service |
| Cap-Vert | Santa Maria | c | 1965 | 743 | Eau de mer | Synthétique | Abandonné |
| | Santa Maria | c | 1968 | | | | |
| Chili | Las Salinas | e | 1872 | 4 460 | Saumâtre | Verre | Abandonné |
| | Quillagua | e | 1968 | 100 | Eau de mer | Verre | En service |
| Espagne | Las Marinas | a | 1966 | 868 | Eau de mer | Verre | En service |
| Etats-Unis | Daytona Beach | a | 1959 | 228 | Eau de mer | Verre | Refait |
| | Daytona Beach | a | 1961 | 246 | Eau de mer | Verre | Démonté |
| | Daytona Beach | b | 1961 | 216 | Eau de mer | Synthétique | Démonté |
| | Daytona Beach | b | 1963 | 148 | Eau de mer | Synthétique | Démonté |
| Grèce | Simi I | b | 1964 | 2 686 | Eau de mer | Synthétique | Refait |
| | Simi II | d | 1968 | 2 600 | Eau de mer | Synth. étiré | Démonté |
| | Aegina I | c | 1965 | 1 490 | Eau de mer | Synthétique | Refait |
| | Aegina II | d | 1968 | 1 486 | Eau de mer | Synth. étiré | Abandonné |
| | Salamis | c | 1965 | 388 | Eau de mer | Synthétique | Abandonné |
| | Patmos | f | 1967 | 8 600 | Eau de mer | Verre | En service |
| | Kimolos | f | 1968 | 2 508 | Eau de mer | Verre | En service |
| | Nisiros | f | 1969 | 2 005 | Eau de mer | Verre | En service |
| | Fiskardho | f | 1971 | 2 200 | Eau de mer | Verre | En service |
| | Kioni | f | 1971 | 2 400 | Eau de mer | Verre | En service |
| Megisti | f | 1973 | 2 528 | Eau de mer | Verre | En service | |
| Haiti | | d | 1969 | 223 | Eau de mer | Verre | En service |
| Iles du Vent | Petit St. Vincent | b | 1967 | 1 710 | Eau de mer | Synthétique | En service |
| Inde | Bhavnagar | e | 1965 | 377 | Eau de mer | Verre | En service |
| Mexique | Natividad | d | 1969 | 95 | Eau de mer | Verre | En service |
| Pakistan | Gwadar I | f | 1969 | 306 | Eau de mer | Verre | En service |
| | Gwadar II | g | 1972 | 9 072 | Eau de mer | Verre | En service |
| Tunisie | Shakmou | d | 1967 | 440 | Saumâtre | Verre | En service |
| | Mahdia | d | 1968 | 1 300 | Saumâtre | Verre | En service |
| URSS | Bakharden | e | 1969 | 600 | Saumâtre | Verre | En service |

Source: AEC.

^a Voir figure 22.

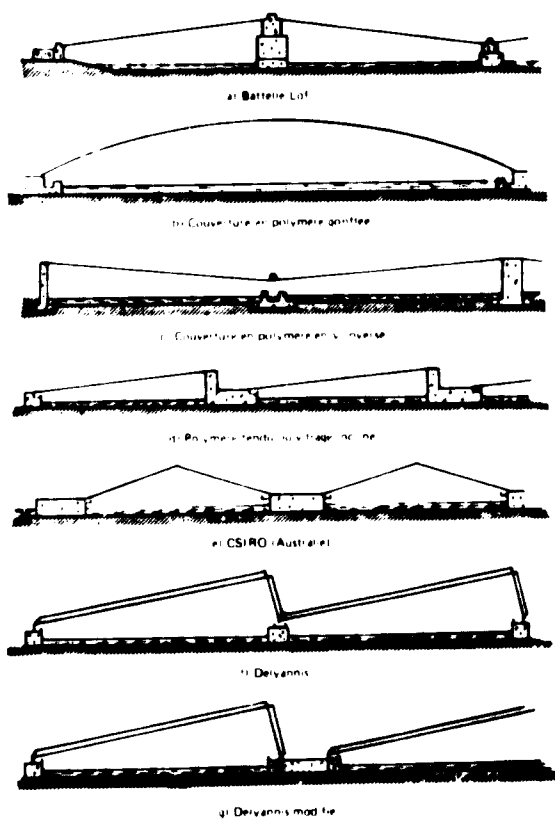


Figure 22. Distillateurs solaires

Conception du distillateur:
 Epaisseur du volume d'eau:
 Système de remplissage et de rinçage.
 Entretien.

Matériaux de construction

Le Bureau des eaux salines (Etats-Unis) a déclaré ce qui suit au sujet des matériaux de construction des distillateurs solaires :

“Depuis la construction du premier grand distillateur solaire, à Las Salinas (Chili), aux environs de 1872, les progrès les plus significatifs de la technique ont consisté dans l'amélioration des matériaux de construction. La productivité n'a pas beaucoup augmenté, mais les dépenses d'entretien et de fonctionnement ont été sensiblement réduites. Par exemple, le distillateur de 4 800 m² de Las Salinas était fait en bois, verre et mastic; son fonctionnement exigeait un employé de bureau, un vitrier, deux ouvriers spécialisés à plein temps et un charpentier de temps à autre. Par contre, certains distillateurs construits récemment fonctionnent avec un seul employé à plein temps et quelques-uns sont conçus pour fonctionner sans surveillance pendant de longues périodes. Le verre, le béton et l'asphalte semblent n'exiger qu'un minimum d'entretien.

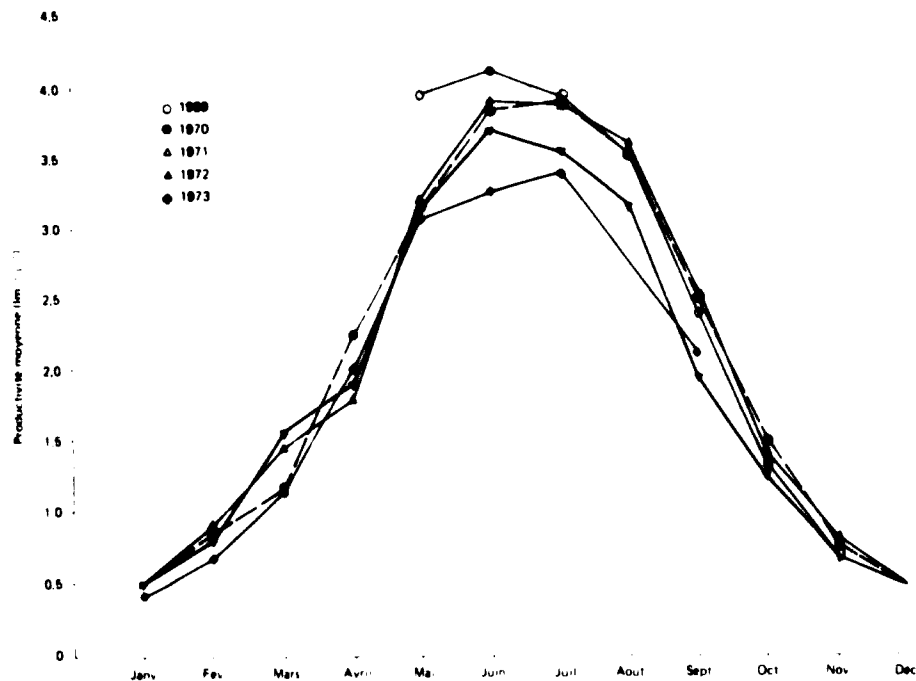


Figure 23. Variations annuelles de la productivité (quantité d'eau douce obtenue quotidiennement par unité de surface du distillateur) de distillateurs à Nisiros (Grèce), 1969-1973

On préfère d'habitude des matériaux locaux. Cependant, dans le choix des matériaux, il faut considérer soigneusement l'ensemble des aspects économiques, notamment l'entretien et la durée de vie, ainsi que les dépenses d'investissement. La tendance actuelle est d'utiliser des matériaux qui dureront environ 20 ans avec un minimum d'entretien, parmi ces matériaux, on peut citer le béton, le verre, le butylcaoutchouc et l'acier inoxydable.

Voici une liste des matériaux pour les divers éléments des distillateurs qui donnent satisfaction partout dans le monde. Pour chaque élément, les matériaux sont énumérés dans l'ordre de préférence du point de vue durée de vie. Quand un distillateur doit être construit directement sur le sol, avec un revêtement pour le bassin, il est souhaitable de répandre au préalable un insecticide et un herbicide pour réduire les risques de déchirure.

| Élément | Matériaux |
|------------------------|---|
| Revêtement du bassin | Butylcaoutchouc (0,015 à 0,030 in.) Tapis d'asphalte (0,12 à 0,25 in.) Polyéthylène noir (0,008 in.) Asphalte de toiture (sur béton, etc.) |
| Couverture | Verre ordinaire (0,10 ou 0,12 in.) Film de PVF mouillable* (0,004 in.) |
| Structure | Béton, Blocs de béton, Aluminium, Métal galvanisé, Séquoia* |
| Collecteur d'eau douce | Acier inoxydable, Butylcaoutchouc (revêtement) Polyéthylène noir (revêtement) |
| Joints d'étanchéité | Caoutchouc aux silicones, Matériau de calfatage asphalté Fluages de butylcaoutchouc |
| Tuyauteries et valves | PVC (chlorure de polyvinyle), Amiante-ciment (pour l'eau de mer) ABS (acrylonitrile-butadiène-styrène) |
| Réservoirs d'eau | Béton, Mortier |

*Durée de vie relativement courte¹.

Distillateur solaire ONUDI/FISE en Somalie

Avec l'aide financière du FISE, l'ONUDI exécute en Somalie un projet de distillation solaire dont l'élément principal est un distillateur d'environ 2 000 m² de surface d'évaporation. La production prévue, y compris l'eau de pluie recueillie, est de 5 à 6 m³ d'eau douce par jour.

Les plans de l'installation sont une adaptation de plans qui avaient été établis par l'Institut central de recherches sur le sel et les éléments chimiques de l'eau de mer (Inde) pour utilisation en Inde. Parmi les modifications, il faut citer l'amélioration de la tuyauterie, la diminution des passages entre les distillateurs, l'inclinaison du vitrage de couverture

¹ Bureau des eaux salines, rapport n° 546.

(15° au lieu de 20°), le remplacement du bois par de l'aluminium pour les supports du haut côté du vitrage, l'emplacement des réservoirs d'eau de mer, d'eau douce et d'eau mixte.

L'installation comprend 15 unités, comportant chacune 6 bassins symétriques et interconnectés d'environ 13 m de long et 1,5 m de large. Les principaux matériaux de construction sont la brique, le béton, le verre, le goudron, la peinture au mastic, le chatterton, l'aluminium en profilés et en feuilles et les tuyaux en métal galvanisé. Le coût estimé de ces matériaux et de deux pompes à main est d'environ 23 000 dollars en Inde; le prix estimé de la main-d'œuvre est d'environ 4 600 dollars. Le coût par unité de surface d'évaporation est donc d'environ 14 dollars/m².

A propos d'un autre distillateur de 200 m², on a suggéré de construire 12 unités expérimentales de 3 m² chacune pour comparer le comportement des matériaux, l'effet de l'isolation, etc. L'une de ces unités servirait de référence; chacune des 11 autres serait identique à la première, à l'exception d'une de ces variables: inclinaison, épaisseur de la couche d'eau, construction des murs, matériau de revêtement, isolation du bassin.

Conception

Il n'y a pas encore de consensus sur le modèle optimal de distillateur solaire. Toutefois, les considérations suivantes semblent recueillir l'accord général:

a) Il faut utiliser le plus possible des matériaux locaux et une technique simple;

b) Il faut utiliser des blocs de briques ou de ciment plâtrés, capables de supporter toutes les conditions atmosphériques et les effets de l'eau salée et d'assurer l'étanchéité;

c) L'aluminium pour la construction des murs et un vitrage pour la couverture représentent une solution qui est bonne mais coûteuse, et ils ne seraient pas toujours aisés à obtenir;

d) Pour la surface absorbante noire, on peut envisager deux solutions à l'heure actuelle: béton avec peinture bitumineuse spéciale, solution qui a été expérimentée avec succès en Inde; feuille de butylcaoutchouc d'environ 1 mm, solution qui a été également expérimentée avec succès en Australie, en Grèce et dans d'autres pays. Le butylcaoutchouc exige une technique plus complexe (étanchéité par vulcanisation ou avec des adhésifs), mais n'est pas affecté par le rayonnement solaire, les températures élevées ou les points secs; toutefois, on ne le trouve pas toujours dans les pays en développement;

e) L'isolation sous le bassin n'est pas justifiée quand la surface est importante, parce que le sol agit comme un milieu semi-infini dans lequel il ne peut y avoir qu'une très faible déperdition de chaleur; l'isolation des parois n'augmenterait pas sensiblement

la productivité, étant donné la surface relativement faible de transfert de chaleur. Le coût des matériaux d'isolation et de leur pose n'est donc pas économique du point de vue de la productivité de grands distillateurs. Néanmoins, il faudrait toujours étudier l'utilisation de matériaux isolants disponibles localement. Il est essentiel que toute isolation reste sèche. Une couche de terre sèche sous le revêtement du bassin est normalement suffisante aux fins d'isolation.

f) S'agissant de la couverture, du verre ordinaire d'environ 3 mm semble encore la meilleure solution. L'utilisation d'un double vitrage n'est pas justifiée. Les expériences faites avec des polymères synthétiques ne sont pas encore concluantes. On en a essayé plusieurs sortes (PVC, PVF, PTFE, polythène, polyester, polytrifluoromonochloroéthylène et nylon) dans des conditions moins sévères que celles des distillateurs de grandes dimensions. Les seuls matériaux qui dureront au moins cinq ans sont le PTFE de 0,005 in. (0,13 mm), le PVF de 0,004 in. (0,10 mm) et le polyester spécial de 0,005 in. (0,13 mm). En général, la durée de vie des polymères synthétiques exposés au rayonnement solaire est très courte. De plus, des couvertures de très faible épaisseur ne résistent pas au vent:

g) L'étanchéité du distillateur est très importante; à l'heure actuelle, on ne trouve pas sur le marché de liants efficaces et bon marché. Le caoutchouc aux silicones est très bon, mais il est aussi très cher. En Inde, on a utilisé avec succès des applications à froid de composés bitumineux conçus pour réparer les toitures, mais il est trop tôt pour savoir quelle sera leur durée de vie:

h) S'agissant de l'épaisseur du volume d'eau dans le distillateur, on convient généralement que de faibles épaisseurs assurent une meilleure productivité; mais si le sol n'est pas bien nivelé, des taches sèches peuvent apparaître sur le fond absorbant, à moins d'utiliser du butylcaoutchouc ou un matériau équivalent; une épaisseur de 5 cm semble être une solution réaliste:

i) Il n'y a pas accord général quant à la meilleure inclinaison de la couverture. Il est essentiel d'assurer la formation d'une pellicule permettant à la fois une bonne condensation et une bonne transmission du rayonnement solaire; une inclinaison de 10 à 20° semble acceptable. Pour une surface horizontale donnée, l'augmentation de la pente de la couverture augmente sa surface et donc son coût, et peut diminuer la productivité du distillateur:

j) L'effet de la géométrie de la couverture sur la fraction d'énergie incidente pénétrant dans le distillateur est négligeable pour les grandes installations, où la surface d'ombre causée par les parois est petite si on la compare à la surface d'évaporation:

k) Le grand axe des bassins est généralement orienté est-ouest ou nord-sud. Si la couverture est

symétrique ou à faible pente, son orientation n'affecte pas la productivité; si la couverture est asymétrique et à simple pente, le grand axe doit être orienté dans la direction est-ouest, avec le côté le plus bas vers l'équateur (vers le sud dans l'hémisphère Nord, vers le nord dans l'hémisphère Sud).

l) Le distillateur devrait également servir à recueillir l'eau de pluie.

m) On n'a pas encore déterminé le régime optimal d'alimentation du distillateur en eau fraîche (en continu ou par intermittence). Toutefois, il est certain que le rinçage périodique du distillateur avec de l'eau fraîche peut empêcher le dépôt de sel et la croissance d'algues, tous deux diminuant la productivité. Il faut éviter le dépôt de sel, car il augmente la réflectance de la surface noire et diminue de ce fait la productivité:

n) L'addition de quelques millionièmes d'un sel de cuivre peut aider à prévenir la formation d'algues.

Séchage solaire

On pratique depuis très longtemps le séchage de denrées alimentaires, de produits agricoles ou de poissons par le rayonnement solaire. Cependant, on fait depuis quelques années des travaux intenses de R.A. aussi bien dans les pays industrialisés que dans les pays en développement, pour systématiser le processus et pour protéger les produits contre les précipitations, les poussières et les insectes. L'Institut de recherche Brace² (Canada) a établi une étude très utile du processus; la plus grande partie de la présente rubrique est fondée sur cette étude. Les données sur les séchoirs solaires sont présentées sous forme d'exemples, avec description des séchoirs, résultats d'expérience et diagrammes. L'étude contient également des renseignements d'ordre économique.

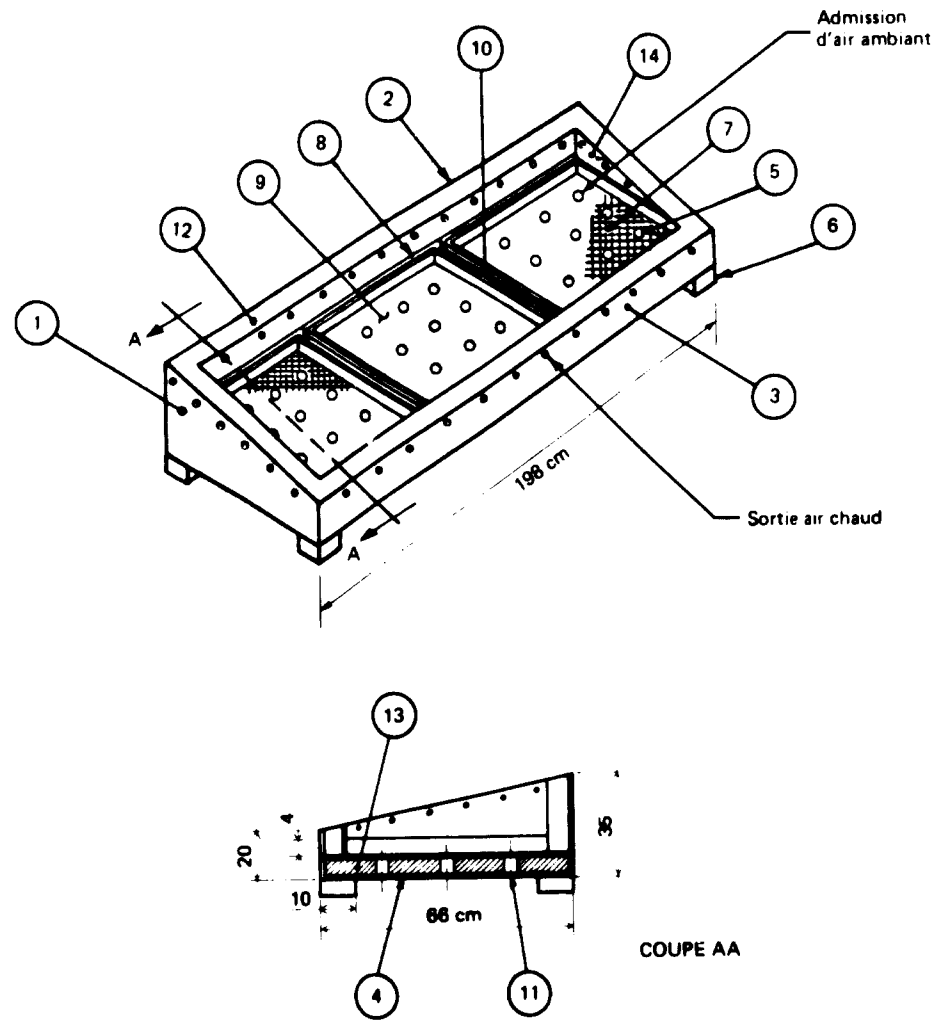
Exemple n° 1. Coffre de séchage solaire conception générale

Le coffre de séchage solaire est essentiellement une petite serre dans laquelle on peut déshydrater des fruits, des légumes ou d'autres produits. Il est isolé thermiquement et recouvert d'un double vitrage. Des événements dans le fond permettent à l'air frais de pénétrer par convection dans le coffre.

La construction d'un tel séchoir peut revêtir un grand nombre de formes. Cependant, on peut recommander certaines spécifications pour tous les séchoirs de ce type (figure 24).

La longueur du coffre doit être supérieure à trois fois sa largeur, afin de minimiser l'effet d'ombre des parois. La pente de la couverture est donnée par la figure 25; on voit que l'angle recommandé est

² A Survey of Solar Dryers, Rapport technique T99, Institut de recherche Brace, Université McGill, Ste Anne de Bellevue, Québec (Canada) (1975).



| Élément | Matériau | Dimensions (cm) | Nombre |
|---------------------------|-------------------|-----------------|--------|
| 1 Panneau latéral | Bois | Epaisseur : 2 | 2 |
| 2 Panneau arrière | Bois | Epaisseur : 2 | 1 |
| 3 Panneau avant | Bois | Epaisseur : 2 | 1 |
| 4 Fond | Contreplaqué | 198 x 66 x 2 | 2 |
| 5 Event | Tube en polythène | Ø 1,27; 6 | 27 |
| 6 Pied | Bois | | 4 |
| 7 Plateau | Bois et grillage | 62 x 62 | 3 |
| 8 Accès | Bois | | |
| 9 Couverture | Verre | 61 x 62 | 3 |
| 10 Glissière | Bois | | 4 |
| 11 Moustiquaire | Fibres de verre | | 27 |
| 12 Cadre de la couverture | Bois | | 1 |
| 13 Isolation | Sciure de bois | Epaisseur : 5 | — |
| 14 Revêtement intérieur | Fauille aluminium | | 2 |

Figure 24. Vues et spécifications d'un coffre de séchage solaire

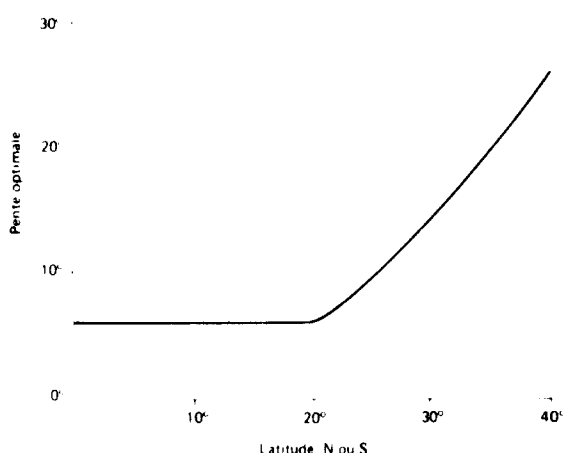


Figure 25. Pente optimale de la couverture d'un séchoir solaire en fonction de la latitude du lieu

fonction de la latitude. Le graphique vaut pour les deux hémisphères. Il faut noter que pour les latitudes inférieures à 20°, la pente est constante et égale à 6°; ceci a pour but de réduire au minimum la différence de hauteur des parois, en vue d'une circulation adéquate de l'air de convection sur toute la surface de séchage, tout en permettant l'écoulement de l'eau de pluie. La couverture transparente doit être faite de deux vitrages de 2 mm ou de deux feuilles de polymère synthétique (d'environ 0,13 mm).

En général, les couvertures en polymère synthétique ont une durée de vie limitée; il faut donc utiliser des feuilles ayant été traitées pour assurer leur protection contre le rayonnement ultraviolet. On peut utiliser le polyester ou le PVC; des feuilles de polyéthylène ou d'acétate de cellulose ne conviendraient pas; il faudrait les remplacer à la fin de chaque saison de séchage et il se pourrait qu'elles ne donnent pas de bons résultats en service. Bien qu'il puisse être avantageux de remplacer la couverture à chaque saison dans certains cas, on risque d'avoir des problèmes avec des feuilles ne pouvant pas supporter les hautes températures produites dans le coffre, lesquelles peuvent atteindre 80 à 100 °C dans certains séchoirs. Pour ce type de séchoir, on conseille d'utiliser un vitrage ordinaire, posé sur un cadre approprié.

Pour les modèles portatifs, les cadres peuvent être en bois, en métal ou en carton fort. On peut utiliser le contre-plaqué pour les modèles les plus raffinés, l'osier, le rotin ou le bambou pour les modèles les plus primitifs. On peut faire le fond perforé et les parois en plaçant un isolant entre deux épaisseurs d'osier noirci; cela réduirait le coût et permettrait de faire appel à l'industrie locale.

Des structures permanentes peuvent être construites en adobé, en briques, en pierres ou en béton.

L'isolation doit être faite avec des matériaux disponibles localement, tels que copeaux, sciure de bois, bagasse, fibres de cocotier, déchets de laine et

poils d'animaux. Dans les régions infestées par les fourmis fauves, les termites et autres insectes nuisibles, les matériaux susceptibles d'être attaqués doivent être protégés de manière appropriée avant d'être placés dans le châssis du coffre.

Le coffre doit être réalisé comme indiqué à la figure 24. (Les dimensions données sont celles du séchoir décrit dans l'exemple n° 2 ci-dessous.) L'isolation pour le fond et les parois doit avoir au moins 5 cm d'épaisseur. Des événements doivent être pratiqués dans le fond et aménagés avec de petits bouts de tuyauterie (bouts de tuyaux d'arrosage en polymère synthétique ou en caoutchouc, bambou, etc.). Lorsque les insectes sont à craindre, toutes les ouvertures du coffre doivent être recouvertes d'une moustiquaire (de préférence en fibres de verre) ou de gaze. En général, la haute température du coffre décourage les insectes et les rongeurs d'y pénétrer et de s'y nourrir. En outre, dans les régions arides où il y a une forte concentration de poussières et de débris dans l'air, la couverture transparente prévient la contamination des produits.

La couverture transparente peut être fixée sur un cadre, qui est ensuite attaché au châssis du coffre. Le vitrage peut être mastiqué sur le cadre; sinon, il doit être maintenu fermement en place par un couvre-joint approprié. Il faut s'assurer que la couverture est absolument étanche à l'eau, pour prévenir la détérioration de l'intérieur et l'humidification de l'isolant. Tous les matériaux du cadre doivent être peints en noir ou en couleur sombre pour absorber le maximum de rayonnement solaire. Des attaches doivent être fixées à la bordure supérieure du cadre pour protéger la couverture contre un soulèvement excessif par le vent.

Il faut percer plusieurs ouvertures dans les panneaux latéraux et le panneau arrière; elles constitueront des événements pour l'évacuation de l'air chaud et humide. Leur nombre dépend des conditions climatiques et de la nature des produits à sécher. Une méthode satisfaisante consiste à faire initialement le minimum d'évents latéraux et à perforer ensuite les ouvertures nécessaires pour prévenir une condensation interne; cette méthode assure le nombre voulu d'évents.

Le panneau arrière doit être pourvu d'accès à l'intérieur du coffre. Tous les accès doivent être aménagés sur le panneau arrière afin de prévenir une ombre exagérée sur le séchoir pendant les manipulations.

Les plateaux de séchage doivent être fabriqués, comme indiqué, en grillage galvanisé ou en toute autre matériau similaire. Ils doivent être placés sur des glissières de quelques centimètres de hauteur, afin d'assurer la circulation d'une quantité raisonnable d'air au-dessous et autour du produit à sécher.

L'intérieur du coffre doit être peint en noir. L'extérieur doit être peint avec une peinture aluminisée. Si on le désire, l'intérieur des panneaux

latéraux et arrière peut être recouvert d'une feuille d'aluminium; sinon, il faut peindre ces surfaces en noir.

L'opération de séchage n'est pas compliquée. Le produit à sécher est prétraité de la manière habituelle (c'est-à-dire blanchi et fumé), puis placé sur les plateaux perforés, à raison d'environ 7,5 kg de produit par mètre carré de surface de séchage. Un petit thermomètre inséré dans l'un des événements et protégé contre le rayonnement solaire direct est un accessoire utile. Les températures maximales que les produits agricoles peuvent supporter varient fortement.

Si le produit à sécher peut être affecté par le rayonnement solaire direct ou si la couleur claire de ce produit réfléchit une forte proportion du rayonnement incident, il est souhaitable de recouvrir les plateaux d'un treillis de matière plastique ou de gaze noire. Ce treillis ne doit pas empêcher la circulation d'air à travers les plateaux, mais doit absorber le rayonnement et transmettre la chaleur au produit par conduction et convection. L'augmentation de température qui en résulte peut être contrôlée en ouvrant les accès du panneau arrière. Ce système de contrôle approximatif de la température peut être facilement maîtrisé avec un peu d'expérience.

Exemple n° 2. Coffre de séchage solaire à Kampur (Inde) : résultats expérimentaux

Données climatiques

Les données climatiques pertinentes pour le lieu d'expérience sont les suivantes :

| | |
|--------------------------------------|-------|
| Température maximale en été | 45 °C |
| Température minimale en hiver | 10 °C |
| Heures d'ensoleillement dans l'année | 4 000 |
| Jours sans soleil dans l'année | 30 |

On a constaté que l'inclinaison optimale du séchoir était de 13 °C en été et de 40° en hiver.

Données de séchage

Le séchoir a été utilisé à des fins expérimentales de juillet 1971 à juillet 1972. Le tableau 3 donne les résultats obtenus.

A des fins de comparaison, le tableau 4 donne une idée des limites de température et des quantités possibles d'autres produits avec un séchoir ayant les mêmes dimensions et spécifications dans le climat sec, aride et sans nuage des pays méditerranéens.

Conditions de fonctionnement

On a constaté qu'on obtenait à l'intérieur du séchoir une température moyenne de 75 °C, alors que la température extérieure moyenne était de 35 °C.

Le séchoir a été fabriqué en deux jours, conformément aux spécifications de la figure 24, et a coûté environ 20 dollars en 1973. Les dépenses annuelles d'exploitation ont été les suivantes (en roupies) :

| | |
|-----------------------------|------------------------|
| Amortissement | 16 |
| Intérêt du capital (à 10 %) | 16 |
| Divers | 8 |
| Total | 40 (environ 5 dollars) |

Conclusions

La durée de vie du séchoir est estimée à 10 ans. Les séchoirs solaires permettent un gain de temps considérable par comparaison au séchage ordinaire en plein air. De plus, le produit obtenu avec un séchoir solaire est supérieur des points de vue goût et odeur et n'est pas contaminé par les poussières ou infesté par les insectes.

Une couverture en polymère synthétique est parfois préférable à un vitrage qui peut être brisé par des pierres, etc. Si l'on ne tient pas compte du risque de bris, le vitrage aura normalement une plus longue durée de vie de 10 à 20 ans si le séchoir est installé sur le toit d'un bâtiment. En dernière analyse, c'est au fermier de décider lui-même quelle est la couverture la plus économique et la plus satisfaisante.

Le séchoir étant facile à fabriquer, le fermier peut le faire lui-même avec des outils d'usage courant, diminuant ainsi ses frais.

Le séchoir peut aussi être utilisé pour chauffer des aliments et d'autres produits. Il est particulièrement avantageux comme source autonome de chaleur à 70-80 °C dans les champs et dans les fermes isolés.

TABLEAU 3. RESULTATS EXPERIMENTAUX AVEC UN SECHOIR A KAMPUR (INDE)

| Produit | Quantité séchée (g) | Prétraitement | Humidité (%) | | Température maximale permise (°C) | Temps de séchage (h) |
|--------------|---------------------|---------------|--------------|-----------------|-----------------------------------|----------------------|
| | | | Initiale | Finale préférée | | |
| Prunes | 750 | Sulfatage | 85 | 15-20 | 77 | 18 |
| Pêches | 275 | Aucun | 80 | 5-6 | 77 | 11 |
| Pois | 420 | Blanchiment | 80 | 5-6 | 66 | 5 |
| Choux-fleurs | 200 | Aucun | 85 | 5-6 | 66 | 2,5 |

TABLEAU 4. PERFORMANCES PROBABLE DU MEME SECHOIR DANS LE CLIMAT MEDITERRANEEN

| Produit | Quantité de produit (frais) séchée (kg) | Temps de séchage (j) | Température maximale permise (°C) |
|----------|---|----------------------|-----------------------------------|
| Abricots | 4 | 2 | 66 |
| Ail | 2,6 | 2 | 60 |
| Raisins | 5,7 | 4 | 88 |
| Okra | 3 | 2 | 66 |
| Oignons | 3 | 2 | 71 |

Exemple n° 3. *Séchoir solaire à ventilateur éolien (République arabe syrienne)*

Plusieurs séchoirs à ventilateur éolien du type décrit ci-dessous ont été utilisés en République arabe syrienne, à titre expérimental, entre 1964 et 1968.

Caractéristiques

Le séchoir peut être décrit comme une chambre de séchage dans laquelle de l'air chauffé par un capteur solaire est aspiré par un ventilateur éolien (voir figure 26).

Le capteur solaire consiste essentiellement en un panneau noir reposant sur un isolant et recouvert d'une feuille en polymère synthétique ou d'un

vitrage. Le capteur est orienté plein sud et incliné selon l'angle optimal pour la région et la saison.

L'air pénètre dans le capteur par le bas. Il passe entre le panneau noir (absorbeur) et la couverture transparente. L'efficacité du capteur est accrue en plaçant un treillis noir entre l'absorbeur et la couverture; le rayonnement solaire qui pénètre à travers la couverture transparente est alors absorbé à la fois par le treillis et par le panneau. Le treillis constitue une surface supplémentaire de transfert de chaleur, ce qui augmente la quantité de chaleur fournie à l'air passant dans le capteur. Avec ce système, on a obtenu des rendements supérieurs à 75 % pour le capteur.

La partie supérieure du capteur, par où sort l'air chaud, est reliée à la base de la chambre de séchage, qui contient des cheminées adjacentes comportant six plateaux chacune. L'air monte en circulant à travers les produits à sécher. Une chaleur supplémentaire est fournie par le rayonnement solaire qui traverse les parois transparentes des faces est, sud et ouest de la chambre de séchage. La face nord et le fond de la chambre de séchage sont en panneaux noirs isolés pour réduire les pertes de chaleur. Un ventilateur éolien rotatif est placé au haut d'une cheminée qui surmonte la chambre de séchage. Cette cheminée doit avoir une hauteur appropriée pour obtenir un bon tirage et augmenter l'effet du vent.

Le ventilateur est une girouette en forme de sphère cannelée. En tournant sous l'effet du vent, il

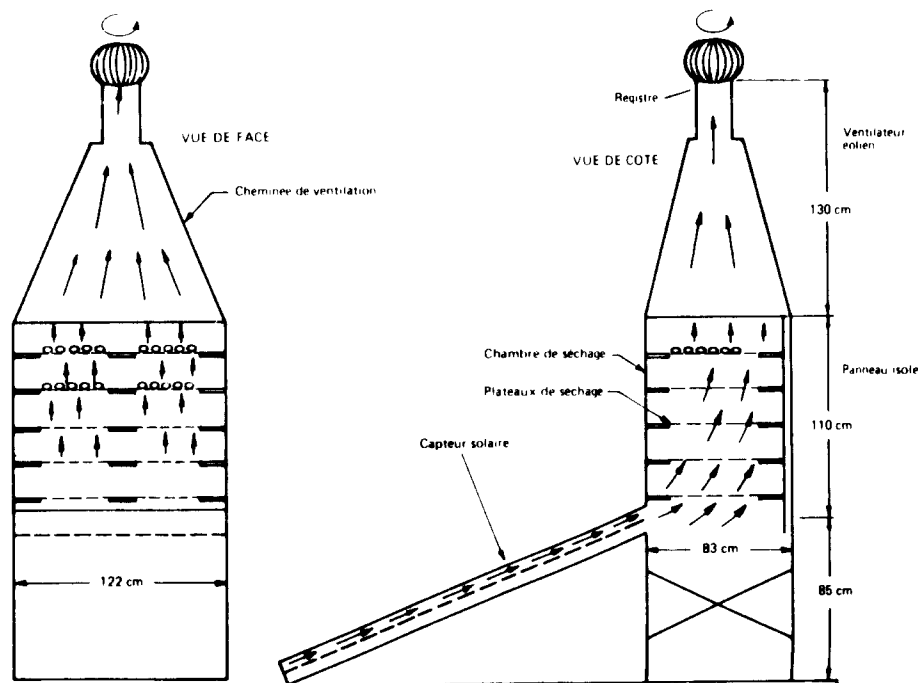


Figure 26. Séchoir solaire à ventilateur éolien

évacue l'air de la cheminée. La girouette est montée sur un roulement à billes. Le frottement est faible et la force vive maintient la girouette en rotation même avec des vents sporadiques. Des essais quantitatifs ont montré que ce ventilateur assure l'évacuation constante d'un fort volume d'air en dépit de vents intermittents. Un extracteur stationnaire installé au haut d'une cheminée peut également être utilisé; cependant, il ne fonctionne que par convection naturelle pendant les périodes sans vent.

Voici les matériaux de construction :

| | |
|-------------------------|--|
| Chambre de séchage | |
| Surfaces transparentes | Feuille de polyester |
| Autres surfaces | Panneaux noirs pour la face nord et le fond |
| Isolation | Paille |
| Plateaux | Treillis métallique |
| Capteur solaire | |
| Couverture transparente | Feuille de polyester |
| Absorbant | Panneau noir et treillis en polymère synthétique noir à 2 cm au-dessus |
| Isolation | Paille |
| Châssis | Panneaux noirs pour les parois latérales et le fond |

Données climatiques

Le séchoir est installé à Dūma (près de Damas), à 33° 33' de latitude N et à 36° 24' de longitude E. Le climat est caractérisé par des étés secs, avec un ciel sans nuage, et des hivers frais et partiellement pluvieux. La température mensuelle moyenne subit des variations importantes qui permettent de diviser l'année en quatre saisons distinctes. Néanmoins, les périodes de printemps et d'automne se confondent partiellement avec la période de l'été désertique classique : température diurne élevée, humidités relatives faibles, journées ensoleillées et sans nuage, pas de précipitations pendant presque six mois. Dans la plus grande partie du pays, l'ensoleillement pendant la période mai-octobre est supérieur à 85 %; pendant la période juin-septembre, il est généralement supérieur à 95 %.

Données de séchage

L'appareil a permis de sécher avec succès de l'okra, du cousa (variété Baladi), de la courge, de la guimauve potagère, de l'aubergine, de la purée de tomates et des ignames. A titre d'exemple du rendement de séchage obtenu, on a indiqué que les temps de séchage pour l'okra et le cousa étaient inférieurs respectivement de 20 à 58 % au temps de séchage en plein air. En outre, la qualité du produit obtenu avec ce séchoir a été jugée supérieure.

On a également indiqué que le rendement du capteur variait entre 64 et 88 % (rapport entre les calories absorbées par l'air dans le capteur et les calories captées).

Les conditions de fonctionnement pendant les essais décrits ci-dessus étaient les suivantes : journée ensoleillée, température de l'air ambiant comprise entre 30 et 34°C. La température de l'air chaud à l'entrée de la chambre de séchage était comprise entre 36,2 et 58,4°C.

Observations

Pour ce mode de séchage solaire, le rendement augmente en fonction du débit d'air dans la chambre de séchage. Si la vitesse moyenne du vent est élevée, un extracteur stationnaire est aussi pratique qu'un ventilateur rotatif. Si l'on désire obtenir des températures plus élevées pour le séchage de certains produits, le montage de registres dans la cheminée permet de contrôler le débit d'air et, par conséquent, la température dans le séchoir. Si le diamètre du ventilateur est faible, il semble préférable d'utiliser une cheminée ayant un profil plus large et une pente uniforme jusqu'au ventilateur; on diminue ainsi le frottement de l'air et on assure un débit approprié.

Evaluation

Ces séchoirs solaires sont faciles à construire et peu coûteux à exploiter. Cependant, il faudrait utiliser au maximum des matériaux locaux et des techniques locales. On pourrait encourager les fermiers à construire leurs propres séchoirs d'après des modèles conçus dans le pays et disponibles à des fins de démonstration.

Dans les conditions actuelles, pour de petites installations, la seule source d'énergie extérieure est le vent. Si l'on a recours à la convection forcée grâce à des ventilateurs actionnés par des moteurs thermiques, électriques ou solaires, il y a lieu de déterminer le pourcentage de l'énergie consommée par ces moteurs qui peut être transformé en énergie mécanique. De nombreux projets de recherche sont entrepris dans divers pays en développement; il semble que les suggestions ci-après pourraient figurer dans ces programmes de recherche au sujet de la convection forcée :

a) Etude de l'influence de la température de l'air chaud obtenu grâce au rayonnement solaire. Cette température pourrait être modifiée jusqu'à ce qu'elle atteigne le maximum compatible avec la conservation de la qualité des produits à sécher; à cette fin, on pourrait faire varier le rendement des capteurs ou le débit d'air chaud;

b) Etude de l'influence du nombre de Reynolds sur le débit d'air à travers les produits à sécher, en faisant varier le débit du ventilateur;

c) Réduction de l'énergie utile du fluide de travail en optimisant la baisse de pression entre les capteurs et la sortie du séchoir. En régime de séchage intermittent, il faudrait calculer et mesurer l'humidité à la fin de chaque période.

II. EVALUATION TECHNO-ECONOMIQUE DU MATERIEL SOLAIRE

Comparaison des moteurs solaires et des moteurs à combustion interne

Dans la présente étude, on entend par "moteur solaire" un appareil comportant un moteur actionné par l'énergie solaire; par "moteur à combustion interne" on entend seulement les moteurs Diesel et les moteurs à essence (les turbines à gaz de très faible puissance n'existent pas encore sur le marché).

De nombreux facteurs pourraient être pris en considération dans une comparaison techno-économique de cette nature, mais par souci de simplification on limitera le plus possible leur nombre sans pour autant altérer sensiblement la validité de la comparaison. On étudiera donc les facteurs suivants: coût de l'appareil, amortissement, entretien, réparations et énergie consommée; impact de la technologie solaire sur le développement industriel.

On trouvera plus loin une équation générale qui donne le prix par unité de puissance installée auquel le moteur solaire devient plus économique qu'un moteur Diesel ou un moteur à essence. Pour simplifier cette équation, on a dû faire certaines hypothèses dont il faudra tenir compte lorsqu'on voudra en tirer des conclusions.

Hypothèses

Dans un régime favorable d'ensoleillement, un moteur solaire peut fonctionner environ 6 heures par jour, mais il ne fonctionne pas à plein rendement pendant toute cette période. De ce fait, il semble raisonnable d'envisager un temps de fonctionnement de 1 500 heures par an à pleine puissance. Cette durée peut être augmentée avec un stockage important de chaleur.

Sauf à des fins expérimentales, l'utilisation de moteurs solaires de moins de 1 kW ne semble pas justifiée dans les pays en développement, à court et à moyen terme. Par exemple, une pompe solaire de 0,50 kW peut être remplacée par une pompe de 0,25 kW fonctionnant 8 heures par jour au moyen de la traction animale. L'économie d'énergie due à de petits moteurs solaires est faible; par exemple, un moteur solaire de 0,5 kW permet d'économiser seulement quelque 250 kg de fuel par an. Le transport d'une telle quantité de fuel ne pose pas de problème. Des moteurs solaires dans la gamme de 2 à 15 kW seraient plus économiques et se vendraient mieux.

Un moteur Diesel ou un moteur à essence peut fonctionner facilement 8 heures par jour (3 000 heures par an). On considérera un groupe de deux moteurs ayant chacun la moitié de la puissance du moteur solaire, afin d'avoir un moteur de remplacement et de compter sur une performance fiable.

La plupart des petits moteurs Diesel actuels, tournant entre 1 000 et 15 000 tr/mn, ont une puissance de 2 kW ou davantage. Par conséquent, on n'envisagera que des moteurs à essence pour les petites puissances et des moteurs Diesel pour les puissances de 10 à 15 kW.

On admettra que le coût annuel de l'emprunt nécessaire pour financer l'installation est égal au produit de la moitié du taux d'intérêt par le montant de l'emprunt. Cette simplification n'altère pas sensiblement l'exactitude de la comparaison, car elle s'applique également aux installations solaires et aux installations classiques et elle est peu importante en regard des autres termes de la comparaison.

Il n'est pas tenu compte des effets de l'inflation.

Equation de comparaison des coûts

Sur la base des hypothèses ci-dessus, on peut écrire l'équation suivante :

$$\left(a_s + b_s + \frac{i}{2}\right) K_s = \left(a_t + b_t + \frac{i}{2}\right) K_t + q_f c_f + q_l c_l \quad (1)$$

dans laquelle on a :

Variables

- a* taux annuel d'amortissement (numériquement égal à l'inverse de la durée de vie probable du moteur exprimée en années)
- b* rapport coût annuel d'entretien et de réparation/coût du moteur installé
- i* taux d'intérêt de l'emprunt pour financer le coût du moteur installé
- K* coût du moteur par unité de puissance installée
- q* consommation annuelle de fuel, d'essence ou de lubrifiant par unité de puissance installée
- c* coût unitaire du fuel, de l'essence ou du lubrifiant

Indices

- s* Moteur solaire
- t* moteur thermique (plus précisément : d = Diesel; e = essence)
- f* fuel ou essence
- l* lubrifiant

Application numérique

Valeurs des variables

La valeur probable des variables de l'équation (1) est discutée ci-dessous.

Durée de vie probable du moteur

Moteur solaire. Les fabricants parlent d'une durée de vie de 20 ans. Compte tenu des conditions techniques actuelles, ce chiffre semble optimiste. Nous admettons ici une durée de vie de 10 ans; par conséquent, $a_s = 0,1$.

Moteur Diesel. La durée de vie d'un moteur Diesel peut atteindre 20 000 heures de fonctionnement, suivant la puissance, la conception (notamment la vitesse de rotation), la vitesse de déplacement du piston, le système de refroidissement, les matériaux, le procédé de fabrication et les conditions de fonctionnement (cycle de travail quotidien, entretien, conditions climatiques). On admettra ici une durée de vie de 6 000 heures. Ce chiffre semble raisonnable pour des lieux écartés, où il semble plus économique de remplacer le moteur avant que de grosses réparations ne soient nécessaires. Le taux d'amortissement sera donc $a_i = 0,25$.

Moteur à essence. Une durée de vie de 3 000 heures de fonctionnement sera retenue pour le moteur à essence, soit $a_i = 0,5$.

Entretien et réparations

Moteur solaire. Les fabricants disent parfois que le coût de l'entretien et des réparations est nul ou négligeable. Cependant, une machine actionnée par un moteur solaire - tout comme le moteur lui-même - demandera toujours un certain entretien et des réparations (remplacement de vitrage brisé pour les capteurs solaires, remplacement d'une isolation détériorée, nouvelle peinture des caissons des capteurs, nouvelle peinture éventuelle de la surface noire des absorbants, addition de fluide de travail, réparation des fuites et plomberie). Le salaire d'un employé à temps complet ou à temps partiel pour l'entretien journalier n'a pas été pris en considération, car il est également exigé pour les moteurs Diesel et les moteurs à essence. Compte tenu de la durée de vie probable, on obtient les valeurs $b_s = 0,02-0,03$ pour les moteurs solaires thermiques et $b_s = 0,01$ pour les photopiles.

Moteur thermique. Pour l'entretien et les réparations des moteurs Diesel et des moteurs à essence, on prendra des valeurs $b_d = b_e = 0,20$.

Taux d'intérêt

On l'évaluera à 8 % ($i = 0,08$), bien qu'il soit supérieur à l'heure actuelle.

Consommation de fuel et de lubrifiant

Moteur Diesel. La consommation de fuel est d'environ 0,25 kg/kWh et celle de lubrifiant d'environ 0,007 kg/kWh.

Pour obtenir le coût total du fuel et du lubrifiant, on admettra que le coût du lubrifiant est de cinq fois supérieur à celui du fuel. Ainsi, la

consommation d'équivalent fuel est égale à $0,25 + 0,007 \times 5 = 0,285$ kg/kWh. Si le moteur fonctionne 1 500 heures par an, nous obtenons q_f (équiv) = $0,285 \times 1 500 = 427,5$ kg/kW pour la consommation annuelle par unité de puissance installée. Comme les conditions d'exploitation du moteur ne seront pas toujours optimales, il n'est pas déraisonnable d'augmenter le chiffre ci-dessus d'environ 17 %, pour obtenir un chiffre rond de 500 kg/kW, soit 0,5 t/kW, comme valeur de q_f .

Moteur à essence. On admettra que la consommation annuelle d'équivalent fuel pour le moteur à essence est supérieure de 20 % à celle des moteurs Diesel, ce qui donne la valeur $q_f = 0,6$ t/kW.

Comparaisons

Un moteur solaire de 10 kW fonctionnant 1 500 heures par an sera comparé à un groupe de deux moteurs Diesel de 5 kW chacun, tournant à 1 500 tr/mn, fonctionnant pendant 6 000 heures sur une période de quatre ans. Un moteur solaire de 2 kW sera comparé à un groupe de deux moteurs à essence de 1 kW, fonctionnant pendant 3 000 heures sur une période de deux ans.

Compte tenu des hypothèses ci-dessus, on peut écrire les équations suivantes : pour les moteurs Diesel :

$$(0,10 + 0,03 + 0,04) K_s = \\ = (0,25 + 0,20 + 0,04) K_d + 0,5 c_f$$

ou

$$K_s \approx 3 K_d + 3 c_f \quad (2)$$

pour les moteurs à essence :

$$0,17 K_s = (0,50 + 0,20 + 0,04) K_e + 0,6 c_f$$

ou

$$K_s = 4,35 K_e + 3,53 c_f \quad (3)$$

où K est exprimé en unité monétaire par kilowatt et c_f en unité monétaire par tonne de fuel.

Comme les taxes et impôts varient d'un pays à l'autre, on supposera que le matériel, son installation et le combustible consommé en sont exemptés.

Il est difficile d'évaluer le coût unitaire du fuel; il dépend de nombreux facteurs, tels que le prix du pétrole brut, la distance entre le lieu de production et la raffinerie, les frais de transport interne et de distribution.

Dans les conditions actuelles (1976) du marché international, on peut évaluer à 150 dollars/kW le prix de revient total d'un moteur Diesel de la puissance considérée. Dans les mêmes conditions, ce prix pour un moteur à essence d'environ 1 kW est évalué à 50-70 dollars/kW.

Si, dans les équations (2) et (3), on remplace K_d , K_e et c_f respectivement par 150 dollars/kW, 50 dol-

lars/kW et 150 dollars/t. on voit que le prix de revient total d'un moteur solaire ne devrait pas dépasser 900 dollars/kW pour être compétitif avec un moteur Diesel et 834 dollars/kW pour l'être avec un moteur à essence. Il convient de noter qu'il s'agit du prix d'un moteur solaire sans stockage de chaleur.

Les prix actuels des moteurs solaires varient beaucoup : de 3 000 à 20 000 dollars/kW. Le prix dépend fortement de la puissance du moteur et du nombre d'unités identiques fabriquées, comme le montre l'exemple fourni par un fabricant (voir figure 27).

Observations et conclusions

a) Le calcul du coût par unité d'énergie produite (kWh par exemple) est sans intérêt parce que les paramètres varient trop d'un pays à l'autre. Une équation générale telle que l'équation (1) ci-dessus est plus utile :

b) Un moteur thermique solaire dans la gamme de 2 à 10 kW devient économiquement intéressant quand son coût ne dépasse pas 1 000 dollars/kW. Les prix actuels (1976) sur le marché sont de trois à vingt fois supérieurs :

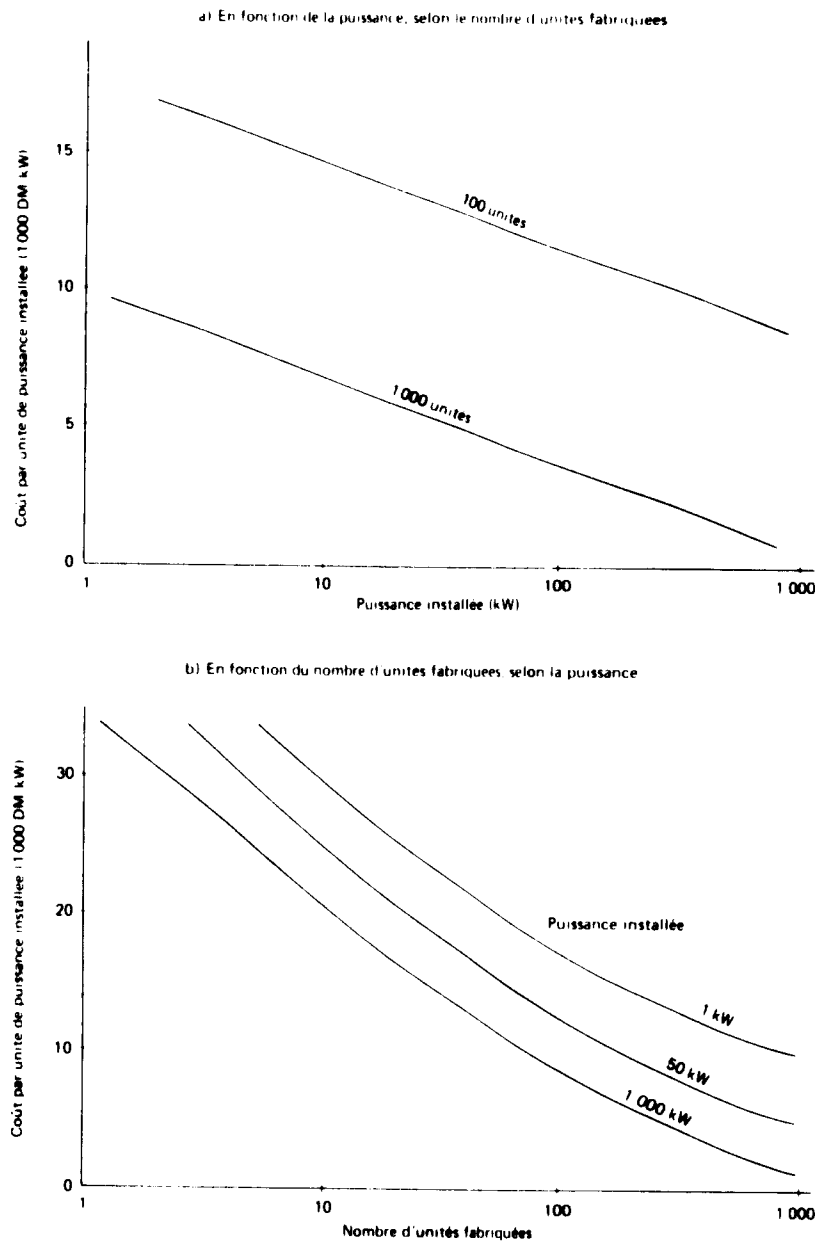


Figure 27. Coût unitaire de centrales solaires

c) Les photopiles solaires seraient économiquement intéressantes à 2 000 dollars/kW parce que les frais d'entretien et de réparation et le taux d'amortissement sont inférieurs. En outre, le prix d'un alternateur n'a pas été compris dans le coût des moteurs Diesel et des moteurs à essence:

d) Des économies d'échelle ne peuvent pas être pleinement appliquées dans le cas des moteurs thermiques solaires du fait que la surface des capteurs est à peu près proportionnelle à la puissance du moteur. (L'augmentation du rendement avec des moteurs plus puissants peut être négligée dans une première approximation.) Les capteurs représentent une partie importante du coût total de l'installation. Toutefois, le coût par unité de puissance des autres éléments et les frais de transport et d'installation diminuent beaucoup quand la puissance augmente.

e) Les dépenses d'investissement sont plus élevées pour les moteurs solaires:

f) Les installations afférentes à un moteur solaire occupent une surface au sol de 20 à 50 m²/kW; ce coût de terrain supplémentaire doit être pris en considération. Toutefois, si les capteurs sont utilisés comme toiture pour des bâtiments, le coût par unité de puissance installée diminuera;

g) S'il était pratiquement possible de stocker l'énergie solaire, le coût par unité de puissance installée augmenterait, mais le coût par unité de puissance délivrée diminuerait:

h) Il est difficile d'obtenir une vitesse constante de l'arbre d'un moteur solaire à moins de prévoir un système de réglage coûteux et peut-être assez compliqué. Une vitesse constante peut être nécessaire pour certaines applications:

i) La machine couplée à un moteur Diesel ou un moteur à essence aura la moitié de la puissance de la machine couplée au moteur solaire; de ce fait, son coût sera plus faible, son transport et son installation coûteront moins chers et seront plus faciles.

Réfrigération et climatisation solaires

Les appareils de réfrigération et de climatisation solaires sont encore encombrants, compliqués et trop chers; de plus, jusqu'à 30 % de l'énergie nécessaire doit être fournie par une source extérieure. Dans le troisième exemple d'appareil de climatisation décrit plus haut, on a calculé qu'avec un coût du combustible de 480 dollars/t, augmentant de 20 % par an, et un taux d'intérêt de 9 %, il faudrait 20 ans pour amortir un appareil de climatisation de 10 kW; ce calcul semble plutôt optimiste. Il est évident que des R-A plus poussées sont nécessaires, notamment pour diminuer le pourcentage d'énergie extérieure nécessaire.

III. UTILISATION DE L'ENERGIE SOLAIRE DANS LES PAYS EN DEVELOPPEMENT

Evaluation de l'expérience acquise dans des pays en développement

Grèce

En Grèce, on utilise surtout l'énergie solaire pour la distillation de l'eau. On y trouve les installations les plus importantes du monde, par exemple à Nisiros et Fiskardho (voir tableau 1).

Les distillateurs ont généralement une structure en aluminium, avec un vitrage pour les parois latérales et la couverture (voir figure 22f). La surface absorbante noire est faite de feuilles minces de butylcaoutchouc scellées avec du caoutchouc aux silicones. Cette technique semble être fiable, mais elle exige des matériaux qu'il est difficile de se procurer dans la plupart des pays en développement et dont le coût est relativement élevé. Pour construire des distillateurs de ce type, il faut disposer de bons techniciens.

Inde

L'Inde a un programme ambitieux de R-A en matière d'énergie solaire:

Dessalement de l'eau

Une installation de dessalement de l'eau est en service à Bhavnagar; elle a une capacité de 0,9 m³/j; on en construit une autre qui aura une capacité de 5 m³/j. Les principaux matériaux sont la brique, le ciment, le verre, le bois et le chatterton. Il y a également une petite quantité d'aluminium. La surface absorbante noire est en béton recouvert d'une peinture au mastic. Le coût total estimé de cette installation est d'environ 28 000 dollars, soit environ 14 dollars/m² de surface d'évaporation. On espère que cette installation aura une production quotidienne moyenne d'environ 2,5 l/m². La technique semble fiable et facilement transférable à d'autres pays en développement.

Chauffage de l'eau

Un fabricant de matériel électrique fait des essais avec des capteurs solaires en vue de la production en série de chauffe-eau. Il envisage de fabriquer les capteurs en utilisant les moyens actuels de production d'aluminium roll-bond.

Chauffage des locaux

On a mis au point un système de chauffage par air chaud, mais son coût ne peut pas être évalué tant que l'on ne connaîtra pas les résultats du programme de R-A sur les capteurs solaires.

Pompes solaires

L'Institut technologique et scientifique Birla, à Pilani, a déjà fabriqué deux prototypes de pompes solaires ne comportant aucune partie mobile. Ces deux prototypes sont actuellement à l'essai. Une première évaluation montre que la pompe à eau est prometteuse et que le coût par unité de puissance installée pourrait être d'environ 2 000 dollars/kW. De nombreux problèmes techniques restent encore à résoudre.

Autres activités

Les travaux sur le séchage, la climatisation, la réfrigération et la conversion de l'énergie solaire en énergie mécanique ne font que commencer. Le Laboratoire national de l'aéronautique travaille sur des éoliennes d'après une technique semblable à celle appliquée dans les pays industrialisés. Cette activité est orientée dans trois voies :

Irrigation : amélioration du modèle multi-pales actuel;

Production de courant électrique : modèle à deux ou trois pales et volets de réglage, avec une puissance de 1-5 kW pour une vitesse du vent de 5 m/s;

Pompage : éoliennes pour actionner des pompes de salines.

On essaie d'associer le pompage de l'eau à la production d'électricité. On espère parvenir à un coût de 1 000 dollars/kW.

Mexique

Au Mexique, le programme solaire le plus important concerne le pompage de l'eau d'après la technique SOFRETES. Une turbine solaire à basse température de 25 kW entraîne un alternateur qui fournit l'énergie nécessaire à une ou plusieurs pompes; elle est en service à San Luis de la Paz, à environ 350 km de Mexico. Toutefois, le prix est encore prohibitif. Onze pompes de 1 kW sont déjà installées, huit sont en construction et une pompe solaire actionnée par un moteur rotatif est à l'étude.

Un travail intéressant a été effectué en vue de la fabrication de capteurs solaires avec un caisson en amiante-ciment, de l'aluminium roll-bond importé pour la tuyauterie et la surface absorbante, un double vitrage, des joints d'étanchéité en caoutchouc aux silicones et une isolation en fibres de verre. Un capteur à caisson en fibres de verre en est au stade de la R-A.

Le Mexique envisage de fabriquer en série des pompes solaires de faible puissance en vue de les exporter vers d'autres pays en développement. Toutefois, avec l'actuel moteur alternatif au fréon et le prix élevé des autres éléments de l'installation

(capteurs, échangeurs de chaleur), il sera très difficile de soutenir la concurrence des moteurs Diesel et des moteurs à essence.

Discussion des problèmes et solutions

Dans les conditions actuelles, les utilisations de l'énergie solaire possibles dans les pays en développement sont les suivantes :

a) Distillation de l'eau de mer et des eaux saumâtres, avec des taux de production d'eau douce faibles ou moyens: la production de 30 m³ par jour semble raisonnable.

b) Chauffage de l'eau à des fins individuelles ou collectives. Des chauffe-eau solaires sont devenus compétitifs et sont déjà très populaires en Australie, à Chypre, aux Etats-Unis et au Japon. La technique est simple et peut être adaptée aux conditions locales:

c) Séchage. Jusqu'à présent, le séchage a toujours été effectué en plein air. Maintenant, une installation très simple permet d'obtenir des produits propres, sains et de meilleure qualité. Le matériel est rustique et peut être fabriqué sans grande difficulté. Des institutions locales devraient réaliser des modèles appropriés, aux fins de démonstration. Les fermiers pourraient utiliser ces modèles pour fabriquer leurs propres séchoirs. L'utilisation de séchoirs solaires avec une source auxiliaire d'énergie pourrait être envisagée là où l'énergie est bon marché et l'entretien et les réparations sont faciles. Toutefois, ce serait rarement une bonne solution de transformer de l'énergie mécanique ou électrique en énergie thermique pour les ventilateurs nécessaires. Une bonne solution pourrait consister à combiner l'énergie éolienne et l'énergie solaire.

Les applications qui ne sont pas encore possibles sont les suivantes :

a) Moteurs solaires. De nombreux prototypes existent déjà sur le marché. Certains d'entre eux ont été essayés pendant des années, d'autres pendant des mois et d'autres vont être mis à l'essai. Les pays en développement n'ont pas intérêt à utiliser ces moteurs solaires à des fins autres qu'expérimentales. Leur coût est encore prohibitif et la technique n'est pas encore suffisamment éprouvée:

b) Photopiles. On affirme que les photopiles sont fiables, mais leur prix est encore très élevé et les pays en développement n'ont pas intérêt à les utiliser à des fins autres qu'expérimentales. La technologie des photopiles doit être encore améliorée, mais on espère que dans un avenir pas trop lointain elles connaîtront le même succès que les transistors il y a quelques années. Si tel est le cas, les petits pays en développement pourront envisager le montage de photopiles, les grands pays pouvant envisager la fabrication partielle ou totale:

c) Réfrigération. On met au point des appareils fonctionnant sans apport extérieur d'énergie, mais,

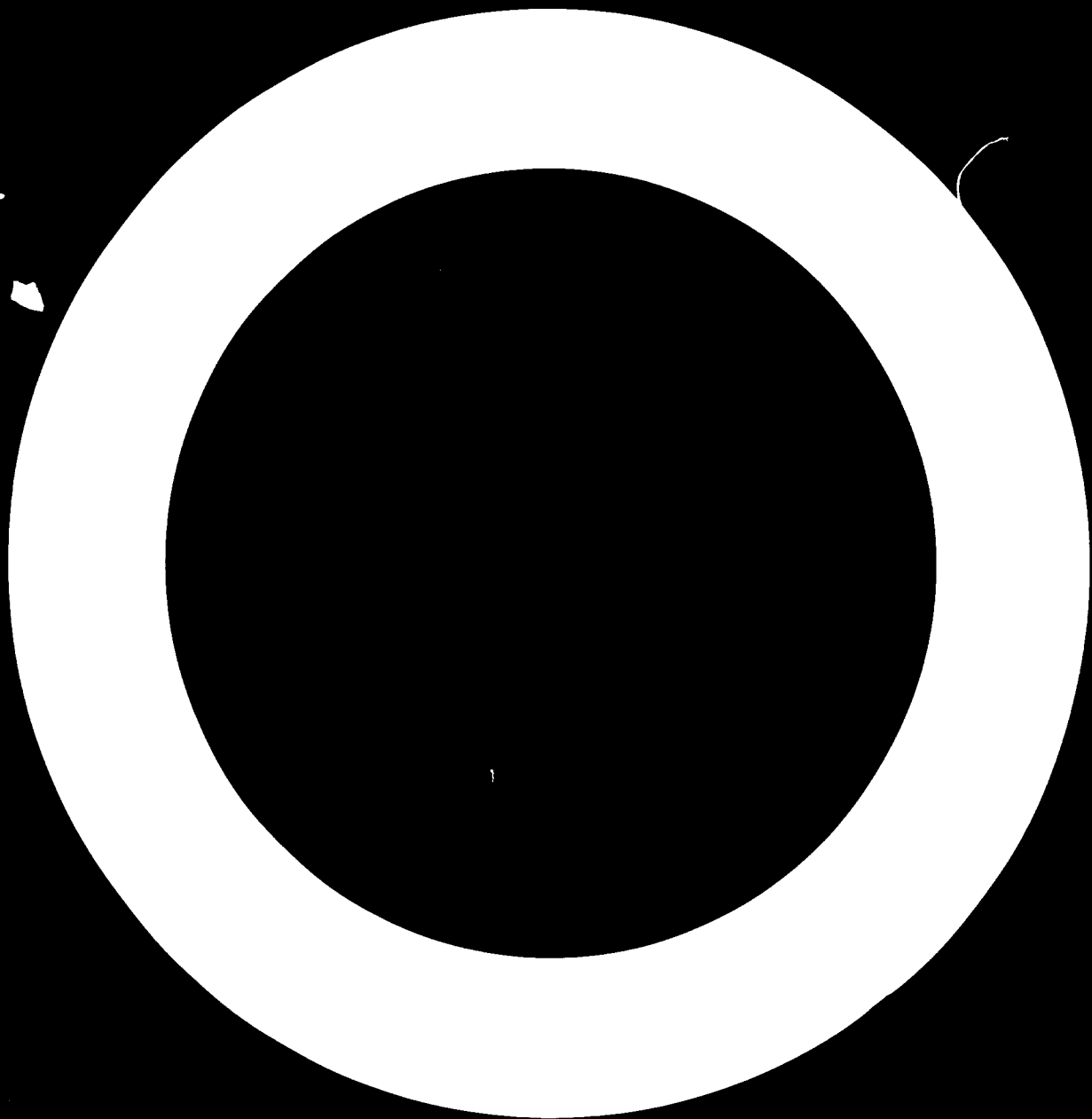
même pour une petite capacité de réfrigération, ces appareils sont très lourds et encombrants. Pour des machines à absorption, à fonctionnement intermittent ou continu, le matériel solaire pourra être un complément des appareils classiques. La technologie actuelle semble réalisable, mais une étude approfondie de faisabilité devrait être faite pour déterminer dans quelle mesure des sources d'énergie extérieures seraient acceptables. La production de glace est souvent une bonne solution, car la glace peut être transportée et utilisée pour conserver des denrées alimentaires ou d'autres produits.

BIBLIOGRAPHIE

- Agence solaire et spatiale autrichienne. Petites centrales solaires. Août 1976. (FA-3). L'Agence solaire et spatiale autrichienne (ASSA) a été chargée par le Ministère fédéral de la science et de la recherche de faire une enquête auprès de tous les pays membres de l'AIE sur leurs activités nationales concernant les petites centrales solaires. Cette enquête porte sur les travaux de R-A au sujet des centrales solaires et de leurs éléments, ainsi que sur les systèmes d'information couvrant cette question.
- American Society of Heating, Refrigeration and Air-conditioning Engineers. The 1972 handbook of fundamentals. New York.
- _____ The 1972 handbook of systems. New York.
- _____ The 1972 handbook of applications. New York.
- _____ The 1972 handbook of equipment. New York.
- Backus, Charles E., ed. Solar cells. New York, IEEE Press, 1976.
- Brace Research Institute, Macdonald College of McGill University. A survey of solar agricultural dryers. Ste Anne de Bellevue, Québec (Canada), décembre 1975. (Technical Report T99.)
Ce rapport décrit certains des séchoirs solaires de produits agricoles qui ont été construits par des chercheurs ou des utilisateurs.
- Brinkworth, B. J. Solar energy for man. Salisbury, Compton Press, 1972.
- Eggers-Lura A. Capteurs plans solaires et leur utilisation dans les logements. Conversion de l'énergie solaire à basse température. Commission des Communautés européennes.
La partie de ce rapport consacrée à la documentation traite de l'état des connaissances en la matière; elle est suivie d'un aperçu des travaux de R-A entrepris à ce jour dans les pays membres de la CEE, dans d'autres pays européens et dans des pays hors d'Europe qui ont apporté une contribution importante à la recherche sur l'énergétique solaire.
- International Solar Energy Society, U.K. Section. Solar energy a United Kingdom assessment. Londres, mai 1976.
Analyse de tous les aspects de l'énergétique solaire, faite pour évaluer les possibilités d'utilisation de l'énergie solaire et les besoins de R-A dans le Royaume-Uni de Grande-Bretagne et d'Irlande du Nord, ainsi que pour l'exportation.
- Kredder *et* Kreith. Solar Heating and cooling. New York, McGraw Hill, 1975.
- Messel H. *et* T. S. Butler, eds. Solar energy a course of lectures. Oxford, Pergamon, 1975.
- Noyes Data Corporation. Solar energy for heating and cooling of buildings. Patton, 1975.
- Photovoltaic power and its applications in space and on earth. Communication présentée au Congrès international: Le soleil au service de l'homme, Paris, 2-6 juillet 1973.
- Solar desalinations status and potential. *Par* C. Mustacchi *et al.* Rome, ASIS, mai 1976.
Etude faite pour la Commission des Communautés européennes. Son objet: aperçu des connaissances pratiques sur le dessalement solaire; choix des priorités pour les programmes futurs de R-A; intérêt éventuel des progrès technologiques et lieux appropriés pour les travaux de recherche.
- United States. Library of Congress, Science Policy Research Division. Survey of solar energy products and services, mai 1975.
Etude faite pour obtenir des informations pratiques sur le matériel d'énergétique solaire et les services connexes.
- Vaillant, J. R. Les problèmes du dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres. Paris, Eyrolles, 1970.

Deuxième partie

**APERÇUS DES PROGRAMMES SOLAIRES
DE CERTAINS PAYS ET ORGANISMES**



Programmes nationaux

Autriche

Agence solaire et spatiale autrichienne

L'Agence solaire et spatiale autrichienne (ASSA) coordonne les recherches sur l'énergie solaire et leurs applications en Autriche. Voici ses principales fonctions :

a) Assurer les relations avec les organismes étrangers et internationaux s'occupant de l'énergie solaire;

b) Conseiller le Gouvernement autrichien en matière de recherches, techniques et applications présentant un intérêt pour l'Autriche, compte tenu de l'évolution internationale dans ce domaine;

c) Traiter les informations et les données sur la technologie solaire et les distribuer à l'industrie et aux institutions scientifiques autrichiennes; organiser des conférences et des réunions; former des spécialistes autrichiens.

A ce jour, l'ASSA a publié trois études. L'une d'elles a trait aux installations solaires dans les pays membres de l'AIE, notamment aux centrales solaires et installations connexes.

L'étude *Kleine Sonnerkraftwerke für Entwicklungsländer* (FA-4) (Petites centrales solaires pour les pays en développement) analyse de petites centrales solaires existantes, ayant une puissance de 10 kW (avec des capteurs plans ou des capteurs avec effet de concentration).

L'étude *Meteorologische Messdaten für die Nutzung der Sonnenenergie* (FA-5) (Données météorologiques pour l'utilisation de l'énergie solaire) traite des facteurs météorologiques affectant l'utilisation directe de l'énergie solaire, vu leur importance pour la réalisation d'installations techniques solaires.

L'ASSA souhaite promouvoir des projets de R-A dans des institutions scientifiques, des universités, des centres de recherche et dans l'industrie, en coopération étroite avec d'autres pays. L'Autriche participe au programme de l'AIE et a pris l'initiative d'un programme de coopération avec l'ONUDI.

Activités d'autres organismes

Plusieurs groupes de travail dans des universités, des centres de recherche et l'industrie se consacrent à

des travaux de R-A, notamment en matière de chauffage, de réfrigération et de production d'énergie électrique ou mécanique.

Chauffage et réfrigération solaires

En vue de promouvoir l'utilisation économique de l'énergie solaire en Autriche, plusieurs projets ont été mis en œuvre avec l'appui du Ministère fédéral de la science et de la recherche: maisons, piscines, stations d'essai de capteurs dans diverses parties du pays. Les facteurs essentiels pour l'utilisation économique d'installations solaires dans des conditions géographiques, météorologiques et écologiques données sont résumés et évalués. Au titre de ce programme, on étudie la possibilité d'intégrer les techniques solaires aux réalisations classiques. Sur la base de l'expérience acquise, on établira des principes directeurs pour l'équipement d'installations solaires de production d'eau chaude et de chauffage des locaux, avec les systèmes de commande les plus simples possibles.

Maisons solaires

La conception de bâtiments ayant la demande d'énergie primaire la plus faible possible est l'un des moyens les plus efficaces d'économiser l'énergie. Depuis plus de cinq ans, l'Institut du bâtiment préconise l'adoption d'une philosophie d'économie de l'énergie tant dans la conception que dans la construction des bâtiments; il a fait valoir une conception intégrée "toutes catégories" qui a eu pour résultats une amélioration sensible de la réponse thermique, des économies d'énergie et une économie des méthodes de construction.

Production de capteurs solaires

Des sociétés autrichiennes produisent divers modèles de capteurs plans et de capteurs avec effet de concentration; des centres d'essais spéciaux ont été créés pour faire des essais comparatifs de capteurs.

Appareils de chauffage solaire

En 1976, on a commencé la fabrication d'installations solaires complètes pour le chauffage de maisons et de piscines. Une centaine d'installations sont en service. On a mis au point un système de contrôle des capteurs qui permet de régler le débit du fluide de travail dans les capteurs en fonction de la température.

Dans l'étude des applications du chauffage solaire en Autriche, il faut envisager les possibilités suivantes :

- Stockage de la chaleur hors saison;
- Combinaison de l'énergie solaire et des pompes de chaleur pour augmenter la température de l'eau par l'énergie solaire ou le rendement des capteurs solaires;
- Combinaison du chauffage solaire et d'appareils classiques d'appoint pour les périodes froides ou nuageuses.

Pour des raisons économiques, le stockage de la chaleur n'est pas actuellement réalisable en Autriche. Pour ce qui est des deux autres possibilités, l'Institut de physique appliquée de l'Université de Vienne a fait une étude en vue de la conception d'une installation solaire pour l'Institut de biologie moléculaire récemment créé à Salzbourg sous l'égide de l'Académie des sciences autrichienne. Cette installation servira de démonstration pour l'utilisation de l'énergie solaire dans les conditions climatiques propres à Salzbourg. C'est le premier grand bâtiment à chauffage solaire en Autriche. Les objectifs principaux sont les suivants :

- a) Faire des essais à long terme sur les performances et la résistance à la corrosion des capteurs solaires;
- b) Acquérir de l'expérience sur le fonctionnement combiné de capteurs solaires et de pompes de chaleur;
- c) Recueillir et analyser un très grand nombre de données en vue de fournir la base techno-économique de nouvelles applications du chauffage (et de la réfrigération) solaire de bâtiments en Autriche.

Réfrigération solaire

On poursuit les recherches sur le refroidissement des locaux avec une machine frigorifique à absorption et des capteurs plans. La première installation sera faite dans un immeuble d'habitation en Espagne. On a prévu une température de 80 °C pour le fluide de chauffage et une température de 30 °C pour le fluide de refroidissement.

Conversion de l'énergie solaire en énergie électrique ou mécanique

Photopiles

Quatre instituts universitaires font des études théoriques sur les photopiles; un laboratoire d'essais gouvernemental exécute un vaste programme d'essais *in situ* pour évaluer des batteries de photopiles.

L'Institut de physique de l'Université de Vienne s'intéresse activement à cette question; il prévoit des recherches sur la préparation et les propriétés de photopiles pour des applications terrestres. Le sulfure

de cadmium et le silicium cristallisé sont considérés comme les matériaux les plus prometteurs.

L'Institut de chimie-physique de l'Université de Vienne s'occupe de la caractérisation matérielle des semi-conducteurs.

A l'Institut de physique appliquée de l'Université technique de Vienne, des recherches sont effectuées depuis 1965 sur la photoconductibilité de cristaux de CdS et l'augmentation de leur sensibilité par dopage avec Te. En 1972, on a inclus dans ces recherches l'étude de fines pellicules de CdS. Ces travaux ont été conclus en 1974 par la publication d'une communication sur les techniques d'évaporation et la photoconductibilité de ces pellicules. On envisage des études sur les photopiles.

A l'Institut de physique de l'état solide de l'Université de Linz, un groupe de chercheurs travaille depuis plusieurs années à la préparation de détecteurs d'infrarouges. Ces chercheurs sont très expérimentés dans la préparation de pellicules fines par des méthodes de croissance épitaxiale et d'ionisation. Les recherches pourraient être orientées vers les photopiles.

L'Institut fédéral d'essais et de recherche, à Vienne, a installé quatre batteries de photopiles dans un centre d'essais dans l'Est de l'Autriche. Ces batteries, composées de photopiles au silicium, seront essayées pendant deux ans. Chaque batterie a une production maximale de 1,6 W. Le programme d'essais comporte l'enregistrement de la production d'énergie en fonction du rayonnement solaire, des conditions météorologiques, etc.

Systèmes solaires thermoélectriques (y compris les capteurs)

Conversion solaire-thermique. Au cours des dernières années, des universités, des instituts de recherche et des industries ont coopéré étroitement dans des travaux sur les capteurs solaires. On étudie la possibilité d'obtenir des facteurs de concentration plus élevés dans des capteurs plans en modifiant la structure superficielle ou en appliquant des revêtements sélectifs. Il semble possible d'atteindre des températures de l'eau de 300-400 °C. Des capteurs de ce genre pourraient être très intéressants pour de petites centrales. Les recherches sont faites en coopération par les organismes suivants : à Vienne, l'Institut de physique générale de l'Université technique, l'Institut de chimie-physique de l'Université de Vienne et l'Institut fédéral d'essais et de recherche; à Graz, l'Institut de l'énergie thermique et du génie nucléaire de l'Université technique et le Centre de recherche de l'Institut de recherches écologiques.

Centrales solaires. L'Institut international d'analyse appliquée des systèmes (IIASA) à Laxenbourg, près de Vienne, évalue des modèles de grandes centrales solaires thermiques du type à tour.

L'Institut de l'énergie thermique et du génie nucléaire de l'Université technique de Graz a mis au point des systèmes de stockage de la chaleur (stockage de vapeur au moyen d'eau chaude sous pression) pour le stockage d'énergie dans des centrales. La méthode proposée convient tout particulièrement à l'équilibre de la charge dans les centrales solaires. Selon la taille et la pression de fonctionnement, il faudra utiliser des réservoirs en acier soudé ou des réservoirs sous pression en fonte précontrainte.

Danemark

Au Danemark, le chauffage des locaux et de l'eau pour les foyers représente environ 50 % de la consommation totale d'énergie. C'est donc sur ces questions que portent les travaux de R-A.

En 1975, on a terminé la maison individuelle "énergie-zéro", dont la surface au sol est de 125 m². Elle est chauffée par l'énergie solaire, la chaleur résiduelle de l'appareillage électrique de la maison (ampoules, réfrigérateur, machine à laver) et la chaleur animale des occupants. Elle est équipée d'un capteur solaire vertical de 42 m² et d'un réservoir de stockage de l'eau de 30 m³. La maison "énergie-zéro" n'est pas économique, mais elle montre de façon probante que même à la latitude élevée du Danemark (56°) une maison peut être chauffée uniquement par l'énergie solaire, à condition d'avoir une bonne isolation thermique.

En 1976, on a publié un nouveau code de construction qui impose une meilleure isolation thermique des bâtiments. Grâce uniquement à une bonne isolation, la consommation annuelle d'énergie d'une maison individuelle peut tomber d'environ 25 000 à 10 000 kWh.

Des travaux ont été consacrés au chauffage solaire des locaux et de l'eau avec l'addition de pompes de chaleur. En 1977, on a construit une maison solaire à Skive, dans le nord du Danemark. Tous les besoins thermiques de la maison sont satisfaits par un capteur de 28 m² associé à deux pompes de chaleur qui récupèrent la chaleur de l'air vicié et des eaux usées de la maison.

Enfin, des travaux importants de R-A portent sur la réfrigération solaire avec une machine à absorption (absorbant solide). Une étude préliminaire a trait à une installation produisant 500 kg de glace par jour.

Il y a de nombreuses maisons solaires au Danemark; trois ou quatre sociétés produisent des capteurs plans pour le chauffage des locaux et de l'eau.

France

Depuis la crise de l'énergie au début des années 70, le Gouvernement français a manifesté un vif intérêt pour les nouvelles sources d'énergie. Il a créé

la "Délégation aux énergies nouvelles" pour coordonner les travaux de R-A et les programmes industriels. Environ 300 chercheurs dans plusieurs laboratoires nationaux font de la recherche pure sur les moyens d'utiliser l'énergie solaire (procédés biologiques, chimiques et physiques). Les applications industrielles de ces recherches sont très différentes selon qu'il s'agit de pays industrialisés ou de pays en développement, tant du point de vue des objectifs que du point de vue des besoins des pays.

L'industrie française a mis au point des appareils de chauffage solaire de l'eau (ménagère ou industrielle) et des locaux. Une cinquantaine de maisons expérimentales ont été équipées de capteurs plans de 20 m². La surface totale des capteurs installés à des fins industrielles est d'environ 15 000 m².

Le gouvernement espère réduire la consommation totale d'énergie de 5 % avant 1980. L'industrie française s'intéresse activement à la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique par un processus thermique à haute température; ce programme est exécuté conjointement par des laboratoires nationaux et des partenaires internationaux. Une installation équipée de capteurs à effet de concentration est en service à Odeillo; jour et nuit, elle fournit du courant électrique avec une puissance de 60 kW. La température de travail est d'environ 350 °C.

Pour les pays en développement, l'industrie française s'est lancée dans un programme dont voici les principaux éléments :

- Irrigation avec des pompes équipées de petits capteurs;
- Fourniture de courant électrique;
- Réfrigération (denrées alimentaires);
- Dessalement de l'eau;
- Climatisation.

Pour faciliter le transfert de technologie, on a choisi la technique des capteurs plans et des cycles à basse température. Une cinquantaine de prototypes de pompes solaires de 1 kW sont en service dans le monde. La surface des capteurs est d'environ 50 m² et le rendement total est d'environ 2 %. On espère améliorer encore les performances, compte tenu du même objectif principal : la possibilité de transfert des techniques.

République fédérale d'Allemagne

Le programme de R-A de la République fédérale d'Allemagne pour l'utilisation de l'énergie solaire a été lancé au début de 1974, immédiatement après la crise du pétrole, comme un élément du programme d'énergétique non nucléaire. Jusqu'alors, l'énergie solaire n'avait pas été jugée intéressante du fait de la latitude du nord du pays, où l'ensoleillement moyen

n'est que de 110 W/m², avec une durée moyenne de 1 300-2 000 heures par an, selon la région. Cependant, des études et expériences faites récemment avec des maisons pilotes ont montré que l'utilisation de l'énergie solaire présente de l'intérêt, même pour les pays situés au milieu de l'Europe.

Pour le moment, les travaux portent essentiellement sur les possibilités de chauffage de l'eau ou des locaux, et non sur la production de courant électrique, du fait de la structure de la consommation d'énergie. Celle-ci se répartit comme suit : 40 % pour le chauffage de l'eau et des locaux, 36 % pour la production de chaleur industrielle et 24 % seulement pour la production de courant électrique. On voit que le chauffage est le secteur le plus important du point de vue de la demande à long terme. Le budget de la R-A en matière d'énergie solaire était de 6,2 millions de DM en 1974, 15,9 millions de DM en 1975 et 27,0 millions de DM en 1976.

Sur la base de l'expérience acquise depuis 1974, on a lancé un nouveau programme de recherche sur l'énergie solaire (1977-1980) avec un budget d'environ 150 millions de DM. Les principaux objectifs de ce programme sont exposés ci-après.

Utilisations thermiques

Des chauffe-eau solaires sont déjà sur le marché. Toutefois, leurs principaux éléments — capteurs et ballons d'eau chaude — doivent être améliorés pour qu'ils deviennent compétitifs avec les appareils au mazout, au gaz ou au charbon. En outre, il faut encore évaluer le comportement à long terme et les besoins d'entretien des appareils de chauffage solaire. Par conséquent, les activités ci-après revêtent une grande importance dans le programme de R-A du Ministère de la recherche et de la technologie :

- Mesure de paramètres pour évaluer le rendement des chauffe-eau;
- Essais à court terme;
- Normalisation des éléments et des appareils;
- Amélioration des absorbants et minimisation des pertes dans les capteurs.

Des appareils solaires de chauffage des locaux sont à l'essai dans plusieurs maisons solaires de démonstration. L'objectif principal est d'améliorer l'économie des appareils existants afin que des maisons solaires puissent être mises sur le marché avant dix ans. Les travaux portent essentiellement sur les points suivants :

- Amélioration technique des capteurs et du stockage en vue de faciliter la production en grandes séries;
- Meilleure connaissance du comportement des appareils;
- Perfectionnement d'architectes, d'ingénieurs et d'ouvriers qualifiés dûment formés.

Outre ces activités, on recueillera des données sur les conditions climatiques, les types de bâtiments qui peuvent être équipés d'appareils solaires, les effets sur l'écologie et les méthodes de construction.

La production de chaleur industrielle est un autre secteur d'intérêt quant aux utilisations de l'énergie solaire. En République fédérale d'Allemagne, on s'intéresse surtout aux températures inférieures à 200 °C et à celles voisines de 2 000 °C. Pour le moment, les travaux de R-A portent principalement sur les températures inférieures à 200 °C, pour le séchage, la distillation, la réfrigération, la pétrochimie ou l'évaporation.

Production d'électricité

Les travaux sur la production d'électricité sont concentrés pour le moment sur des machines à cycle thermique fermé. Les capteurs qui ont été mis au point pour la production de chaleur peuvent être utilisés pour ces machines. On dispose de turbines et de moteurs alternatifs fonctionnant avec le Fréon comme fluide de travail. Les perspectives des photopiles sont faibles du fait de leur prix élevé, du faible rendement final et des grandes surfaces requises en Europe centrale. Toutefois, à long terme, il sera peut-être possible d'introduire cette méthode de production de courant électrique dans les régions ensoleillées du monde.

La production d'électricité grâce à l'énergie solaire — par des méthodes thermo-dynamiques ou photovoltaïques — est l'une des possibilités les plus prometteuses pour les régions rurales des pays en développement. Les travaux de R-A sont orientés en ce sens : mettre au point des appareils de l'ordre de 10 kW qui seront fiables et faciles à entretenir et produire des installations moins coûteuses.

Il existe des plans pour construire des centrales solaires de 500 kW dans le cadre des Communautés européennes (technique de la tour) et de l'AIE.

Le potentiel de l'énergie éolienne sur le territoire de la République fédérale d'Allemagne est théoriquement très élevé (la puissance moyenne des vents est d'environ 200×10^9 kW), mais en pratique l'énergie éolienne ne peut être utilisée que dans une mesure très limitée. D'une part, il faut faire des travaux techniques d'un ordre nouveau; d'autre part, il se pose le problème de stockage de l'énergie, comme dans tous les cas d'utilisation de l'énergie solaire à grande échelle. Ces deux contraintes empêchent une utilisation généralisée de l'énergie éolienne en République fédérale d'Allemagne; il semble que cette énergie ne pourrait être utilisée qu'à des fins particulières ou lorsque les conditions locales sont extrêmement favorables. A l'heure actuelle, les travaux de R-A portent essentiellement sur la conception d'une éolienne de 1-3 MW, dont la construction commencerait en 1979, et d'une éolienne de 10 kW à axe vertical.

L'énergie marémotrice est utilisée depuis des années pour fournir du courant électrique à des bouées et des phares. Mais il s'agit d'appareils de faible puissance, normalement inférieure à 100 W. On y a recours lorsqu'un autre mode de production de courant électrique serait à la fois difficile et encore plus coûteux. Le passage de petits appareils à des machines industrielles pose plusieurs problèmes. A ce jour, on n'a construit aucune grande installation, les analyses ayant toujours montré qu'elle ne serait pas concurrentielle. On a calculé que la puissance de l'énergie marémotrice le long des côtes allemandes de la mer du Nord est modeste : 3 600 MW. Il est évident que l'on ne pourrait utiliser qu'une petite partie de cette puissance. A ce sujet, la situation de pays ayant une grande longueur de côtes, tels que l'Irlande ou le Royaume-Uni, est certainement plus prometteuse. Du fait du faible potentiel de ce secteur, les travaux de R-A en République fédérale d'Allemagne sont minimes.

Utilisations biologiques et chimiques

Un autre grand domaine est constitué par les utilisations biologiques et chimiques de l'énergie solaire. Grâce aux processus biologiques naturels, une grande quantité d'énergie solaire est convertie en énergie chimique et emmagasinée. Cette énergie peut être libérée de nouveau par des processus thermiques de fermentation. Toutefois, le rendement est très faible. Le potentiel techniquement et économiquement utilisable est si faible en République fédérale d'Allemagne que les projets de R-A dans ce domaine ne sont que modestement encouragés. L'étude des processus biologiques dans la photosynthèse et la photolyse constitue l'essentiel des travaux de R-A actuellement en cours.

Coopération internationale en recherche-amélioration

Le nouveau programme de R-A en matière d'énergie solaire est exécuté en partie grâce à la coopération internationale. Les principaux partenaires sont les Communautés européennes, l'AIE et l'UNESCO. En outre, la République fédérale d'Allemagne a conclu de nombreux accords bilatéraux pour l'utilisation de l'énergie solaire, notamment des accords de transfert de technologie avec des pays en développement, tels l'accord pour la construction et l'exploitation d'une centrale de 10 kW en Egypte et l'accord pour une installation analogue en Inde.

Inde

L'intérêt porté aux utilisations de l'énergie solaire a été ravivé en 1973 du fait de la crise de l'énergie. Cette année-là, la Commission nationale de

la science et de la technologie a créé un comité chargé d'établir un rapport sur l'énergie solaire et de recommander au gouvernement les mesures à prendre. En 1974, le Comité a présenté un rapport détaillé, intitulé "Energie solaire - espoir et défi". Ce rapport contient une analyse critique des techniques disponibles dans le pays et de la situation dans le monde. Il analyse la consommation d'énergie des divers secteurs de la population et définit les programmes de R-A à entreprendre d'urgence. Sur la base de ces recommandations, des programmes relatifs à l'énergie solaire sont exécutés dans le pays. L'amélioration des capteurs a reçu la plus haute priorité.

S'agissant de l'énergie, la situation en Inde est caractérisée par une faible consommation par habitant, environ 100 kWh/j, et par conséquent une faible production intérieure brute par habitant. L'Inde est essentiellement un pays agricole, 70% de la population habitant dans les zones rurales. Il y a environ 350 000 villages de moins de 500 habitants. Du fait de leur faible facteur de charge et de leur éloignement des centres industriels, leur électrification n'est pas une proposition économique; il est également difficile de leur faire parvenir des combustibles fossiles. Il faut donc trouver des sources d'énergie sur place. De ce fait, tout programme d'énergie solaire en Inde tend essentiellement à satisfaire les besoins énergétiques du monde rural. En matière d'énergie solaire, l'Inde a un programme de R-A qui est bien coordonné et bien réparti, avec des objectifs à atteindre dans des délais donnés. Le comité de recherche sur l'énergie, qui contrôle l'exécution du programme, est composé de Secrétaires ministériels et présidé par le Ministre fédéral de l'énergie.

Le gouvernement s'est nettement engagé à développer les utilisations de l'énergie solaire. Il finance largement les programmes de R-A. De plus, il a autorisé les industries à traiter toutes leurs dépenses relatives aux applications solaires comme des dépenses de recherche, susceptibles d'exonération d'impôt. Parmi les organismes qui s'occupent activement des utilisations de l'énergie solaire ou du financement de la R-A, il faut citer l'Institut Tata de recherche sur l'énergie, Kirloskar's, Jyoti Ltd., Metal Box et Khatau.

Les programmes de R-A sont orientés dans trois directions : a) appareils thermiques simples, b) conversion directe de l'énergie, c) conversion biologique. Dans chacun de ces domaines, un coordonnateur est chargé de contrôler l'exécution des projets et de préparer la production. En outre, l'Office météorologique indien déploie une grande activité pour créer un réseau de stations et recueillir des données sur l'énergie solaire dans le plus grand nombre de lieux possible. On a ainsi créé 36 stations, dont 13 centres principaux qui mesurent les rayonnements total, diffus et direct, ainsi que les heures d'ensoleillement, les autres mesurant le rayonnement

total et les heures d'ensoleillement. Les instruments nécessaires (pyranographes, pyréliomètres, enregistreurs d'ensoleillement) sont fabriqués en Inde.

Amélioration des capteurs

Divers revêtements sélectifs sont à l'étude. On a obtenu des températures stagnantes pouvant atteindre 180 °C. L'Université agricole du Pendjab met au point des capteurs Winston modifiés, à faible effet de concentration. On a obtenu de la vapeur dont la pression pouvait atteindre 5 bars. Des capteurs à haute température, à grand effet de concentration, sont mis au point aux Laboratoires des radiotélescopes, à Ootacmund. Bharat Heavy Electricals Ltd. (BHEL) est chargé de la fabrication de ces capteurs et de la coordination du programme.

Pompes solaires

Les pompes solaires ont reçu une très haute priorité. Le laboratoire national de physique (LNP) a mis au point un moteur à cycle Rankine avec fluide organique et détendeurs à spirales. Des prototypes de la pompe ABIIMANYU de 1 kW sont en service depuis le milieu de 1976. Le Centre Auroville d'études écologiques met au point des moteurs à cycle Rankine avec fluide organique, semblables aux pompes SOFRETES. L'Institut scientifique et technologique Birla a mis au point une pompe à vapeur à basse température et contact direct pour l'irrigation. On a terminé des études de faisabilité et d'analyse des coûts pour des exhaures allant jusqu'à 30 m et un débit de 10⁵ l/j. Des pompes semblables ont également été mises au point par l'Institut central de recherche sur l'ingénierie mécanique. Des moteurs à air chaud de 200 W, fonctionnant à moyenne température et fondés sur le cycle Stirling, sont à l'étude à l'Institut central de recherche sur le sel et les éléments chimiques de l'eau de mer (ICRSEC). Une société privée, Metal Box Ltd., a conclu un accord pour la fabrication des pompes Fluidyne mises au point à Harwell. Jyoti Ltd. met au point des pompes de 1 kW à cycle Rankine, avec capteurs fixes cylindro-paraboliques.

Séchage solaire

Des coffres de séchage ont été mis au point par l'Institut central de recherches sur la zone aride, à Jodhpur, RRL à Jammu et l'Institut indien de technologie (IIT) à Kharagpur. En 1976, une grande partie de la récolte d'abricots du Cachemire a été séchée à l'aide de coffres de séchage mis au point à RRL. L'Université Annamalai a construit un prototype pour le séchage du riz non décortiqué, qui peut traiter 1 tonne par jour et est en service depuis plus d'un an. L'Agence nationale pour le développement

industriel a également fabriqué un séchoir de riz, qui peut traiter une tonne par jour et est aux essais. L'Institut de la recherche forestière a entrepris un projet pilote : la construction de quatre fours de séchage du bois dans quatre parties du pays. La société Amul Ltd. a entrepris la préparation de lait en poudre avec des appareils solaires.

Dessalement de l'eau

L'ICRSEC (Bhavnagar) s'occupe activement du Dessalement de l'eau. Il a fourni de petits distillateurs (eau potable) à plusieurs phares et des distillateurs plus importants à de nombreux laboratoires de R-A et à des établissements d'enseignement. Il équipe deux villages dans le Gujarat avec des appareils de production d'eau potable. Il a également fabriqué un distillateur solaire pouvant fournir 1 000 l/j. Il a créé une installation pilote, humidification-déshumidification, produisant 2 000 litres d'eau douce par jour.

Centrales solaires

Une centrale solaire de 10 kW est construite à Madras conjointement par les Gouvernements de l'Inde et de la République fédérale d'Allemagne. BHEL, LNP et IIT (Madras) sont les organismes d'exécution du côté indien et MBB est l'organisme d'exécution du côté allemand. Cette centrale solaire sera équipée d'une batterie de capteurs plans et d'un moteur à cycle Rankine avec fluide organique et détendeur à vis de Linde. Les organismes intéressés font actuellement des études de faisabilité sur une centrale de 10 kW équipée de détendeurs à spirales.

Chauffe-eau solaires

Plusieurs laboratoires ont mis au point des chauffe-eau solaires. On trouve maintenant ces appareils sur le marché en Inde. Quelques autres entreprises commerciales pénètrent dans ce domaine. Deux ou trois entreprises industrielles commencent à s'intéresser au chauffage solaire.

Chauffage et rafraîchissement des locaux

En 1975, BHEL a entrepris un grand projet avec la collaboration technique du LNP en vue du chauffage solaire d'une aile de son usine à Harwar. L'installation comporte une batterie de capteurs de 200 m² et un réservoir permettant de stocker 10 m³ d'eau à 60 °C. Cette eau chaude circule dans des radiateurs ventilés pour chauffer les ateliers.

L'IIT (Madras) a mis au point un appareil de rafraîchissement des locaux qui subit des essais depuis plusieurs mois. Le LNP a fourni un appareil pour chauffer une pièce du bâtiment et installe un appareil

pour le chauffage ou le rafraîchissement des locaux. Le système de rafraîchissement, fondé sur le principe des machines frigorifiques à absorption, fonctionnera pendant l'été. L'IIT (Madras) et BHEL ont mis au point des climatiseurs de 1 tonne à absorption avec solution aqueuse d'ammoniac.

Conversion directe de l'énergie

On a élaboré un programme bien coordonné de R-A concernant les divers aspects de la conversion directe de l'énergie. Diverses options sont à l'essai. Le Laboratoire de physique de l'état solide fabrique des piles solaires au silicium cristallisé, semblables à celles qui sont utilisées dans les programmes spatiaux. Ces piles ont un rendement d'environ 10%. L'Institut central de recherche sur l'ingénierie électronique, à Pilani, explore la possibilité d'utiliser un effet de concentration très élevé afin de réduire le coût des piles solaires. Le Laboratoire national de l'aéronautique étudie la possibilité de réaliser des rubans de silicium cristallisé. L'IIT (Kampur) et le LNP explorent la possibilité de faire des piles solaires au silicium à partir de films polycristallins. Des piles solaires à $\text{CdS-Cu}_2\text{S}$ sont mises au point par l'IIT (Delhi) et le LNP. Les programmes sur la conversion directe de l'énergie sont coordonnés par une entreprise d'Etat, Central Electronics Ltd.

Conversion biologique

On s'intéresse relativement peu à la conversion biologique. Les appareils à biogaz deviennent très populaires dans le pays. On utilise l'énergie solaire pour chauffer les gadoues en vue d'augmenter le rendement de la conversion en biogaz. En outre, on fait quelques essais pour transformer les déchets agricoles en méthane, éthanol, etc.

Italie

Capteurs plans

Plus de 20 fabricants ont déjà lancé sur le marché des capteurs plans standards, la plupart de $2 \text{ m} \times 1 \text{ m}$, à simple ou double vitrage et boîtier en acier galvanisé, fibres de verre ou acier peint. Les prix commerciaux des capteurs restent autour de 100 dollars le mètre carré; une installation individuelle d'eau chaude coûte entre 600 et 800 dollars: capteurs (4 m^2), ballon de 100 litres, tuyauterie, pompe, isolation thermique et tableau de commande. Les fabricants pénètrent difficilement sur le marché.

Des recherches sur les capteurs, entreprises en 1958, sont faites dans cinq universités et par six entreprises privées. Elles portent notamment sur les joints d'étanchéité, le traitement des surfaces et l'utilisation de structures alvéolaires en polymère

synthétique pour augmenter le rendement. Les ressources budgétaires consacrées à ces recherches sont peu élevées.

Pompes solaires

Dans les années 40, des recherches ont été faites à l'Université de Milan sur un moteur solaire utilisant le bioxyde de soufre comme fluide de travail. Ce moteur, accouplé à une pompe, a été fabriqué à quelques exemplaires par une société privée et installé dans quelques pays tropicaux.

Centrales solaires

La première chaudière solaire à haute température et haute pression a été construite en 1961. Equipée de capteurs coniques et d'un système manuel d'orientation, cette installation pouvait produire 7 kg/h de vapeur à une pression de 100 bars et une température de 500°C .

En 1963, on a construit une deuxième chaudière solaire fournissant 38 kg/h de vapeur à 100 bars et 450°C , avec un rendement de 0.6. Cette installation a été montée à Marseille en 1964. En 1965, avec l'appui du Conseil italien de la recherche, on a construit une troisième chaudière solaire (150 bars, 500°C) équipée de 121 miroirs coniques orientables par un système d'horlogerie, qui produit 40 kg/h de vapeur entre 11 h et 15 h. Dans la période 1966-1977, on a mis au point un nouvel appareil équipé de 271 miroirs plans de 80 cm de diamètre (surface totale de 205 m^2); la vapeur (150 bars, 600°C) est produite à raison de 130 kg/h, avec un rendement de 0,73 pour une insolation de 800 W/m^2 ; le rendement a été aussi bon lors d'essais effectués à 800°C .

Dessalement de l'eau

Les universités de Cagliari, Bari et Rome font quelques travaux sur le dessalement de l'eau. Au cours des vingt dernières années, on a étudié des distillateurs solaires. Quelques installations pilotes ont été construites (principalement par l'Université Nebbia de Bari, avec l'appui financier du Conseil italien de la recherche) et fonctionnent avec succès. Des études de faisabilité et des évaluations techniques sont faites à l'Université de Rome sur des installations complètes comportant des capteurs plans et un distillateur à plateaux de "fractionnement".

Piles aux silicones

Des travaux très limités sont faits dans deux universités sur les dommages que ces piles subissent du fait du rayonnement.

Programmes d'organismes

Autriche : Institut de recherches écologiques

Depuis 1974, un groupe d'experts étudie les possibilités d'utilisation de l'énergie solaire en Autriche. L'Institut de recherches écologiques, à Graz, a mis au point un capteur solaire qui est maintenant fabriqué industriellement en Autriche. En 1976, une batterie de capteurs solaires d'une surface totale de 600 m² a été installée pour le chauffage d'une piscine dans le village d'Eggersdorf. La spécification fondamentale était l'obtention d'une température de l'eau de 24 °C du mois de mai au mois de septembre. Parmi les autres projets d'utilisation de l'énergie solaire, il faut citer la réduction des frais de chauffage de serres, le séchage de produits agricoles (tabac) et la réfrigération (climatisation de l'air). Des études architecturales sont en cours pour la réalisation d'une maison solaire autrichienne.

Un contrat a été conclu avec l'Université de Dhahran (Arabie saoudite) pour des travaux de coopération sur l'utilisation de l'énergie solaire.

Canada : Institut de recherche Brace

Les activités de l'Institut de recherche Brace (Québec) sont largement consacrées aux problèmes des zones rurales des pays en développement. L'Institut s'intéresse tout particulièrement aux techniques et appareils solaires de distillation, séchage de produits agricoles et cuisson des aliments.

L'Institut a entrepris un certain nombre de projets en coopération pour la mise au point, la fabrication, l'installation et l'essai d'appareils solaires de distillation, de séchage et de cuisson dans plusieurs pays en développement. Il a également aidé des institutions de pays en développement à élaborer leurs propres programmes d'énergie solaire.

Egypte : Centre du développement industriel pour les pays arabes

Le Centre du développement industriel pour les pays arabes (IDCAS), dont le siège est au Caire, est affilié à la Ligue arabe. Les 21 Etats arabes sont membres du Conseil exécutif. L'une des principales

activités de l'IDCAS est de développer la coopération entre pays arabes dans les divers secteurs industriels.

L'IDCAS a organisé deux réunions sur l'énergie solaire dans les pays arabes en vue de recueillir les renseignements nécessaires sur les mesures que les pays arabes doivent prendre pour rendre économique l'utilisation de l'énergie solaire. Le Centre est prêt à coopérer avec tout organisme s'intéressant à l'énergie solaire et il est disposé à entreprendre des études d'ensemble sur les possibilités d'utilisation de l'énergie solaire dans les pays arabes.

Inde : Laboratoire national de physique, New Delhi

Peu après 1950, le Laboratoire national de physique a entrepris des travaux sur l'utilisation de l'énergie solaire, qui ont continué jusqu'aux environs de 1958. Durant cette période, il a mis au point des chauffe-eau, cuisinières et distillateurs solaires. Quelques chauffe-eau ont été fabriqués et installés; ils sont toujours en service. On a également fabriqué de nombreux appareils solaires de cuisson. Toutefois, du fait de l'offre abondante de sources d'énergie classiques, la demande d'appareils solaires était faible. En conséquence, les travaux sur l'utilisation de l'énergie solaire ont été abandonnés en grande partie.

Le LNP est chargé de la mise au point de capteurs plans à moyenne température et rendement élevé. Pour ce faire, il a étudié une grande variété de revêtements sélectifs, tels que les oxydes de cuivre, de nickel et de chrome, le sulfure de plomb, le tellure de cadmium et des cermets de MgO et or. Il a également mis au point des revêtements sélectifs pour les structures et des fenêtres sélectives sur les vitrages en utilisant SnO₂ ou In₂O₃. On a obtenu des températures stagnantes allant jusqu'à 180 °C.

Le LNP est également chargé d'établir des procédures et normes d'essais pour ces capteurs. Il a créé des installations très complètes pour ces essais. Le pouvoir émissif et le pouvoir absorbant des revêtements sélectifs ainsi que le facteur de transmission des vitrages peuvent être mesurés sur l'intervalle spectral de 300 nm à 20 m. Tous les paramètres d'un capteur plan peuvent maintenant être mesurés. On peut également faire l'essai de capteurs après montage pour déterminer leur rendement. Le LNP dispose également d'appareils pour étudier l'influence des conditions ambiantes, de l'humidité, du sel, etc., sur le rendement des capteurs.

Les essais *in situ* sont faits par BHEL. Le LNP établit actuellement des héliocentres où l'on reproduira artificiellement diverses conditions d'ensoleillement afin d'essayer des capteurs et des piles solaires.

Le LNP a mis au point des chauffe-eau de 75 et 150 litres, qui sont maintenant à l'essai.

**La Jamahiriya arabe libyenne : Institut arabe
du développement**

L'Institut arabe du développement a été créé dans la Jamahiriya arabe libyenne en 1975 afin de mobiliser les efforts des hommes de science arabes dans l'intérêt des pays arabes. Il a pour objectif le développement par la recherche scientifique et technologique.

La Conférence sur la physique de l'énergie solaire, tenue en 1976 à l'Université Gar Yumo de Benghazi, a fait des recommandations à l'Institut en vue de la création d'un centre d'étude de l'énergie solaire. L'Institut procède actuellement à l'établissement de ce centre.

La recherche est concentrée pour le moment sur les capteurs. Des travaux commenceront bientôt sur l'optimisation du cycle des moteurs solaires et sur le pouvoir de transmission des vitrages.

Parallèlement aux travaux de l'Institut, des recherches sont faites sur les distillateurs solaires à l'Université El-Fateh (Tripoli).

**Arabie saoudite : Collège d'ingénierie,
Université de Riyad**

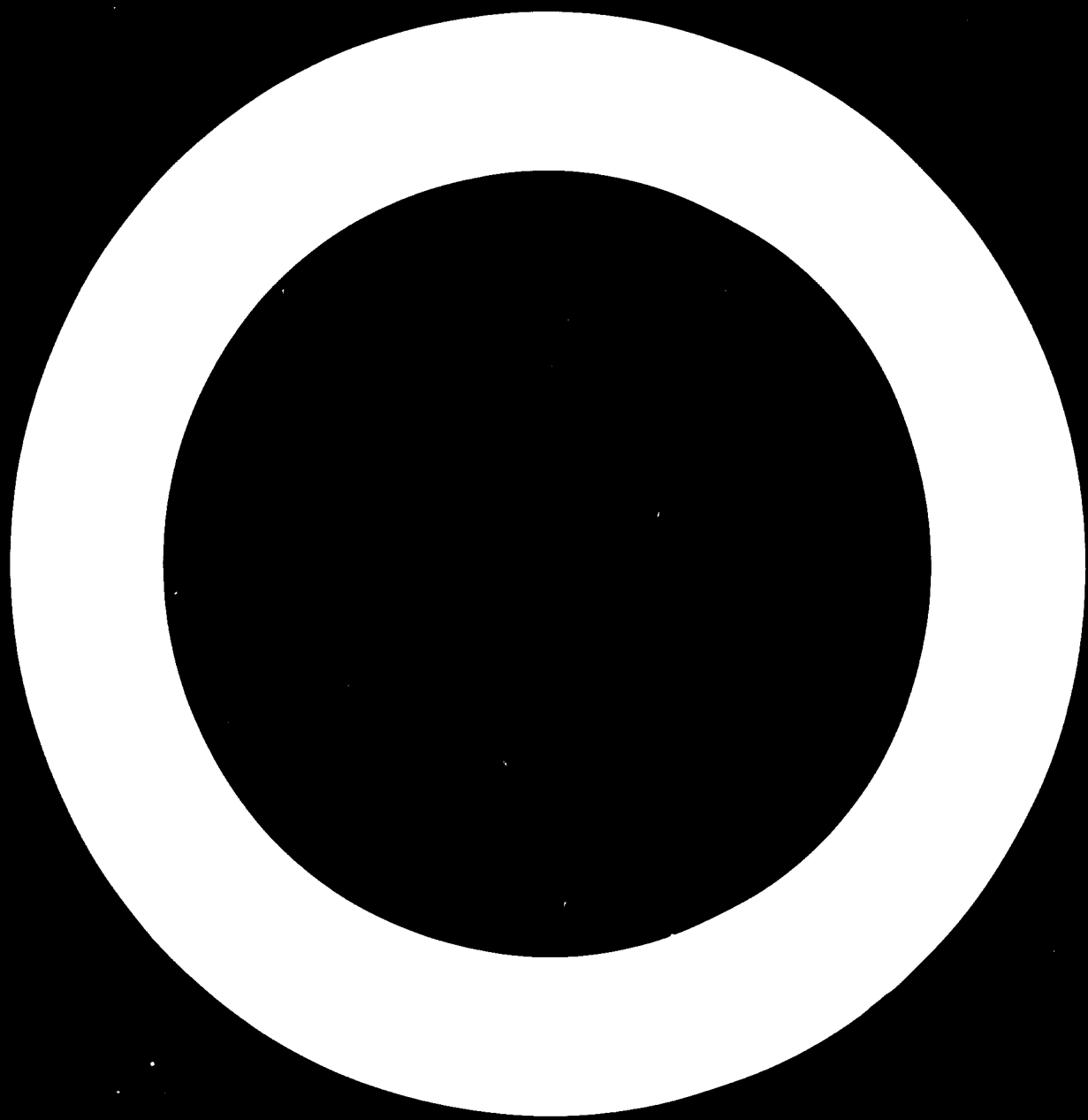
De 1969 à 1973, plusieurs chauffe-eau et distillateurs solaires ont été fabriqués et essayés au

Collège d'ingénierie de l'Université de Riyad. Depuis 1973, les travaux ont porté sur les questions suivantes : évaluation du rayonnement, distillateurs en béton à simple pente, refroidissement nocturne, maisons solaires et perspectives, suppression de la convection et structures alvéolaires, effets des ultraviolets sur la peau, accumulateurs thermiques et autres types de stockage, capteurs plans et environnement, appareils de chauffage de l'air.

**Etats-Unis : Laboratoire de l'énergie solaire
et de la conversion de l'énergie,
Université de Floride**

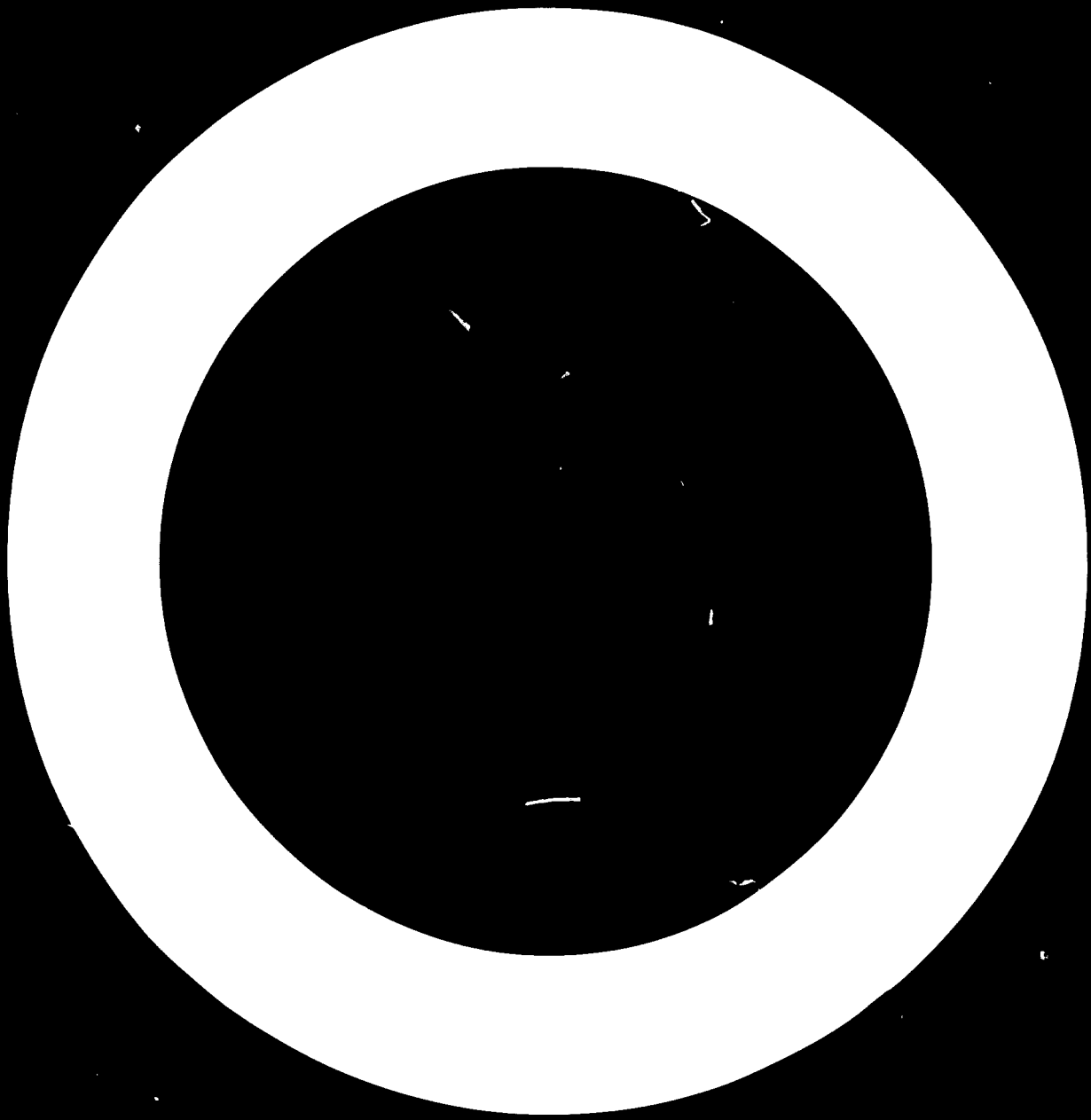
Depuis sa création, le Laboratoire de l'énergie solaire et de la conversion de l'énergie mesure la quantité d'énergie solaire disponible et ses caractéristiques; il a établi des tables de données pour la conception d'appareils. Les propriétés solaires des matériaux sont mesurées dans un calorimètre solaire mis au point au Laboratoire, qui est le seul instrument de ce genre décrit dans le manuel de l'American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning, principal ouvrage de référence dans ce domaine.

Le Laboratoire a mis au point des capteurs pour le chauffage de l'eau, le chauffage et le rafraîchissement des locaux, le chauffage de piscines, la production d'eau douce et le recyclage des déchets liquides. Ses travaux portent également sur la conversion de l'énergie solaire pour la cuisson ou dans des fours solaires. Il a mis au point deux autos électriques solaires, deux autobus électriques solaires et une maison solaire dans laquelle plus de 90 % de l'énergie utilisée est d'origine solaire.



Troisième partie

SELECTION
DE COMMUNICATIONS TECHNIQUES
SUR L'UTILISATION
DE L'ENERGIE SOLAIRE



Une centrale électrique de 10 kW

Hans Kleinrath

Institut für Elektrische Maschinen, Technische Universität, Vienne (Autriche)

Il existe de nombreuses options pour la conception d'une centrale solaire de l'ordre de 10 kW. En voici quelques-unes :

| Éléments de la centrale | Options |
|-------------------------|---|
| Capteur | Plan A faible effet de concentration A grand effet de concentration |
| Fluide de travail | Eau Liquide organique Mélange de fluides |
| Stockage | Thermique Électrique |
| Moteur primaire | Moteur à vapeur Turbine à faible vitesse Turbine à grande vitesse |
| Génératrice | Machine à haute fréquence Machine d'environ 50 Hz, avec ou sans démultiplication |
| Réseau électrique | Courant continu Courant alternatif |

En conséquence, les projets actuels de plusieurs fabricants sont fondés sur une vaste gamme de conceptions et diverses permutations des possibilités ci-dessus. Le présent article décrit un projet autrichien de centrale ayant le plus petit nombre possible de commandes et pouvant fonctionner

automatiquement. La figure 1 donne le schéma de cette centrale.

Capteurs

Les capteurs sont des réflecteurs paraboliques ayant un facteur de concentration de 10. Comparés aux capteurs plans fixes, les capteurs paraboliques peuvent avoir une température de travail plus élevée sans que leur rendement diminue sensiblement; ils ont donc un meilleur rendement de Carnot; de plus, ils captent mieux l'énergie pendant toute la journée, puisqu'ils peuvent suivre la course du soleil.

L'effet de concentration étant relativement faible, la température de l'eau à la sortie des capteurs est de 135 °C. Il s'ensuit que la pression est relativement faible et, par conséquent, que les contraintes sur les joints, vannes et isolants sont également faibles. La surface totale des capteurs est d'environ 300 m².

Circuit du Fréon et moteur primaire

Le circuit primaire est relié par un appareil de préchauffage et un évaporateur au circuit secondaire du Fréon. Le moteur primaire est une turbine au

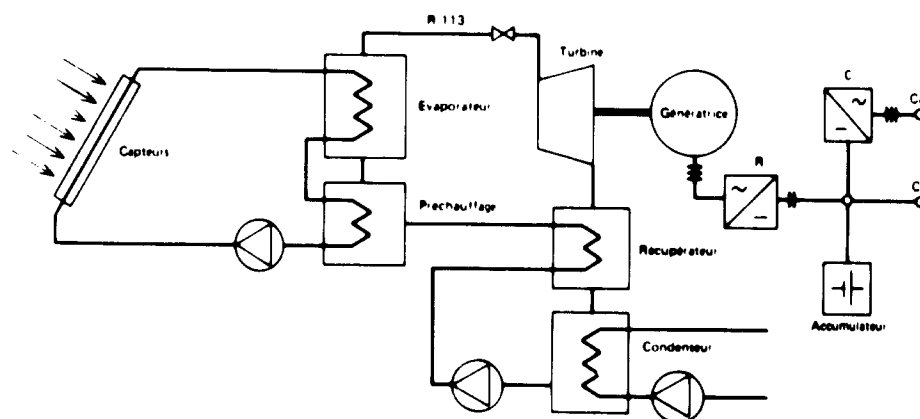


Figure 1. Schéma de la centrale solaire autrichienne de 10 kW

Fréon. Contrairement aux détendeurs à vis, une turbine garde une vitesse presque constante, même sous charge partielle; de ce fait, il est facile d'obtenir une tension constante d'un alternateur directement accouplé à la turbine.

Les spécifications de la turbine sont les suivantes :

| | |
|---------------------------|----------|
| Fluide de travail | R 113 |
| Température à l'admission | 120 °C |
| Température à la sortie | 73 °C |
| Pression à l'admission | 7,0 bars |
| Pression à la sortie | 0,7 bar |
| Puissance nominale | 16 kW |

En intercalant un récupérateur entre la turbine et le condenseur, on peut utiliser un supplément d'énergie primaire d'environ 11%. Ceci permet de réduire la surface totale des capteurs ainsi que la quantité d'eau de refroidissement dans le condenseur.

Génératrice et réseau électrique

Une génératrice synchrone est directement accouplée à la turbine. Si on utilise un alternateur homopolaire, le rotor est en acier, sans enroulement, bagues ou balais.

La tension de la génératrice à haute fréquence est rectifiée, puis connectée à un accumulateur. Cet accumulateur sert à la fois de stockage de l'électricité et de tampon pour le rotor, maintenant sa vitesse à peu près constante. Le troisième rôle de l'accumulateur est d'alimenter tous les éléments auxiliaires pendant la mise en marche.

Performance de l'installation

Les capteurs suivant la course du soleil, l'énergie produite augmente très rapidement jusqu'à la valeur maximale. Dès que l'énergie produite est suffisante pour actionner tous les éléments auxiliaires et compenser les pertes dans l'ensemble de l'installation, les pompes de trois circuits sont mises en route. Après le démarrage de la turbine, le réseau d'utilisation du courant électrique est branché automatiquement, suivant la quantité de courant disponible.

La figure 2 donne les courbes caractéristiques calculées pour les conditions de fonctionnement en Autriche au mois de juin. La courbe 1 représente les variations du rayonnement solaire direct, mesurées par une station météorologique. La courbe 2 représente l'énergie solaire absorbée; elle diminue en fonction de l'ombre projetée par un capteur sur un autre lorsque l'inclinaison des capteurs est supérieure à 45°.

La courbe 3 représente le rendement des capteurs; la courbe 4, la quantité de courant électrique utilisable.

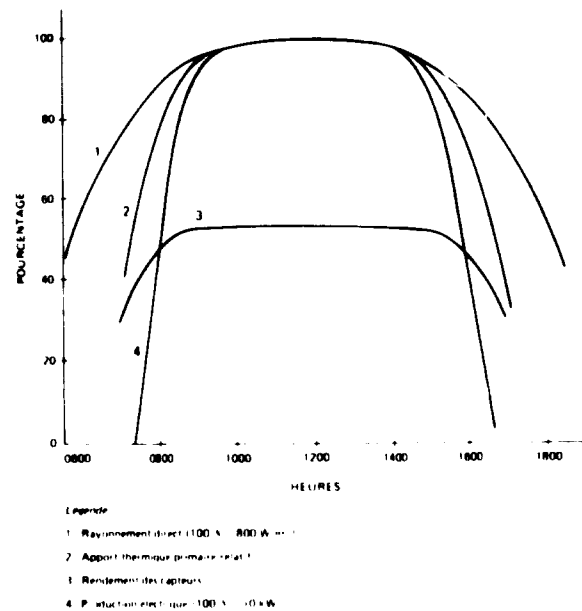


Figure 2. Courbes caractéristiques de la centrale calculées pour juin

Equipement complémentaire

Le réseau le plus simple est le réseau en courant continu décrit ci-dessus, l'accumulateur assurant le stockage de l'énergie. Les principaux avantages de ce réseau sont les suivants :

Il n'est pas nécessaire d'avoir un réglage très précis de la vitesse;

Il n'est pas nécessaire d'avoir une démultiplication entre le moteur primaire et la génératrice (ce qui serait indispensable si l'on voulait produire du courant alternatif à 50 ou 60 Hz, les moteurs de 10 kW seulement ayant une vitesse supérieure à 3 000 tr/mn);

Il n'est pas nécessaire de prévoir un appareil supplémentaire pour la mise en marche;

Le système de commande est simple et très sûr.

Une centrale d'environ 10 kW est suffisante dans la plupart des cas pour actionner des appareils d'éclairage, de radio et de télévision. Elle peut également alimenter des moteurs électriques à courant continu. Elle peut également alimenter des moteurs à courant alternatif, à condition d'ajouter un convertisseur à simple armature. Dans un tel convertisseur, avec commutateur et bagues, il faut nettoyer le commutateur et changer les balais de temps à autre. Néanmoins, il a quelques avantages sur le thyristor: il est bien meilleur marché, les pertes sont très faibles et il est insensible aux surcharges, par exemple lors de la mise en route des moteurs à courant alternatif.

Conversion de l'énergie solaire en énergie mécanique ou électrique : Inde

V. G. Bhide

Laboratoire national de physique, New Delhi (Inde)

La surface totale des terres cultivées en Inde est d'environ 143×10^6 ha, dont 30% (43×10^6 ha) sont irrigués. Pour 23×10^6 ha de la surface irriguée, l'eau est fournie par des puits instantanés, des bassins ou autres petits systèmes d'irrigation. Selon le cinquième plan quinquennal (1974-1979), la surface irriguée devait être augmentée de $11,2 \times 10^6$ ha, dont 6×10^6 ha desservis par de petits systèmes d'irrigation.

On avait prévu initialement que 1,5 million de pompes de 1,5 kW (2 hp) seraient installées durant cette période. Cependant, du fait de la crise du pétrole, non seulement ces pompes supplémentaires n'ont pas été installées, mais même une fraction assez importante des 2,5 millions de pompes existantes ne sont pas énergétisées (Diesel ou électricité). En conséquence, la mise au point et la production de pompes solaires dans la gamme 1,5-4 kW (2-5 hp) ont reçu la plus haute priorité. Ces pompes seront de préférence du type modulaire, de sorte que l'installation puisse être utilisée, hors période de pompage, pour produire de l'énergie mécanique ou électrique pour de petites opérations industrielles ou l'éclairage.

En outre, les planificateurs indiens ont lancé la R-A et l'installation de centrales solaires dans la gamme 10-100 kW, chacune d'elles devant satisfaire tous les besoins énergétiques d'un village ou d'un groupe de villages.

La conversion photovoltaïque ou thermo-électrique de l'énergie solaire ne semble pas une proposition pratique; de ce fait, les efforts ont été concentrés sur l'utilisation directe de la chaleur du soleil.

Pompe solaire Abhimanyu

La figure 1 montre la pompe solaire Abhimanyu, mise au point par le Laboratoire national de physique (LNP). Ses éléments essentiels sont une batterie de capteurs plans et un moteur Rankine à fluide organique en circuit fermé. En fonctionnement, un fluide caloporteur (eau) traverse la batterie de capteurs et est porté à une température de 80-95 °C, selon le rendement des capteurs et l'ensoleillement. Cette eau chaude est utilisée pour vaporiser un liquide organique à faible point d'ébullition dans un

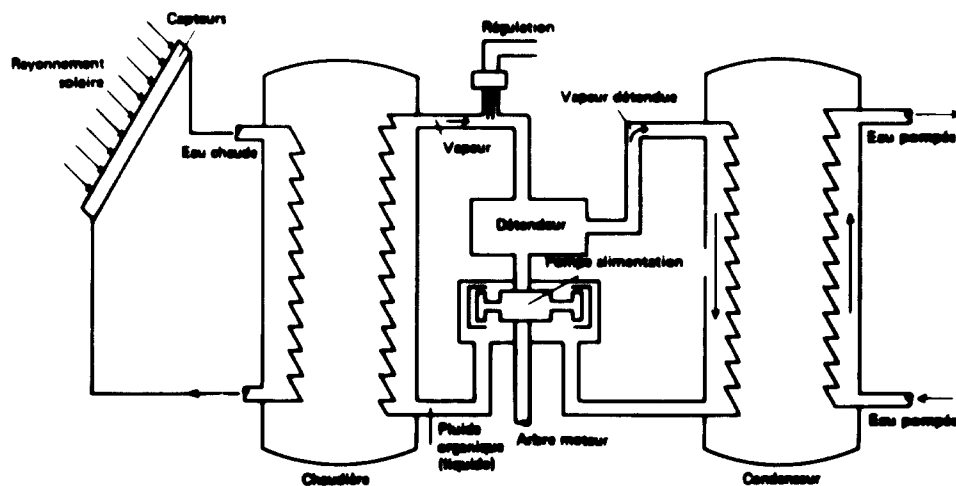


Figure 1. Schéma de la pompe solaire Abhimanyu

échangeur de chaleur à contre-courant (chaudière). La vapeur organique chaude à forte pression est alors utilisée pour actionner le détendeur du moteur Rankine. Après son passage dans le détendeur, la vapeur est condensée dans un condenseur où l'eau pompée sert de source froide. Le fluide organique condensé est pressurisé et réinjecté dans la chaudière grâce à une pompe d'alimentation montée sur l'arbre du détendeur. Pour certains fluides organiques, on peut également monter un régénérateur qui utilise la chaleur de la vapeur d'échappement pour préchauffer le fluide réinjecté dans la chaudière.

Le moteur Rankine à fluide organique convient particulièrement bien au pompage solaire et à la production de courant électrique, ainsi qu'à l'utilisation des résidus thermiques, pour plusieurs raisons :

a) Rendement thermique élevé, même aux basses températures (80-95 °C) que l'on peut obtenir avec des capteurs plans;

b) Prix de revient peu élevé, du fait de l'utilisation de matériaux d'usage courant et d'éléments mécaniques simples;

c) Grande fiabilité du fait qu'il est hermétique, ce qui le protège contre le sable, les poussières, l'humidité, etc.;

d) Pas de problème de protection contre le gel, car les fluides de travail utilisés ont des points de congélation très bas.

Le rendement de l'installation, qui détermine dans une grande mesure la surface de capteurs nécessaire (et par conséquent le coût), est défini par $\eta_i = \eta_m \times \eta_c$, où η_m et η_c représentent respectivement le rendement du moteur et celui des capteurs.

Alors que le rendement du moteur augmente en même temps que la température des capteurs, le rendement des capteurs diminue lorsque leur température augmente. Il faut donc déterminer la gamme de températures dans laquelle l'ensemble

capteur-moteur donne à l'installation son rendement maximal. Comme nous le verrons plus loin, ce rendement maximal dépend de plusieurs facteurs : ensoleillement, température du condenseur, caractéristiques de la batterie de capteurs, du détendeur, de la pompe d'alimentation, du fluide de travail, etc. Néanmoins, il est évident que le rendement de l'installation est fonction essentiellement du rendement de la batterie de capteurs et de la température qu'elle peut fournir. Il faut donc absolument optimiser la batterie de capteurs dans une grande centrale, car une proportion importante du coût total est représentée par les capteurs.

Batteries de capteurs

Des capteurs plans ont été utilisés pour la pompe Abhimanyu (voir figure 2). L'absorbeur est une plaque en alliage d'aluminium avec canal de circulation du fluide réalisé par emboutissage sous pression. La conception mécanique des capteurs a été optimisée.

On a essayé des revêtements sélectifs en oxydes de cuivre, de nickel et de chrome, ainsi qu'en PbS, CdTe et autres matériaux. Avec le meilleur capteur, on a pu obtenir une température stagnante de 180 °C avec un ensoleillement de 1 000 W/m² (figure 3). La figure 4 montre la variation annuelle du gain quotidien d'énergie thermique avec un capteur typique fonctionnant à 90 °C. On a essayé de faire des fenêtres sélectives en revêtant le vitrage de SnO₂, In₂O₃, etc., mais le coût de l'opération ne justifiait pas l'amélioration du rendement.

Comme il est souhaitable que le détendeur fonctionne à une température d'admission constante, il faut un réservoir pour stocker l'eau chaude. Ce réservoir est relié à la batterie de capteurs par une vanne de dérivation à thermostat. Dans les conditions normales de fonctionnement, près de la moitié de la

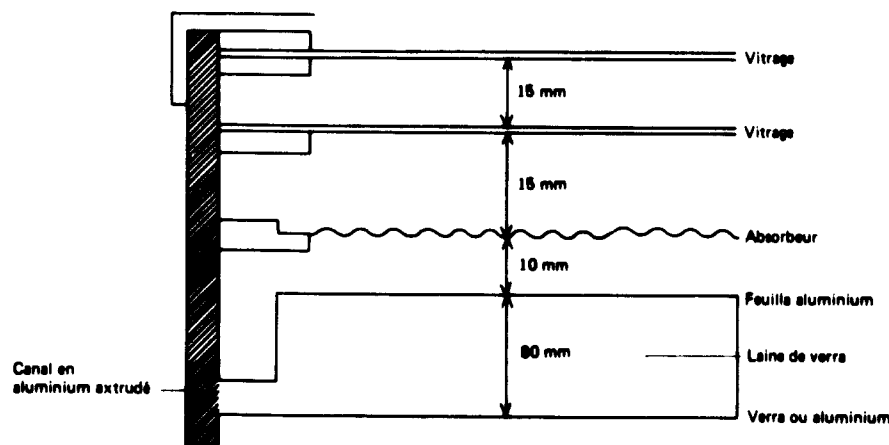


Figure 2. Coupe d'un capteur

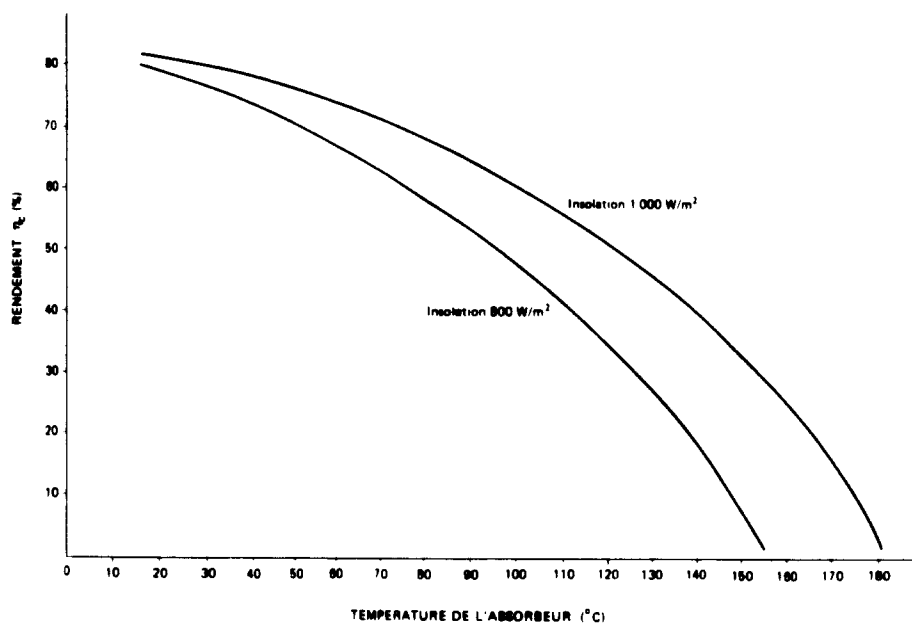
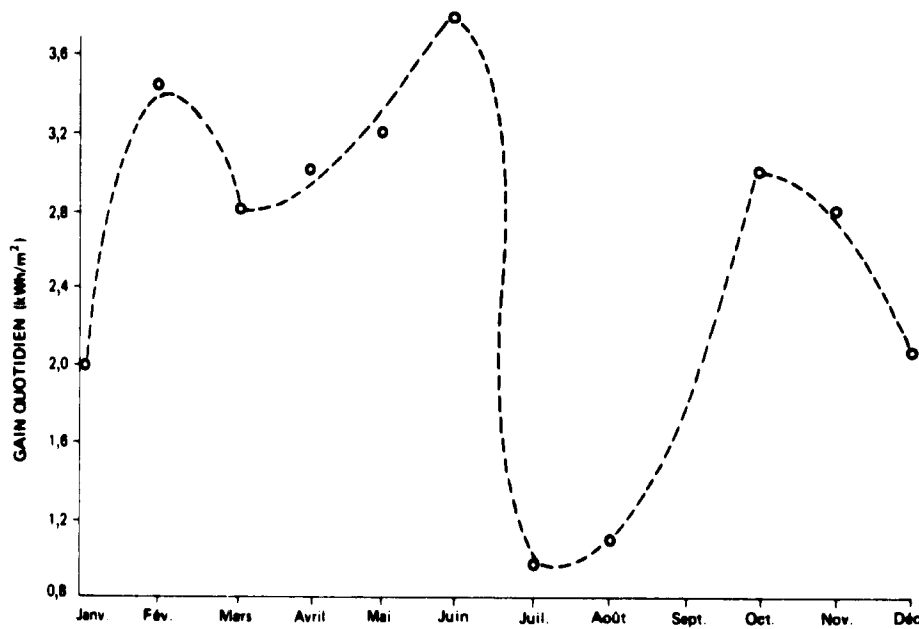


Figure 3. Rendement du capteur choisi pour la pompe Abhimanyu

Figure 4. Variation annuelle du gain quotidien d'énergie avec un capteur à 30°C

chaleur est nécessaire pour préchauffer le fluide organique, l'autre moitié étant utilisée pendant le processus d'ébullition. On peut réaliser une économie de surface des capteurs en utilisant une batterie de capteurs pour les basses températures et une autre pour les hautes températures. La première sert au préchauffage et la seconde sert à l'ébullition et à la surchauffe de la vapeur organique.

Détendeur

Le cœur de la pompe est le détendeur, dans lequel la vapeur à haute pression effectue un travail mécanique et fournit la puissance à l'arbre pendant le processus de détente. Dans une grande mesure, le détendeur détermine la fiabilité et le rendement de l'installation. En principe, le détendeur peut être une

machine à mouvement alternatif, une turbine ou une machine rotative à déplacement positif.

Dans une machine à mouvement alternatif, le mouvement linéaire est converti en mouvement rotatif grâce à un vilebrequin. Dans une telle machine, il faut des soupapes d'admission et des soupapes d'échappement pour contrôler le débit de vapeur sous pression dans le moteur. Dans des pompes à faible puissance, l'utilisation de machines à mouvement alternatif rend le système complexe et peu efficace.

Des turbines peuvent être utilisées quand la puissance est élevée. Aux faibles puissances, la turbine est plus petite et sa vitesse est plus grande, ce qui crée divers problèmes. Il faut une démultiplication pour réduire la vitesse à une vitesse compatible avec celle de la pompe ou de la génératrice. Comme les turbines ne sont pas des machines à déplacement positif, le rendement de la turbine diminue en même temps que le débit de vapeur. De plus, la réponse d'une turbine aux variations de charge est assez mauvaise. Pour les faibles puissances, il est donc préférable d'utiliser des machines à déplacement positif tournant à une vitesse modérée comprise entre 1 000 et 1 800 tr/mn.

Le détendeur utilisé dans les pompes Abhimanyu est une machine rotative à déplacement positif. Il s'agit de deux spirales montées en opposition, comme le montre la figure 5. L'une des spirales est fixée sur la tête de culasse, l'autre tourne, légèrement excentrée, autour de la lumière d'admission. Il se forme entre les deux spirales un certain nombre de poches, dont le volume change lors du mouvement de la spirale mobile (figure 6). Selon la direction du mouvement orbital, la dimension des poches augmente ou diminue. Ainsi, la machine peut être utilisée comme compresseur ou comme détendeur. Lorsqu'elle est utilisée comme détendeur, la vapeur à haute pression pénètre au centre de la machine et, après détente, s'échappe à la périphérie. Lorsque la machine est utilisée comme compresseur, l'admission est à la périphérie et le gaz comprimé s'échappe au centre de la machine.

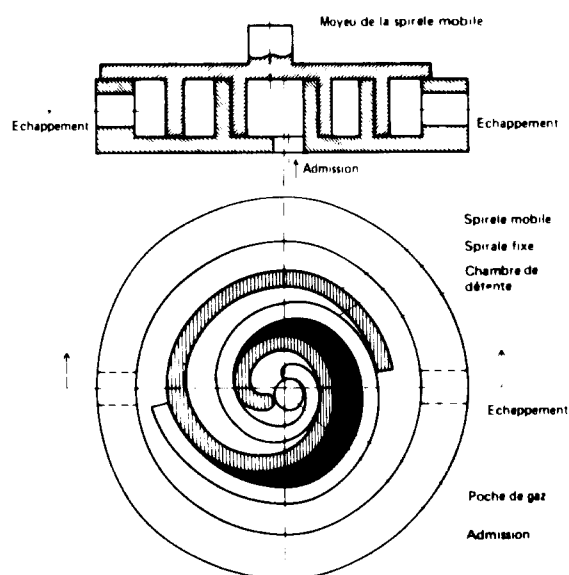


Figure 5. Configuration typique d'un détendeur à spirales

Ce détendeur n'a pas de vanne de réglage du débit et il y a très peu de parties mobiles. Le volume de fluide déplacé par tour est fonction du volume des poches formées entre les deux spirales, lequel est déterminé à son tour par le pas et la hauteur des spirales, ainsi que par l'épaisseur des spirales. La tête et le fond de la culasse ferment ces poches, jouant ainsi le même rôle que la paroi du cylindre dans une machine à mouvement alternatif. Le tableau 1 donne les caractéristiques comparées du détendeur Abhimanyu, d'une machine à mouvement alternatif et d'une turbine.

Comme le détendeur à spirales fonctionne à faibles vitesses, il peut actionner directement une pompe ou une génératrice. Comme il a peu de parties

TABLEAU 1. COMPARAISON DE MACHINES

| Caractéristique | Détendeur Abhimanyu | Machine à mouvement alternatif | Turbine |
|--|---------------------|--------------------------------|------------------------|
| Rendement (%) | 70-80 | 70-80 | 60-80 |
| Soupapes | Aucune | Admission et échappement | Aucune |
| Parties mobiles | Peu | Beaucoup | Peu |
| Vitesse (tr/mn) | 900-1 800 | 900-3 600 | 3 000-80 000 |
| Connexion avec la pompe d'alimentation | Directe | Directe | Forte démultiplication |
| Possibilité de variation de la vitesse | Bonne | Bonne | Faible |
| Fonctionnement sous charge partielle | Bon | Bon | Médiocre à moyen |
| Niveau de bruit | Faible | Elevé | Assez élevé |
| Fiabilité | Bonne | Moyenne | Moyenne |

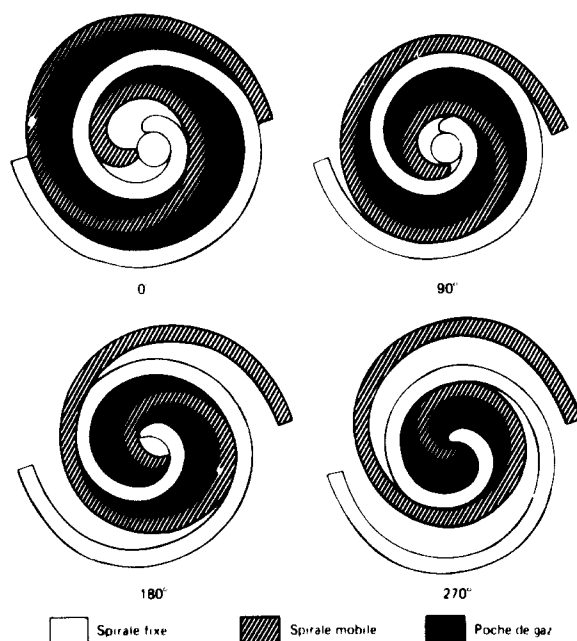


Figure 6. Machine rotative à déplacement positif utilisée comme compresseur : quatre positions de la spirale mobile

mobiles, les vitesses de frottement et les pressions de contact sont faibles : le détendeur à spirales s'améliore au lieu de s'user. Ces caractéristiques se traduisent par un fonctionnement hautement fiable, avec des rendements mesurés de l'ordre de 80 %.

Le rapport volumique qui peut être obtenu est fonction du diamètre et du pas de la spirale. Voici les dimensions d'un détendeur à spirales typique, utilisé dans une pompe Abhimanyu de 1 kW :

| | Pouces | Millimètres |
|------------------------------------|--------|-------------|
| Pas | 0,625 | 15,88 |
| Hauteur des spirales | 0,875 | 22,22 |
| Épaisseur des spirales | 0,125 | 3,18 |
| Diamètre extérieur | 6,5 | 165 |
| Rayon orbital de la spirale mobile | 0,1875 | 4,76 |

Avec un tel appareil, le volume déplacé par tour est de 5,7 in.³ (93,4 cm³) et le rapport volumique est de 3.

Fluide de travail et cycle

Les dimensions du détendeur dépendent fortement du fluide de travail choisi. On a envisagé divers fluides, notamment les réfrigérants bien connus R11, R113 et R114. R11 a été éliminé à cause de sa faible pression (et par conséquent de sa mauvaise performance) aux températures qui peuvent être obtenues avec des capteurs plans. L'inconvénient de R113 est qu'il exige l'emploi d'un régénérateur. Finalement, on a choisi R114 car il convient parfaitement aux températures envisagées et à la production d'énergie.

Le cycle de fonctionnement du moteur est donné par la figure 7. Dans un échangeur de chaleur à contre-courant, l'eau chaude venant du ballon de stockage à une température d'environ 90 °C cède de la chaleur au fluide de travail R114. Celui-ci sort de l'échangeur à une température de 82 °C et une pression de 9,3 bars (120 psig) (segment AB). C'est à ces température et pression qu'il pénètre dans le détendeur. Après détente, la vapeur s'échappe à une température de 37,5 °C. A la sortie du détendeur, la vapeur est légèrement surchauffée et sa pression est de 2,4 bars (20 psig); la température du condenseur est de 30 °C. Cette détente isentropique est représentée par le segment BC. Le travail effectué par unité de masse de vapeur détendue est de 20,9 kJ/kg. La vapeur sortant du détendeur est condensée par de l'eau froide dans le condenseur. Ce processus est représenté par le segment CD. Le liquide condensé est pressurisé et réinjecté dans l'échangeur par la pompe d'alimentation (segment DA) et le cycle est ainsi fermé. Le rendement de Carnot est de 14,7 % et le rendement thermodynamique est de 12,5 %, soit un rendement de 85 % pour le détendeur.

Voici les spécifications détaillées d'une pompe Abhimanyu de 1 kW.

| Éléments | Spécification |
|--|---|
| Pression d'admission | 9,3 bars (120 psig) |
| Température d'admission | 80 °C |
| Température du condenseur | 30 °C |
| Fluide de travail | R114 |
| Enthalpie à l'admission dans le détendeur | 223,3 kJ/kg (96 Btu/lb) |
| Pression à l'échappement | 2,4 bars (20 psig) |
| Enthalpie après détente | 202,4 kJ/kg (87 Btu/lb) |
| Travail accompli pendant la détente isentropique | 20,9 kJ/kg (9 Btu/lb) |
| Volume spécifique du fluide de travail à l'admission | 0,015 m ³ /kg (0,24 ft ³ /lb) |
| Débit de fluide nécessaire pour une puissance à l'arbre de 1 kW (1,3 hp) | 168 kg/h (370 lb/h) |
| Débit de vapeur dans le détendeur à la pression d'admission | 2,49 m ³ /h (88,8 ft ³ /h) |
| Volume de vapeur haute pression admise dans le détendeur par tour | 22,9 cm ³ (1,4 in. ³) |
| Vitesse du détendeur | 1 827 tr/mn |
| Chaudière-génératrice | Echangeur de chaleur tubulaire à ailettes et contre-courant |
| Température de l'eau à l'entrée dans la chaudière | 90 °C |
| Température de l'eau à la sortie de la chaudière | 81 °C |
| Débit d'eau dans la chaudière | 3,5 l/mn |
| Enthalpie du fluide de travail (vapeur) à 37,5 °C | 202,4 kJ/kg (87 Btu/lb) |
| Enthalpie du fluide de travail (liquide) à 30 °C | 53,5 kJ/kg (23 Btu/lb) |
| Chaleur totale devant être extraite dans le condenseur | 24,9 MJ (23,6 x 10 ³ Btu) |
| Surface de capteurs nécessaire pour faire fonctionner la pompe 4 heures par jour | 10 m ² |

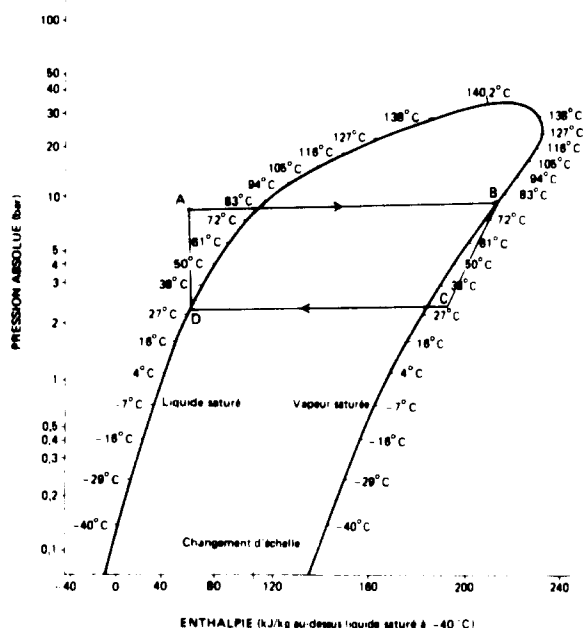


Figure 7. Cycle de fonctionnement du moteur

Optimalisation du système

Le rendement du moteur, produit des rendements du détendeur et de la pompe d'alimentation, était de l'ordre de 70 % du rendement de Carnot. La figure 8 donne le rendement du moteur en fonction de la température à l'admission dans le détendeur pour diverses températures du condenseur. Plus la température dans le condenseur est faible, plus le rendement du moteur est élevé. En combinant les données de la figure 8 sur le rendement du moteur et les données de la figure 3 sur le rendement des capteurs, on obtient le rendement du système (figure 9).

Pour un ensoleillement donné, il y a une gamme optimale de températures des capteurs pour laquelle le rendement du système est maximal. On doit garder ces considérations présentes à l'esprit dans la conception du système. Celui-ci est versatile en ce sens que lorsque le pompage n'est pas nécessaire, on peut l'utiliser pour produire du courant électrique ou pour actionner une machine telle qu'une batteuse ou un petit tour. La batterie de capteurs a une surface de 10 m²; les dimensions des autres éléments sont données ci-dessous.

| | Hauteur (cm) | Diamètre (cm) |
|--------------------|--------------|---------------|
| Condenseur | 50 | 25 |
| Chaudière | 50 | 30 |
| Détendeur | 35 | 30 |
| Ballon de stockage | 200 | 65 |
| Pompe | 25 | 20 |

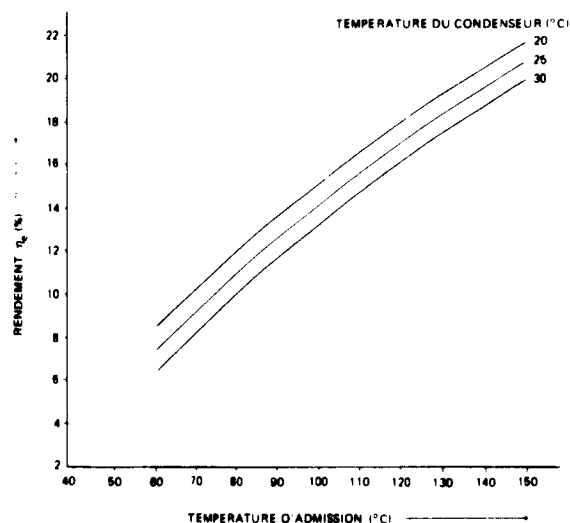


Figure 8. Rendement du moteur en fonction de la température d'admission pour diverses températures du condenseur

La pompe Abhimanyu de 1 kW fonctionnait depuis six mois lors de la rédaction de cet article. Sur les mêmes principes, on peut concevoir des pompes d'une puissance allant jusqu'à 12 kW.

Production d'électricité (10-100 kW)

Deux centrales solaires de 10 kW sont à l'étude en Inde. Le premier projet est une entreprise du Gouvernement indien et du Gouvernement de la République fédérale d'Allemagne. Bharat Heavy Electricals Ltd., le Laboratoire national de physique et l'Institut indien de technologie de Madras sont les agents d'exécution du côté indien. Messerschmidt, Bölkow und Blohm (MBB) de Munich est l'agent d'exécution du côté allemand. L'objet du projet est une centrale solaire de démonstration de 10 kW. La figure 10 donne un schéma de cette centrale. On utilisera le détendeur à vis de Linde, une batterie de capteurs plans et un alternateur classique; le fluide de travail sera le R114.

Le second projet de centrale solaire de 10 kW est entièrement indien; on envisage l'utilisation de détendeurs à spirales. Dans les deux projets, on utilisera des moteurs Rankine à fluide organique et des batteries de capteurs plans. Voici les principaux paramètres de cette centrale.

| Élément | Spécification |
|---------------------------|--|
| Puissance à l'arbre | 10 kW |
| Détendeur | Détendeur à spirales à déplacement positif |
| Fluide de travail | R114 |
| Température d'admission | 80 °C |
| Pression d'admission | 9,3 bars (120 psig) |
| Température d'échappement | 37,5 °C |

| Elément | Spécification | Elément | Spécification |
|------------------------------------|--|---|---|
| Pression d'échappement | 2,4 bars (20 psig) | Débit du fluide de travail | 49 kg/mn (108 lb/mn) |
| Pas de la spirale | 5,7 cm (2,25 in.) | Chaudière-génératrice | Echangeur de chaleur tubulaire à ailettes, à contre-courant |
| Hauteur de la spirale | 7,6 cm (3 in.) | Température de l'eau à l'entrée dans la chaudière | 90 °C |
| Epaisseur de la spirale | 6,4 mm (0,250 in.) | Température de l'eau à la sortie de la chaudière | 81 °C |
| Rayon orbital de la spirale mobile | 22,2 mm (0,875 in.) | Débit dans la chaudière | 180 l/mn |
| Diamètre extérieur de la spirale | 50,8 cm (20 in.) | Surface de capteurs | 400 m ² |
| Volume déplacé par tour | 524,5 cm ³ (32 in. ³) | | |
| Rapport volumique | 3,5 | | |
| Vitesse du détendeur | 1 500 tr/mn | | |

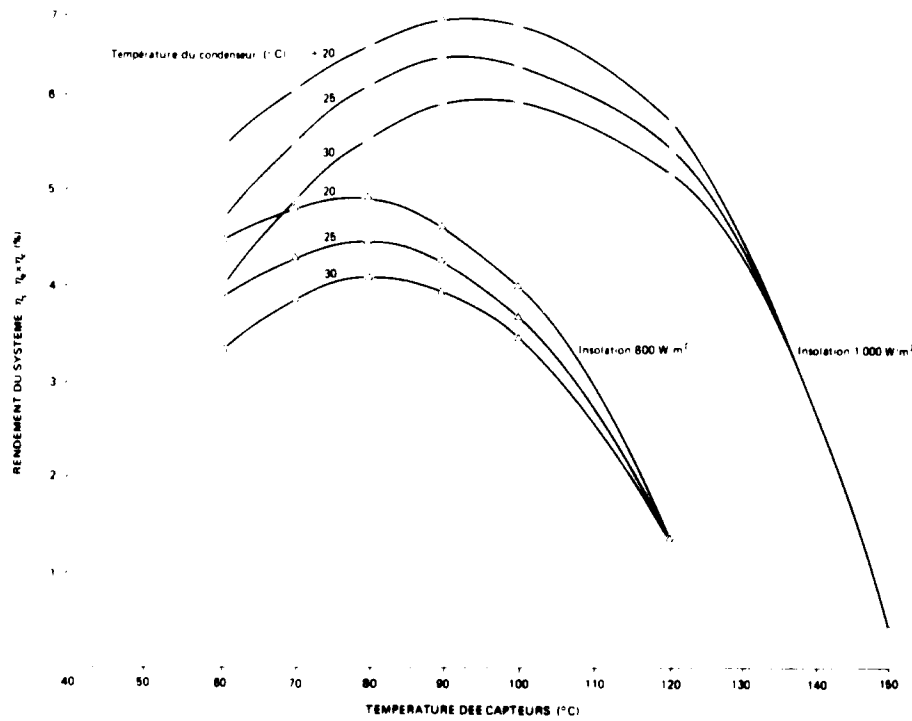


Figure 9. Variations de rendement du système selon la température des capteurs avec une isolation de 800 W/m² ou de 1 000 W/m²

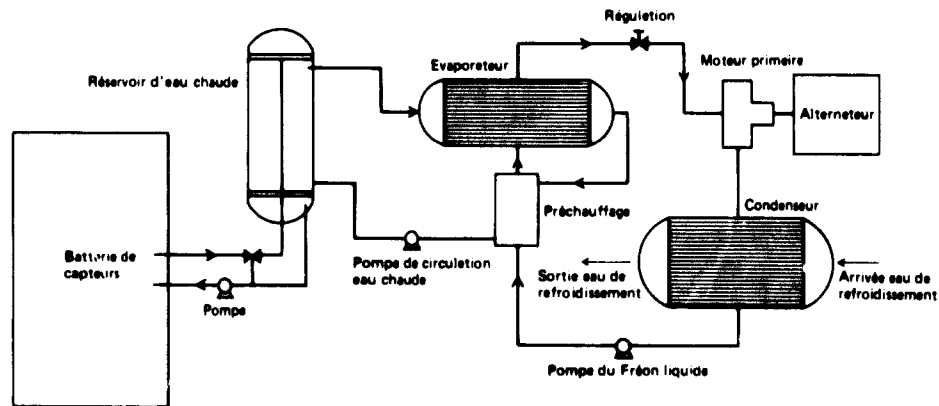


Figure 10. Schéma d'une centrale de 10 kW

Utilisation de l'énergie solaire dans le développement des zones arides : pompes à eau solaires

Jean Paul Durand, Max G. Clemot, J. Pierre Girardier et Marc Y. Vergnet

SOFRETES et Mengin, Montargis (France)

Conception d'une pompe solaire

Le premier objectif de SOFRETES, travaillant en coopération avec l'Université de Dakar (Sénégal), était de mettre au point du matériel de pompage de l'eau sans apport extérieur d'énergie, initialement pour l'hydraulique villageoise et pastorale, puis pour l'irrigation dans des zones arides. Comme le matériel devait être utilisé dans des sites isolés où il n'y a pas d'habitude de spécialistes capables d'assurer l'entretien d'un matériel complexe, il devait être simple, rustique et fiable. On a décidé que le premier pas consistait à utiliser un cycle thermodynamique à basse température entre une source chaude fournie par l'énergie solaire et une source froide fournie par l'eau pompée.

Une station solaire de pompage comprend les éléments suivants (voir figure 1) :

a) Une batterie de capteurs plans, dans lesquels de l'eau ou tout autre liquide caloporteur circule en circuit fermé;

b) Un échangeur de chaleur, dans lequel la chaleur est transférée du fluide circulant dans les capteurs au fluide circulant dans le circuit moteur, ce qui provoque la vaporisation de ce dernier fluide;

c) Le circuit moteur, qui outre l'échangeur de chaleur comprend la machine de détente, un condenseur et une pompe de réinjection;

d) Le circuit de pompage; pour des installations de l'ordre de 1 kW, il comprend une presse hydraulique actionnant une pompe immergée; pour

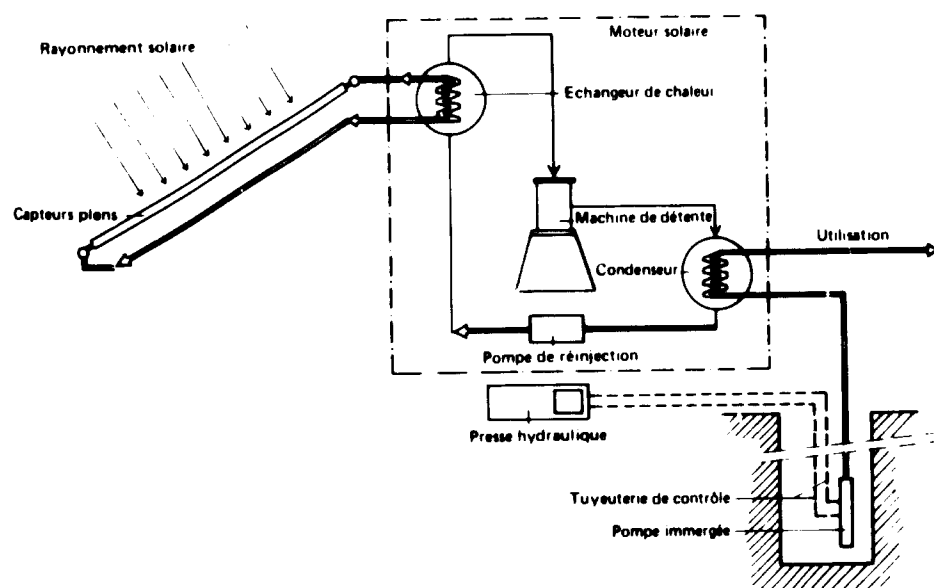


Figure 1. Schéma d'une station solaire de pompage

des puissances plus élevées (25-50 kW), il comprend un alternateur et un moteur électrique actionnant une ou plusieurs pompes.

Applications pratiques des pompes solaires

Hydraulique villageoise

L'alimentation en eau de villages isolés dans des zones arides est un besoin essentiel. Le pompage à la main consomme le temps et l'énergie des habitants. Le pompage avec des moteurs à combustion interne est soumis à toutes les incertitudes de l'approvisionnement en carburant et le matériel exige un certain entretien, rendu difficile par des conditions climatiques sévères ainsi que par le manque de main-d'œuvre qualifiée et de pièces détachées.

L'installation d'une station solaire de pompage dans un village est un moyen pratique d'assurer l'alimentation en eau. De plus, le montage des capteurs sur le toit d'un bâtiment rend l'intérieur de celui-ci frais, étant donné qu'un fort pourcentage de la chaleur reçue par les capteurs est évacué par le fluide. Un tel bâtiment peut être utilisé comme école, marché aux bestiaux, dispensaire, etc.

Hydraulique pastorale

Dans les pâturages, l'incertitude des puits signifie souvent que le cheptel doit dépendre d'un seul puits, souvent avec des résultats catastrophiques. La multiplication de petits points d'eau grâce à un matériel fiable actionné par l'énergie solaire permettrait d'alimenter rationnellement en eau des tribus nomades et leur cheptel.

Une quarantaine de stations de 1 kW sont maintenant à l'essai dans 12 pays : Brésil, Cameroun, Cap-Vert, Emirats arabes unis, Haute-Volta, Inde, Mali, Mauritanie, Mexique, Niger, Sénégal et Tchad.

Au Mexique, avec l'appui du gouvernement, des pompes hydrauliques solaires ont été installées dans des villages des diverses régions du pays. On a également installé une station de 30 kW pour fournir de l'eau potable et de l'eau d'irrigation. Ces pompes fonctionnent dans des conditions climatiques, économiques et sociales très diverses.

Caractéristiques d'une pompe solaire de 1 kW

Le matériel standard utilisé maintenant dans les pompes de 1 kW a les caractéristiques suivantes :

| Capteurs | |
|-----------------------|------------------------|
| Surface utile | 70 m ² |
| Surface totale | 100-120 m ² |
| Circulation du fluide | Thermosiphon ou pompe |

Circuit moteur

| | |
|-------------------------------------|--------------------------------|
| Echangeur de chaleur/ condenseur | Tubulaire ou à plaques |
| Fluide | Butane ou Fréon |
| Machine de détente | Deux cylindres: déplacement 12 |
| Vitesse de rotation | 200 tr/mn |

Circuit de pompage

| | |
|----------------|-------------------------|
| Pompe immergée | Avec presse hydraulique |
|----------------|-------------------------|

Conditions de fonctionnement

| | |
|---|----------------------|
| Insolation moyenne | 800 W/m ² |
| Température de l'air | 20 °C |
| Température de l'eau pompée | 20-30 °C |
| Fonctionnement quotidien | 5 à 7 heures |
| Production quotidienne, exhaure totale de 20 m | 30 m ³ |
| Nombre d'habitants, 20 litres par personne | 1 500 |
| Nombre d'animaux, 40 litres par tête | 750 |

Pompe solaire d'irrigation au Mexique

La première grande station solaire d'irrigation a été montée à San Luis de la Paz, dans l'Etat de Guanajuato (Mexique). Elle fait partie d'un vaste programme gouvernemental, exécuté par l'organisme responsable de l'environnement au Ministère de la santé. Cette station de 30 kW, qui fournit l'électricité nécessaire aux pompes, est en service depuis septembre 1975. San Luis de la Paz est situé dans la zone semi-aride du Mexique. La température moyenne y est d'environ 17 °C (62 °F), avec un maximum de 41 °C (106 °F) et un minimum d'environ 5 °C (23 °F). Dans une année normale, il y a 39 jours de pluie et 250 jours ensoleillés.

La station fonctionne selon le même principe que les pompes de 1 kW, sauf que la machine de détente est remplacée par une turbine qui actionne un alternateur. Ses caractéristiques générales sont les suivantes :

| | |
|--|----------------------------------|
| Surface des capteurs | 1 500 m ² |
| Fluide de travail | R11 |
| Vitesse de rotation de la turbine | 7 400 tr/mn |
| Pompe | Electrique, centrifuge |
| Débit de pompage pour une exhaure de 40 m | 150 m ³ /h en moyenne |

Cette station solaire fournit environ 900 m³ d'eau par jour. Elle est sans doute la plus puissante station solaire en service dans le monde. L'eau, pompée à 40 m, alimente 15 000 villageois et pourra éventuellement servir aussi à irriguer 20-30 ha de cultures expérimentales. Le bâtiment sous les 1 500 m² de capteurs solaires abritera diverses annexes d'une ferme expérimentale.

Développements futurs

En l'état actuel de la technologie solaire, l'utilisation de pompes solaires dans des zones arides écartées pose peu de problèmes. Toutefois, les

techniques et le matériel doivent être adaptés aux conditions locales individuelles. L'expérience de la SOFRETES est que les pompes solaires à cycle thermodynamique à basse température et capteurs plans se prêtent à cette adaptation.

On envisage notamment les travaux futurs suivants :

Amélioration du matériel existant dans les gammes de puissance de 1 kW et de 25-100 kW; recherches sur les capteurs, les échangeurs de chaleur, les moteurs et turbines, les fluides, etc.;

Utilisation de l'énergie géothermique dans la conversion thermodynamique à basse température;

Réfrigération solaire pour la conservation des aliments et des produits pharmaceutiques;

Climatisation solaire et chauffage solaire des locaux.

Aspects économiques

Dans le choix d'une source d'énergie, il faut analyser les avantages et les inconvénients de son utilisation et calculer chaque élément du coût total. De la sorte, on peut comparer une source d'énergie classique (par exemple, un moteur Diesel) et l'énergie solaire en fonction du volume d'eau qu'il faut pomper. La comparaison ci-dessous peut être utilisée pour une telle analyse. Toutefois, il ne faut pas perdre de vue le fait que le rendement d'une station solaire et sa compétitivité dépendent des conditions locales; une étude de ces conditions doit donc figurer dans l'analyse.

| Source d'énergie | Avantages | Inconvénients ou contraintes |
|------------------|--|--|
| Moteur Diesel | Faible investissement Grande souplesse dans l'installation et l'utilisation | Frais d'exploitation élevés Nécessité d'importer, transporter et stocker le combustible, les lubrifiants et les pièces détachées Consommation de ressources non renouvelables Pollution localisée (gaz d'échappement) Main-d'œuvre qualifiée Incertitude des prix du combustible et de la main-d'œuvre (50 % du coût) |

| Source d'énergie | Avantages | Inconvénients ou contraintes |
|------------------|--|--|
| Energie solaire | Frais d'exploitation minimales Obtention sur place Longue durée de vie du matériel (10 à 20 ans) Fiabilité Possibilité de transfert des techniques Pas de dégradation de ressources naturelles Pas de pollution Réfrigération possible sous les capteurs Pas de main-d'œuvre qualifiée Entretien minimum Frais d'exploitation connus | Investissement élevé Intermittence (nécessité d'un réservoir de stockage) Génie civil plus important |

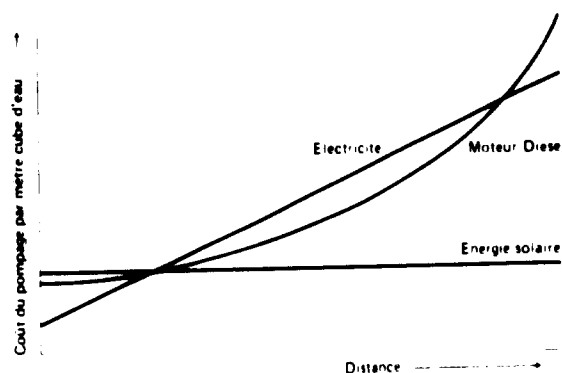


Figure 2. Coût de l'eau pompée en fonction de la distance jusqu'à la source

La figure 2 permet de comparer les coûts du pompage au moyen d'un moteur Diesel, de l'électricité et de l'énergie solaire. On peut voir que le facteur déterminant est la distance entre le lieu d'utilisation et le lieu d'approvisionnement en source d'énergie classique. Dans le cas du Sahel, on estime qu'une station solaire de 50 kW utilisée pour l'irrigation sera compétitive avec une station électrique si la centrale est à 100 km.

On a calculé que pour les pompes solaires déjà installées en Afrique, le coût de l'eau pompée est d'environ 0,60 dollar/m³ avec des stations de 1 kW (en supposant un temps de fonctionnement de 1 800 h/an et une exhaure de 30 m) et d'environ 0,05 dollar/m³ avec des stations de 25 kW (même temps de fonctionnement, exhaure de 10 m). Un calcul semblable pour une pompe à moteur Diesel faisant le même travail qu'une pompe solaire de 1 kW donne un coût d'environ 0,47 dollar/m³.

Conditions théoriques pour obtenir le maximum d'énergie du soleil

Kamal-Edin Hassan

Institut arabe du développement, Tripoli (Jamabiriya arabe libyenne)

Un moteur thermique solaire, comme tout autre moteur thermique, a des limites imposées par la deuxième loi de la thermodynamique. Son rendement maximum est le rendement de Carnot (η_c) :

$$\eta_c = 1 - (T_L/T_C)$$

où T_L et T_C représentent respectivement la température absolue ambiante et la température absolue du capteur.

L'énergie maximum \dot{W}'' qui peut être produite par unité de surface du capteur solaire est donnée par

$$\dot{W}'' = \eta_c \dot{Q}''$$

où l'énergie \dot{Q}'' fournie par unité de surface du capteur au moteur est la différence entre l'énergie I reçue par le capteur et l'énergie dissipée. Pour des températures du capteur relativement basses, les pertes par rayonnement et par convection peuvent être représentées par un seul coefficient de transfert de chaleur U ; les pertes par unité de surface sont alors égales à $U(T_C - T_L)$. On peut donc écrire

$$\dot{Q}'' = I - U(T_C - T_L) \quad (1)$$

et

$$\dot{W}'' = [1 - (T_L/T_C)] [I - U(T_C - T_L)] \quad (2)$$

Pour une valeur donnée de T_L , une valeur élevée de T_C améliorerait le rendement de Carnot, mais augmenterait également les pertes. Par conséquent, le travail maximum serait obtenu pour une température optimale du capteur, $T_{C,opt}$, à laquelle le gain de rendement équilibre la perte de chaleur. Cette condition optimale est obtenue lorsque $d\dot{W}''/dT_C = 0$, c'est-à-dire quand

$$T_{C,opt} = \sqrt{T_L(I + U T_L)/U}$$

ou

$$T_{C,opt}/T_L = \sqrt{(I/U T_L) + 1}$$

Si l'on considère la variable sans dimension M , telle que

$$M = U T_L/I \quad (3)$$

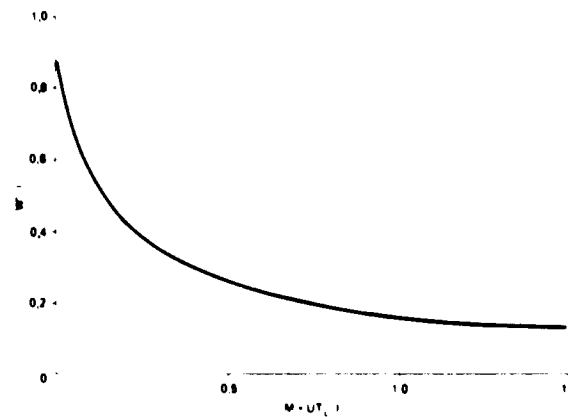
nous avons

$$T_{C,opt}/T_L = \sqrt{(M + 1)/M} \quad (4)$$

L'équation 4 donne la température de la source chaude pour laquelle un moteur thermique devrait être conçu afin de délivrer la puissance maximale possible dans les conditions initiales données par I , T_L et U .

La fraction maximale de l'énergie solaire qui peut être convertie en énergie mécanique est donnée par les équations (2) et (4) :

$$\begin{aligned} \dot{W}''_{max}/I &= 1 - (T_L/T_{C,opt}) [1 - (U/I)(T_{C,opt} - T_L)] \\ &= (1 - \sqrt{M/(M+1)}) (1 + M - \sqrt{M(M+1)}) \end{aligned} \quad (5)$$



Fraction maximale de l'énergie solaire incidente utilisable, en fonction du paramètre conceptuel M (représentation graphique de l'équation 5)

La figure ci-dessous donne une représentation graphique de l'équation (5). Pour $M = 0$, on voit que $\dot{W}''_{max}/I = 1$; cette condition n'est pas réalisable, car $M = 0$ implique que $U = 0$, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de perte de chaleur dans le capteur et que sa température tendrait vers l'infini, alors qu'elle ne peut

pas être plus élevée que la température du soleil lui-même (5 750 °K). En fait, l'analyse n'est pas valable pour les températures très élevées du capteur, lorsque les pertes seraient dues essentiellement au rayonnement et ne pourraient pas être exprimées dans la forme linéaire utilisée dans l'équation (1). Cependant, sauf au voisinage de $M = 0$, le graphique donne une bonne image de la réalité : une augmentation de M , qu'elle soit due à une augmentation de U ou à une diminution de I , diminue la fraction utile de I ; diminuer M , soit par une bonne isolation

afin de diminuer U , soit par la concentration du rayonnement solaire pour augmenter I , se traduit par une augmentation de la fraction maximale d'énergie incidente utilisable.

Si l'on considère des capteurs plans, il est difficile d'imaginer des conditions dans lesquelles M prendrait des valeurs inférieures à l'unité. Pour $M = 1$, l'énergie maximale qu'il est possible d'obtenir ne représente qu'environ 17% du rayonnement solaire incident. Cette limite semble proscrire l'utilisation de capteurs plans pour la production d'énergie.

Capteurs plans

A. A. M. Sayigh

Collège d'ingénierie, Riyad (Arabie saoudite)

De toutes les applications de l'énergie solaire, la plus pratique est l'utilisateur de capteurs plans dans le chauffage. La chaudière solaire à liquide a été inventée par H. B. de Saussure au cours de la deuxième moitié du dix-huitième siècle. Herschel (1837) et Tellier (1885) ont également fait des expériences avec des chaudières solaires à eau. Bien auparavant, les aborigènes de l'Afrique, des pays arabes, de l'Australie, de la Chine, de l'Inde et du Pakistan avaient fait preuve d'ingéniosité pour chauffer l'eau en hiver en exposant au soleil un pot en cuivre de forme particulière rempli d'eau. Cependant,

les appareils de chauffage de l'air sont une invention récente. K. W. Miller a présenté en 1943 l'appareil de chauffage de l'air à vitrage débordant. De nos jours, il est moins coûteux d'utiliser des chauffe-eau solaires dans les maisons et on en trouve maintenant dans le monde entier.

Depuis 1960, les capteurs plans ont fait l'objet de la plus grande partie des travaux de R-A. Le présent article met en relief les possibilités et les limitations de ces capteurs en vue de promouvoir leur utilisation appropriée, notamment dans les pays en développement.

TABLEAU I. PROPRIÉTÉS DE QUELQUES REVÊTEMENTS UTILISÉS DANS LES CAPTEURS PLANS

| Revêtement | Coefficient d'absorption | Coefficient d'émission (grandes longueurs d'ondes) ^a | Référence |
|--|--------------------------|---|--------------------------------|
| Peinture laquée noire | 0,83 | 0,83 | Sabbagh, J. A. <i>et al.</i> |
| Goudron | 0,86 | 0,86 | Sabbagh, J. A. <i>et al.</i> |
| Noir de fumée | 0,95 | 0,95 | Sabbagh, J. A. <i>et al.</i> |
| Noir de nickel (oxydes et sulfures de Ni et Zn) sur Ni poli | 0,91-0,94 | 0,11 | Tabor, H. <i>et al.</i> |
| Noir de nickel sur fer galvanisé (expérimental) | 0,89 | 0,12 | Tabor, H. <i>et al.</i> |
| Noir de nickel sur fer galvanisé (commercial) | | 0,16-0,18 | Tabor, H. <i>et al.</i> |
| Noir de nickel, deux couches sur Ni plaqué sur de l'acier doux (après 6 heures dans l'eau bouillante) | 0,94 | 0,07 | Schmidt, R. N. <i>et al.</i> |
| CuO sur Ni (par dépôt de Cu et oxydation ultérieure) | 0,81 | 0,17 | Kokoropoulos, P. <i>et al.</i> |
| Co ₃ O ₄ sur Ag (dépôt et oxydation) | 0,90 | 0,27 | Kokoropoulos, P. <i>et al.</i> |
| CuO sur Al (par vaporisation d'une solution diluée de Cu(NO ₃) ₂ sur feuille chaude de Al et cuisson) | 0,93 | 0,11 | Hottel, H. C. et Unger, T. A. |
| Noir de cuivre sur Cu (traitement commercial de Cu avec solution de NaOH et NaClO ₂) | 0,89 | 0,17 | Close, D. J. |
| Ebanol C sur Cu (noircissement commercial de Cu donnant des revêtements essentiellement de CuO) | 0,90 | 0,16 | Edwards, D. K. <i>et al.</i> |
| CuO sur Al anodisé (Al traité avec Cu(NO ₃) ₂ chaud et KMnO ₄ dilué et cuisson) | 0,85 | 0,11 | Tabor, H. |
| Al ₂ O ₃ - Mo-Al ₂ O ₃ - Mo-Al ₂ O ₃ en couches successives sur Mo | 0,91 | 0,085 ^b | Schmidt, R. W. <i>et al.</i> |
| Cristaux de PbS sur Al | 0,89 | 0,20 | Williams, D. A. <i>et al.</i> |

^a A des températures caractéristiques des capteurs plans.

^b Mesuré à 260 °C (500 °F).

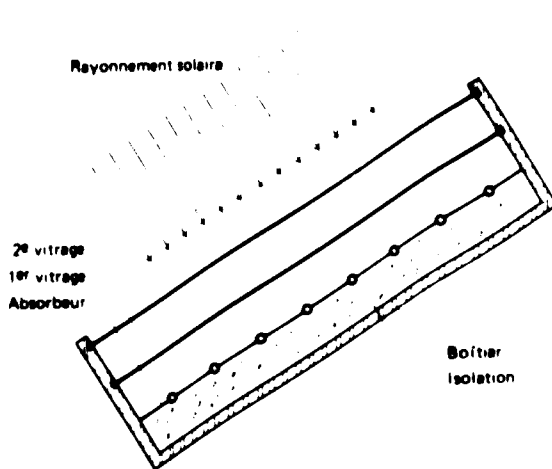


Figure 1. Coupe d'un capteur plan

Caractéristiques des éléments des capteurs plans

Un capteur plan comporte normalement un absorbeur en métal noirci (généralement du cuivre) et un réseau de tubes soudés sur l'absorbeur. Cet ensemble est placé dans un caisson, entre une isolation thermique et une ou deux épaisseurs de matière transparente permettant le passage du rayonnement solaire (voir figure 1).

Les absorbeurs sont généralement faits avec l'un des métaux suivants :

| Métal | Conductivité thermique à 100 °C ($W m^{-1} °C^{-1}$) |
|----------------|--|
| Cuivre | 393,56 |
| Aluminium | 217,71 |
| Laiton (60/40) | 121,42 |
| Acier | 66,99 |

Des notes sur divers revêtements et leurs fabricants figurent dans l'ouvrage de McDonald cité dans la bibliographie. Le tableau 1 donne les propriétés de divers revêtements utilisés dans les capteurs plans.

Les propriétés de matériaux communément utilisés pour l'isolation sont données dans le tableau 2. La figure 2 indique les caractéristiques optiques de trois types de verres utilisés pour la couverture transparente de capteurs. Il est évident que le type A est le meilleur.

La figure 3 montre les propriétés optiques d'une feuille de verre clair pour diverses longueurs d'onde. Des polymères synthétiques tels que PVF et des feuilles de fibres de verre ont été utilisés dans des appareils de chauffage solaire, mais ils sont en général inférieurs au verre parce qu'ils se détériorent avec le temps et aux hautes températures. De plus, ils sont décolorés par les rayons ultraviolets. Toutefois, les couvertures synthétiques sont plus faciles à manipuler que les vitrages.

L'analyse théorique d'un capteur plan est bien établie et peut être résumée par l'équation $Q_0 = Q_a - Q_L$, où Q_0 est l'énergie utile, Q_a est

TABLEAU 2. PROPRIÉTÉS DE MATÉRIAUX COMMUNÉMENT UTILISÉS POUR L'ISOLATION DANS LES CAPTEURS PLANS

| Matériau | Densité approximative ($kg m^{-3}$) | Conductivité thermique ($W m^{-1} °C^{-1}$) |
|--|---------------------------------------|---|
| Laine minérale (argile, verre, roche) | 12-14 | 0,0332-0,0404 |
| Feutre de poils | 80 | 0,0389 |
| Liège granulé | 120 | 0,0476 |
| Liège regranulé (particules de 0,474 cm) | 30 | 0,04471 |
| Liège comprimé | 136-176 | 0,0418-0,0462 |
| Paille | 10-13 | 0,0576 |
| Sciure de bois | 13-240 | 0,0649 |
| Vermiculite (granulée) | 128 | 0,0721 |
| Mousse de polyuréthane rigide | 24 | 0,0245 |
| Polystyrène expansé | 16 | 0,0303 |

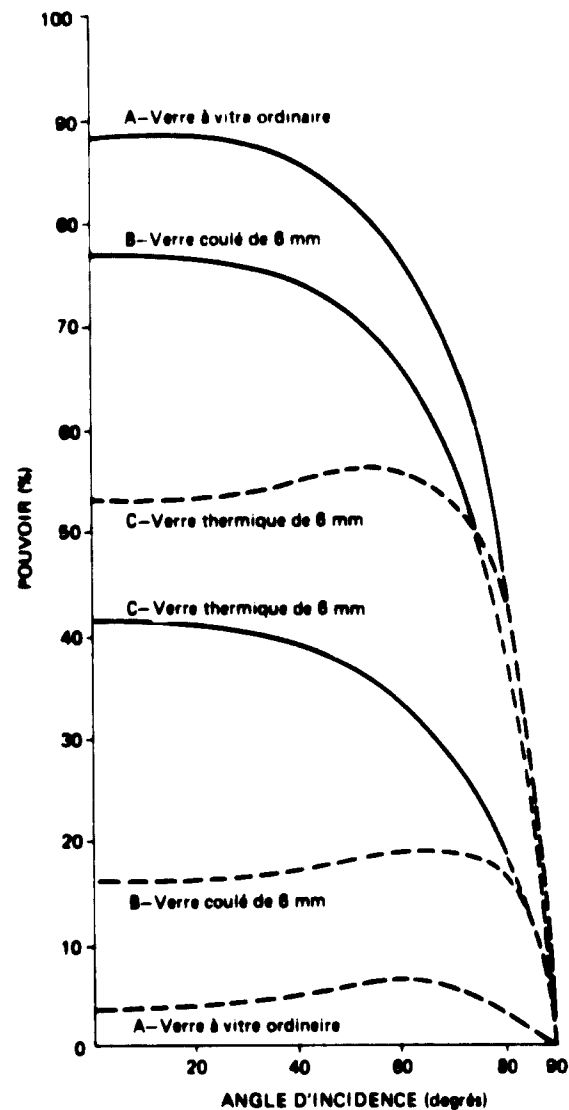


Figure 2. Caractéristiques optiques de verres courants. Courbes en continu : pouvoir de transmission; courbes en pointillé : pouvoir d'absorption

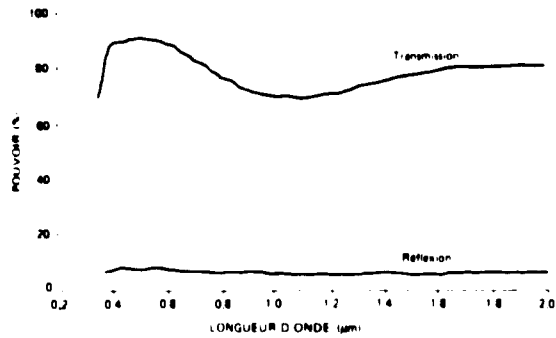


Figure 3. Pouvoir de transmission et de réflexion d'un verre étiré clair selon la longueur d'ondes. Il s'agit du verre DME INT 528, de 3.96 mm

l'énergie absorbée par le capteur et Q_L est l'énergie dissipée. La valeur de Q_a dépend largement des matériaux de construction du capteur, du revêtement et de l'angle d'incidence du rayonnement solaire. La figure 4 montre l'effet de l'angle d'incidence sur le pouvoir d'absorption de la surface.

Une analyse mathématique complète des pertes de chaleur par les faces et les côtés des capteurs a été donnée en 1942 par Hattel et Woerts. En 1973, Klein a également analysé les pertes de chaleur par la couverture des capteurs et indiqué des corrections pour l'angle à donner aux capteurs sur l'horizontale.

En considérant la distribution des températures dans l'absorbeur et le rendement du montage des tubes à ailettes, on peut déterminer Q_0 ainsi que le rendement du capteur. La figure 5 montre comment le rendement du capteur varie avec le gain de température normalisé, c'est-à-dire le gain de température du capteur par unité d'insolation pour différentes couvertures.

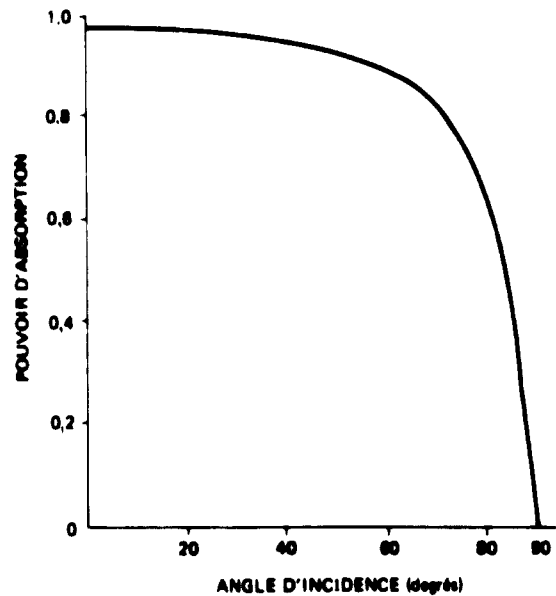


Figure 4. Effet de l'angle d'incidence sur le pouvoir d'absorption de la surface

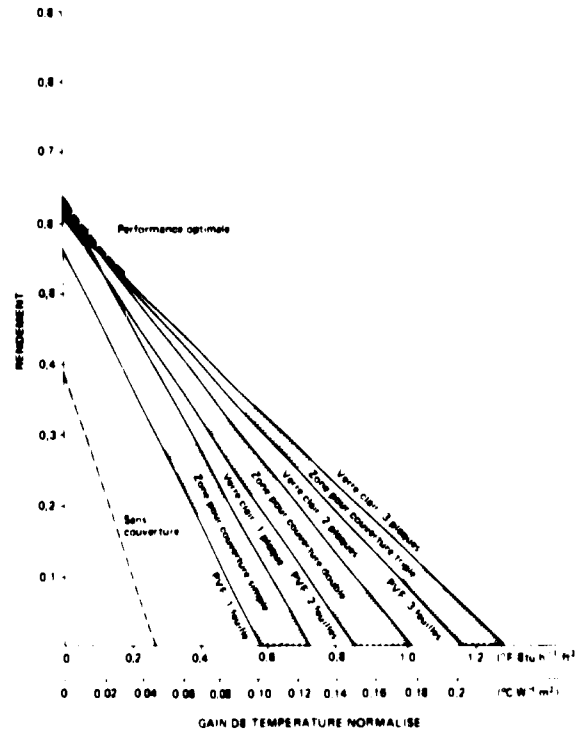


Figure 5. Rendement du capteur en fonction du type et du nombre de couvertures

A mesure que la température du capteur augmente, le rendement diminue parce que les pertes de chaleur dans le milieu augmentent. L'utilisation de plus d'une feuille de couverture améliore le rendement du capteur aux hautes températures, mais diminue la quantité de chaleur captée. En théorie, la performance optimale est représentée par la ligne en pointillé dans la figure 6; dans la pratique, il est

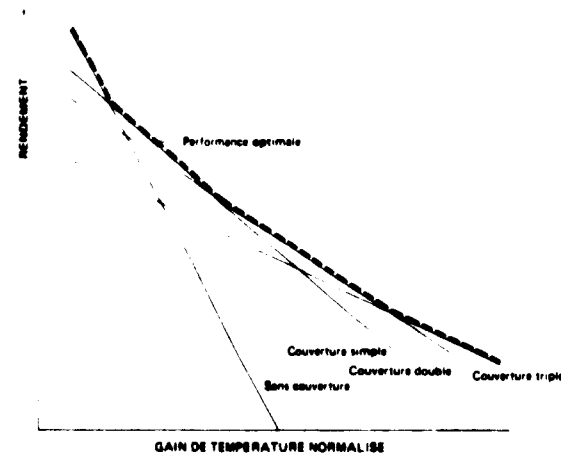


Figure 6. Rendement du capteur selon le nombre de couvertures

évidemment impossible d'obtenir une telle courbe, puisque le nombre de feuilles de couverture varie avec la température.

Optimisation et commentaires

La meilleure conception tiendra compte de l'espace d'air optimal entre l'absorbeur et la couverture transparente. Cette question a été étudiée par l'auteur, qui a trouvé que l'espace optimal est supérieur à 4 cm et, par suite de l'effet d'ombre dû aux côtés du capteur, inférieur à 8 cm. La figure 7 donne le coefficient conduction-convection, C_L , de cet espace en fonction de son épaisseur, L . Ce coefficient est en relation avec le nombre de Nusselt, Nu , qui a la valeur 1 pour une conduction parfaite et des valeurs plus élevées quand la convection est importante; on a la relation $C_L = NuK/L$, où K est la conductibilité thermique du fluide dans l'espace considéré.

La performance de l'absorbeur est donnée par la figure 8. La partie a) de la figure montre comment la température varie à travers l'absorbeur; la partie b) montre qu'à la partie médiane la température de l'eau est inférieure de près de 10°C à la température de l'absorbeur. Cette différence de température est du même ordre de grandeur tout au long de l'absorbeur, dans le sens de circulation de l'eau.

La plupart des capteurs plans fabriqués industriellement ont un rendement variant entre 50 et 67%. Les pertes de chaleur se répartissent comme suit :

| Pertes | Pourcentage |
|-------------|-------------|
| Côtés | 1-3 |
| Fond | 5-10 |
| Rayonnement | 5-7 |
| Convection | 22-30 |

On peut voir que pour améliorer le rendement du capteur, il faut réduire au minimum les pertes par convection. Pour qu'il n'y ait pas de pertes par convection, il faut que Nu soit égal à 1 et que le nombre de Rayleigh, Ra , soit inférieur à 1708 (voir

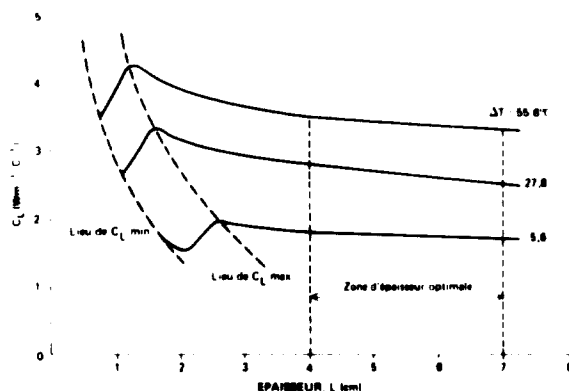


Figure 7. Coefficient conduction-convection, C_L , de l'espace d'air en fonction de son épaisseur, pour $T = 70^\circ\text{C}$ et une inclinaison de 40°

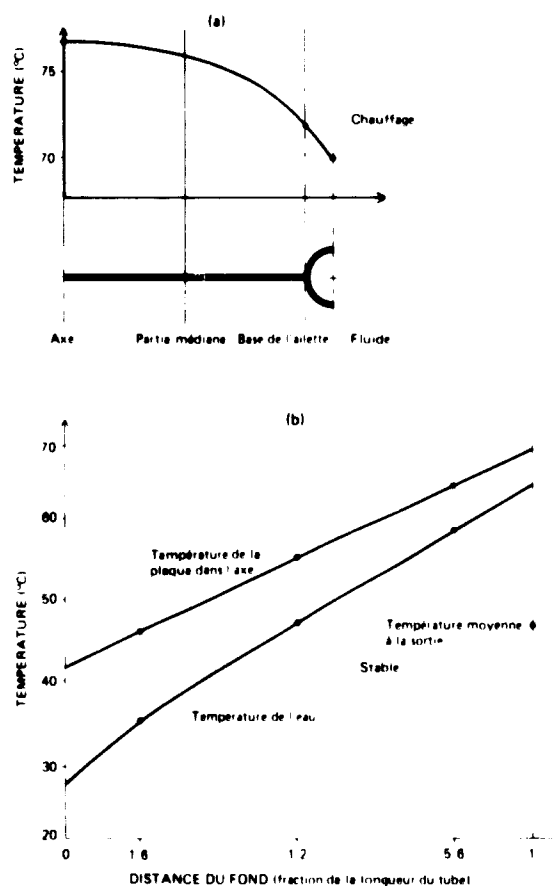


Figure 8. Distribution des températures dans l'absorbeur d'un capteur :

a) variation transversale dans la plaque;

b) variations (plaque et eau) dans le sens du courant de l'eau

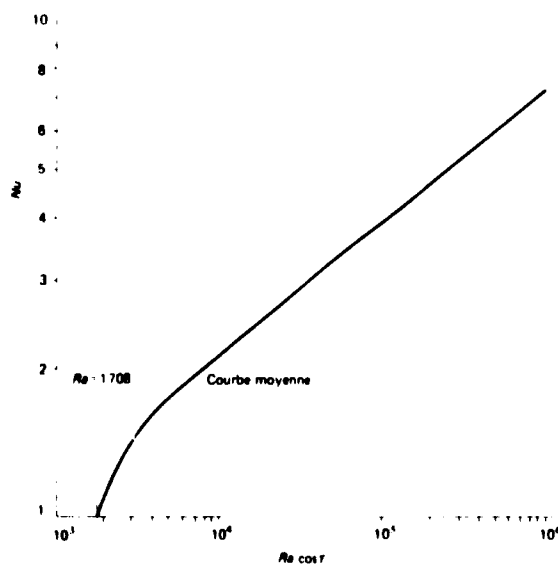


Figure 9. Courbe selon le nombre de Nusselt et le nombre de Rayleigh multiplié par le cosinus de l'angle d'inclinaison

figure 9). Il y a deux manières de réduire les pertes par convection. La première consiste à faire un vide (partiel ou total) dans le capteur. Un vide partiel n'est efficace qu'avec des surfaces sélectives; il n'est pas efficace dans des capteurs avec des surfaces peintes.

La seconde manière consiste à placer un matériau transparent en nid d'abeilles dans l'espace d'air. La figure 10 montre l'effet de ce genre de structure sur Ra. Le paramètre a dans la figure est égal à $\pi\sqrt{5(d/w)}$, où d et w sont respectivement la profondeur et l'épaisseur d'un alvéole du nid d'abeilles. Pour supprimer la convection, il faut choisir une structure en nid d'abeilles telle que le capteur fonctionne dans la région "stable" de la figure 10.

Un exemple de l'effet du gain de température sur le rendement du capteur est donné par la figure 11; la figure 12 montre comment la température du vitrage d'un capteur plan a varié pendant une courte période d'un jour donné.

Considérations pratiques

Il y a lieu de tenir compte des points ci-après dans la fabrication de capteurs plans.

a) On utilise souvent des adhésifs peu puissants entre le vitrage et les parois du capteur. En effet, il est préférable que la pression dans le capteur soit égale à la pression atmosphérique, afin de réduire les pertes par convection et par conduction de l'air. Ceci ne peut être réalisé que si le caisson n'est pas étanche à l'air. Cependant, il s'ensuit que les poussières et l'humidité pénètrent dans le capteur et provoquent une érosion de la surface de l'absorbeur;

b) Les matériaux d'isolation peuvent contenir une certaine humidité avant d'être placés dans le capteur. A mesure que celui-ci s'échauffe, l'humidité se vaporise et se condense sur la face interne du vitrage. Il s'ensuit une diminution du rayonnement incident capté, ainsi qu'une corrosion de l'absorbeur;

c) Il faut prévoir une marge pour la dilatation du verre et biseauter les arêtes des parois du capteur afin que l'eau de pluie ne s'y amasse pas;

d) Le capteur ne doit pas être utilisé sans un liquide dans l'absorbeur. Autrement, les hautes températures qui y sont créées provoqueraient une dilatation anormale du vitrage, qui se déformerait ou se briserait;

e) Pour pallier les problèmes que provoquerait le gel de l'eau dans la tuyauterie, on peut utiliser une solution aqueuse d'éthylène-glycol;

f) La surface maximale d'un capteur doit être 2 m^2 ;

g) Pour réduire la quantité de rayons infrarouges s'échappant du capteur, on peut utiliser un vitrage avec un revêtement spécial. Ce revêtement doit être appliqué sur la face interne du vitrage.

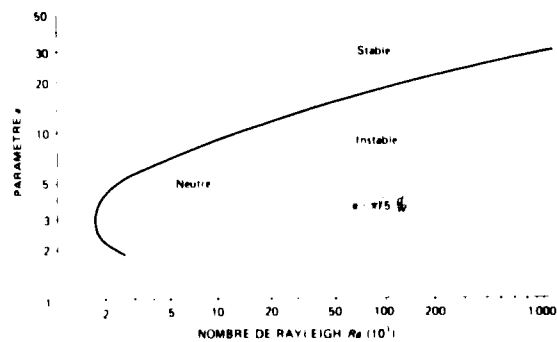


Figure 10. Stabilité $a-Ra$ pour des nids d'abeilles dans l'espace d'air dans un capteur

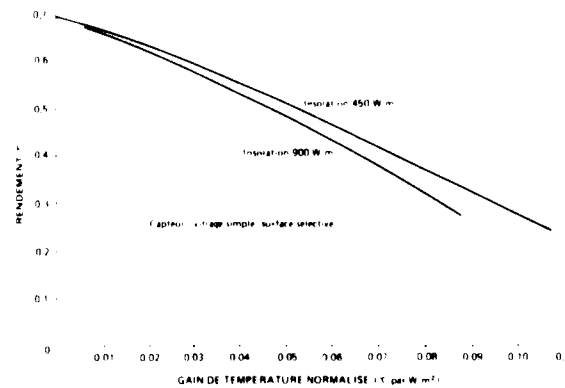


Figure 11. Rendement du capteur en fonction du gain de température et de l'insolation. Le gain de température est normalisé en divisant la différence entre la température moyenne du fluide et sa température d'admission par l'insolation moyenne

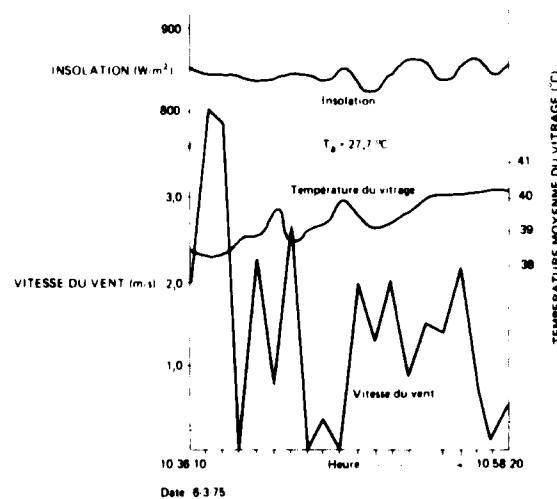


Figure 12. Variations de la température du vitrage d'un capteur pendant une courte période d'un jour donné. Variations de l'insolation et de la vitesse du vent pendant le même temps

BIBLIOGRAPHIE

- Ackerman. The utilization of solar energy. Annual report, Washington, D.C., Smithsonian Institution, 1915, p. 141 à 146.
- Basic studies on the use and control of solar energy. Par D. K. Edwards *et al.* University of California, Department of Engineering, octobre 1960 (Report 60-93).
- Chinnery, D. N. W. Solar water heating in South Africa, *NBRI information sheet* (Pretoria) 44.
- Close D. J. Flat plate solar absorbers : the production and testing of a selective surface for copper absorber plates. Melbourne, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, 1962 (Report E.D.7).
- Duffie, J. A. *et* W. A. Beckmann. Solar energy thermal processes, New York, Wiley Interscience, 1974.
- Further studies on selective black coatings. Par H. Tabor *et al.* Actes de la Conférence des Nations Unies sur les nouvelles sources d'énergie, Rome, 21-31 août 1961. *Energie solaire* : 1, v. 4, p. 618 (S/46).
Numéro de vente : 63.1.38.
- Hottel, H. C. *et* B. B. Woertz. The performance of flat plate solar heat collectors. *American Society of Mechanical Engineers. Quarterly transactions* (New York) 64:91-104, 1942.
- Hottel H. C. *et* T. A. Unger. The properties of a copper oxide-aluminium selective black surface absorber of solar energy. *Solar energy* (Elmsford, N.Y.) 3:10:3, 1959.
- Klein S. A. The effects of thermal capacitance upon the performance of flat-plate solar collectors, M.S. thesis, University of Wisconsin, 1973.
- Kokoropoulos, P. E. Salam *et* F. Daniels. Selective radiation coatings-preparation and high temperature stability. *Solar energy* (Elmsford, N.Y.) 3:19:4, 1959.
- Kondratyev, K. Ya. *et* M. P. Fedorova. Radiation regime of inclined surfaces. Communication présentée au Colloque sur l'énergie solaire, Genève, 30 août-3 septembre 1976.
- McDonald, Glen. Research highlights choice of coatings. *Solar engineering* (Dallas), 23 octobre 1976.
- Meinel, A. B. *et* M. P. Meinel. Applied solar energy : introduction. Londres, Addison-Wesley, 1976.
- Sabbagh, J. A., A. A. M. Sayigh *et* E. M. El-Salam. Solar water heaters in Saudi Arabia. Communication présentée à la septième Conférence scientifique arabe, Le Caire, 1973.
- Sayigh A. A. M. Investigation into solar heating with some methods for convection suppression. Paper prepared for Solar Cooling and Heating. A National forum, Miami Beach, Florida, 13-15 décembre 1976.
- . The uses of solar energy. Paper presented to the Cultural Activity Programme, College of Engineering, University of Riyadh, Saudi Arabia, 4 avril 1974.
- Sayigh A. A. M., ed. Solar energy engineering. Londres, Academic Press, 1977.
- Schmidt, R. N., K. C. Park *et* E. Janssen. High temperature solar absorber coatings. Honeywell Research Centre, septembre 1964. (Part two, technical report ML-TDR-64-250.)
- Tabor H. Selective surfaces for solar collectors. Low temperature engineering applications of solar energy. New York, American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, 1967.
- . Solar energy collector design with special reference to selective radiation. Research Council of Israel, 1955 (Bulletin 5C).
- . Stationary mirror systems for solar collectors. *Solar energy* (Elmsford, N.Y.) 2:3-4:27-33, 1958.
- Williams, D. A., T. A. Lappin *et* J. A. Duffie. Selective radiation properties of particulate coatings. *American Society of Mechanical Engineers. Quarterly transactions* (New York) 85A:213, 1963.
- Zarem, A. M. *et* D. D. Erway. Introduction to the utilization of solar energy. New York, McGraw-Hill, 1963.

Piscines à chauffage solaire

Gangolf Bräunlich

Institut d'écologie, Graz (Autriche)

Principes de base

Un projet visant à populariser l'énergie solaire devrait répondre à certaines conditions :

- a) Etre avantageux du point de vue économique;
- b) Profiter au plus grand nombre possible de personnes;
- c) Etre vu par un grand nombre de personnes.

Des projets concernant le chauffage solaire de piscines sont donc un excellent moyen de faire connaître la technologie solaire au grand public. Comparés aux nombreuses autres utilisations possibles de l'énergie solaire, de tels projets ont plusieurs avantages importants, notamment :

- a) Les températures de fonctionnement sont relativement basses;
- b) Un chauffage auxiliaire n'est pas nécessaire;
- c) Il n'y a pas de problème de stockage d'énergie thermique.

Capteurs

Couverture transparente

Le problème de la couverture transparente peut se ramener à deux questions : faut-il utiliser du verre ou des polymères synthétiques ? Faut-il une ou plusieurs épaisseurs ?

Les polymères synthétiques sont plus faciles à manipuler que le verre; ils sont légers, souples et résistants aux chocs thermiques. Cependant, ils sont sensibles à la surchauffe et aux propriétés optiques de la surface; ils sont inflammables et leur stabilité chimique à long terme n'est pas encore bien établie. Le type de couverture transparente dépendra donc des besoins de l'utilisateur et des conditions locales.

Comme la température de fonctionnement des capteurs solaires pour le chauffage d'une piscine doit être basse, on ne doit utiliser que des capteurs avec une seule couverture transparente. Dans les régions où la température de l'air ambiant tend à être la même

que la température de l'eau de la piscine, une couverture transparente n'est pas nécessaire. On ne devrait jamais en mettre deux, car les pertes par réflexion dues à la deuxième épaisseur seraient plus grandes que la réduction des pertes thermiques ainsi obtenue, étant entendu que la température de fonctionnement sera inférieure à 50 °C.

Pouvoir calorifique

La masse des capteurs entrave le gain d'énergie du fait des pertes d'énergie potentielle des capteurs après fonctionnement. Elle influence aussi la vitesse d'élévation de la température.

Il existe trois méthodes différentes pour éviter les pertes d'énergie potentielle :

- a) La masse thermique des capteurs peut être rendue voisine de zéro;
- b) Toute l'énergie des capteurs peut être transférée au mécanisme consommateur;
- c) La batterie de capteurs peut être conçue de telle sorte qu'il n'y ait pas de pertes thermiques pendant les périodes de non-fonctionnement.

La plupart des fabricants de matériel solaire n'envisagent que la première méthode. Cependant, dans tous les cas où les capteurs transfèrent l'énergie à un système fonctionnant à basse température (voisine de la température ambiante), l'énergie thermique de la batterie de capteurs est entièrement délivrée au mécanisme consommateur. Cette condition est satisfaite par les capteurs servant au chauffage d'une piscine. En pareil cas, il n'y a pas de pertes d'énergie potentielle après fonctionnement. La troisième méthode pour éviter ces pertes consiste à empêcher le refroidissement de la batterie de capteurs après fonctionnement. Ceci exige une bonne isolation thermique pendant les périodes de non-fonctionnement, ce qui est faisable mais trop coûteux.

Pour certaines applications, une augmentation rapide de la température des capteurs peut être nécessaire; mais un capteur "rapide" perd plus d'énergie qu'un capteur "lent" si le mécanisme de transport et d'échange de chaleur ne peut pas

supporter les pointes thermiques sans subir une augmentation de température inutile. Un capteur plan typique perd 1-2 % de son rendement pour chaque °C d'augmentation de la température. Un capteur "lent" évite ces pertes dans les systèmes où l'énergie thermique transportée par unité d'écart de température est faible. Pour le chauffage des piscines, des capteurs "rapides" donnent des pointes de température inutiles et exigent des pompes capables de supporter un continuels va-et-vient marche-arrêt.

Caractéristiques hydrauliques

Le principal objectif des ingénieurs est certainement d'assurer une faible consommation d'énergie par les pompes de circulation. Une batterie de capteurs bien conçue n'exige qu'environ 5 W/m² pour que l'eau y circule à une vitesse telle que l'élévation de la température dans les capteurs ne dépasse pas 8 °C. La consommation d'un tel mécanisme pendant l'été est d'environ 1 % du gain d'énergie net. Cependant, il existe des batteries de capteurs qui utilisent plus de 10 % du gain d'énergie pour actionner les pompes de circulation; ceci réduit la quantité d'électricité qui peut être produite par la batterie de capteurs.

Régulation de la pompe

La pompe de circulation dans les capteurs doit avoir une régulation électronique qui la met en route lorsque la température de l'eau de la piscine est supérieure à la température des capteurs. Plus important que l'écart de température auquel la pompe est mise en route est l'écart de température auquel la pompe est arrêtée. La température des capteurs augmente en même temps que le transfert de chaleur dans les échangeurs de chaleur. Ainsi, il y a un écart de température minimal entre l'eau dans les capteurs et l'eau de la piscine auquel la pompe de circulation doit être mise en route afin que la chaleur transférée à l'eau de la piscine corresponde au gain d'énergie pour une faible insolation. Pour une piscine bien conçue, cet écart de température est de l'ordre de 0,5-1,5 °C. Selon la masse thermique de la batterie de capteurs, il faut que la mise en route de la pompe de circulation intervienne pour un écart de température compris entre 2 et 6 °C; sinon, on aurait un perpétuel va-et-vient marche-arrêt.

Echangeur de chaleur

Pour des capteurs fonctionnant à haute température, de petits échangeurs de chaleur peuvent être suffisants. Cependant, une température élevée des capteurs réduit leur rendement et il faut alors installer

un plus grand nombre de capteurs. Compte tenu des coûts relatifs des capteurs et des échangeurs de chaleur, on peut trouver la dimension optimale de l'échangeur de chaleur. Si l'on considère les prix actuels en Autriche, un échangeur de chaleur économiquement viable devrait délivrer 50 W °C par m² de capteur.

Réglage de la température de la piscine

La meilleure manière de prévenir une surchauffe de l'eau de la piscine est évidemment d'y introduire de l'eau fraîche. Si ceci n'est pas possible, il existe une autre manière: si l'on réduit le transport de la chaleur, soit dans le circuit des capteurs, soit dans le circuit de la piscine elle-même, il s'ensuit une température plus élevée des capteurs et leur rendement diminue. Comme la tuyauterie des capteurs pour une piscine en plein air n'exige pas d'isolation thermique, le gain d'énergie par les capteurs peut être réduit à zéro dans la tuyauterie, sans risque de surchauffe.

Conclusions

Si l'on veut utiliser l'énergie solaire pour le chauffage des locaux en Autriche avec une efficacité raisonnable dans le proche avenir, il faut combiner les capteurs avec des pompes de chaleur. Les conditions de fonctionnement pour alimenter une pompe de chaleur avec des capteurs solaires sont les mêmes que pour le chauffage d'une piscine.

C'est uniquement lorsque la conception n'est pas optimale que le rendement est moins bon que dans le chauffage de piscines. Le rapport entre le coût et l'insolation possible est très défavorable dans le cas du chauffage des locaux; par conséquent, l'amélioration de cette technique constituera un pas important dans le développement de l'utilisation de l'énergie solaire.

Expérience pratique

L'Institut d'écologie a conçu et construit plusieurs piscines à chauffage solaire et a fourni des consultants pour divers autres projets. Il s'est occupé avant tout de la conception et de la construction de la plus grande batterie de capteurs en Autriche: la piscine en plein air à chauffage solaire d' Eggersdorf.

Il a fallu environ un an pour concevoir cette piscine. Il a fallu calculer divers facteurs, notamment la conversion d'énergie. L'expérience pratique a été fort utile. Les travaux de construction ont commencé pendant la première semaine de mai 1976; il s'agissait essentiellement de construire un nouveau hall et de refaire la toiture. Le toit initial à double pente a été

remplacé par un toit à pente unique et on a posé des plaques ondulées en amiante-ciment. Pendant les travaux, la piscine a continué de fonctionner normalement. L'inauguration officielle du chauffage solaire a eu lieu le 10 juillet 1976. L'emploi de main-d'œuvre uniquement locale a contribué à la rapidité des travaux.

Voici les données essentielles pour la piscine d' Eggersdorf :

| | |
|-----------------------|-----------------------|
| Surface de la piscine | 300 m ² |
| Volume d'eau maximal | 1 300 m ³ |
| Volume couvert | 15 000 m ³ |
| Capacité | 1 500 personnes |

La piscine est chauffée par trois batteries distinctes, comprenant au total 360 capteurs, ayant chacun une surface absorbante de 1,55 m², soit une

surface totale nette de 558 m². Le gain maximal d'énergie thermique est de l'ordre de 450 kW.

Chacun des trois ensembles comprend les éléments suivants : pompe de circulation (1,1 kW), vanne antiretour, vase d'expansion, soupape de sûreté, échangeur de chaleur, thermostat différentiel.

Le temps a été ensoleillé pendant les quelques jours suivant l'inauguration de la piscine. La température de l'eau a atteint un record de 27 °C. Pendant la période de mauvais temps qui a suivi, la température a oscillé entre 22 °C et 24 °C. La fréquentation de la piscine a été comparable à celle des autres piscines. Elle n'a diminué qu'avec la baisse de la température de l'air ambiant. Après l'installation du système de chauffage solaire, la température de l'eau a toujours été maintenue au-dessus de la température de l'air.

Un équipement solaire pour serres

M. Posnansky

Polisolar Ltd., Berne (Suisse)

Les serres ont pour objet de fournir aux plantes la lumière et la chaleur requises pour une croissance optimale tout au long de l'année. Les serres consomment beaucoup d'énergie thermique, mais le soleil leur en fournit directement une portion importante. L'effet par lequel l'équilibre thermique est maintenu dans les serres est bien connu sous le nom d'effet de serre (voir figure 1).

Pour la plupart des plantes, un ombrage est nécessaire pendant les mois d'été. Auparavant, presque toutes les serres étaient ombragées en permanence pendant l'été. Ceci est encore vrai aujourd'hui dans une certaine mesure, mais l'idée d'un ombrage mobile ou variable a rencontré une acceptation croissante. La possibilité de créer des zones d'ombre est devenue un moyen pratique pour le jardinier de contrôler l'atmosphère de la serre, notamment sa température.

L'installation décrite dans cet article capte et élimine la chaleur, en maintenant une certaine fraîcheur dans la zone de croissance des plantes. Elle ombrage les plantes, chauffe la serre pendant les périodes froides et assure son isolation thermique pendant la nuit.

Le cœur de l'installation est une batterie de capteurs solaires à effet de concentration, disposés en

parallèle et en série, à 2,20-2,80 m au-dessus du sol et à la hauteur des parois latérales de la serre. Les capteurs sont du type cylindro-parabolique; contrairement aux capteurs classiques du même type, ils sont conçus pour réfléchir la lumière sur leurs deux faces. Un dispositif spécial oriente automatiquement les capteurs vers le soleil grâce à un moteur électrique (voir figure 2).

La tuyauterie de l'absorbeur extrait une certaine quantité d'énergie thermique, contribuant ainsi à maintenir la température dans la serre à un niveau plus faible que dans les serres avec ombrage classique. Du fait que les deux faces des capteurs sont réfléchissantes, une grande partie du rayonnement indirect peut être dirigée à l'intérieur de la serre pendant presque toute la journée.

La figure 3 montre la position des réflecteurs pour capter le rayonnement diffus pendant les périodes de mauvais temps. En outre, lorsqu'un certain angle d'irradiation est atteint, les réflecteurs sont mis dans cette position verticale par le dispositif de commande électrique. Dans cette position, la lumière pénètre pratiquement sans obstacle dans la serre.

La figure 4 montre la position de nuit. Au crépuscule, les réflecteurs sont mis automatiquement

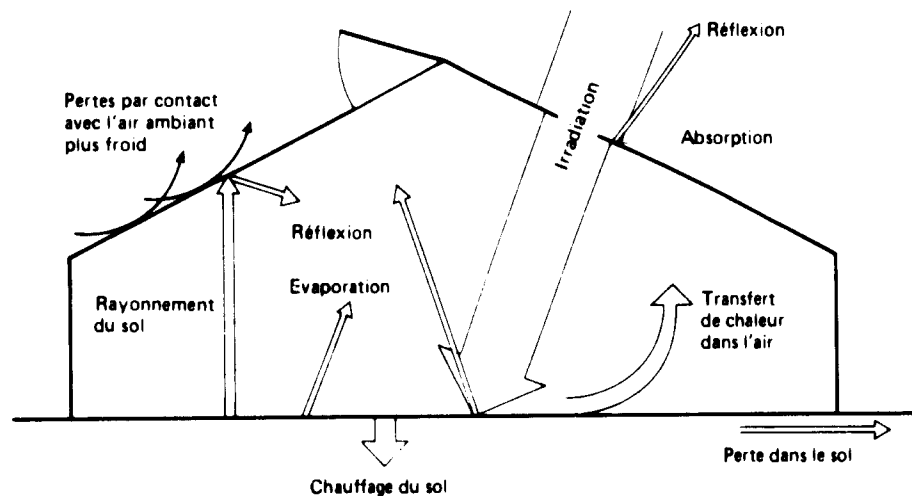


Figure 1. L'effet de serre

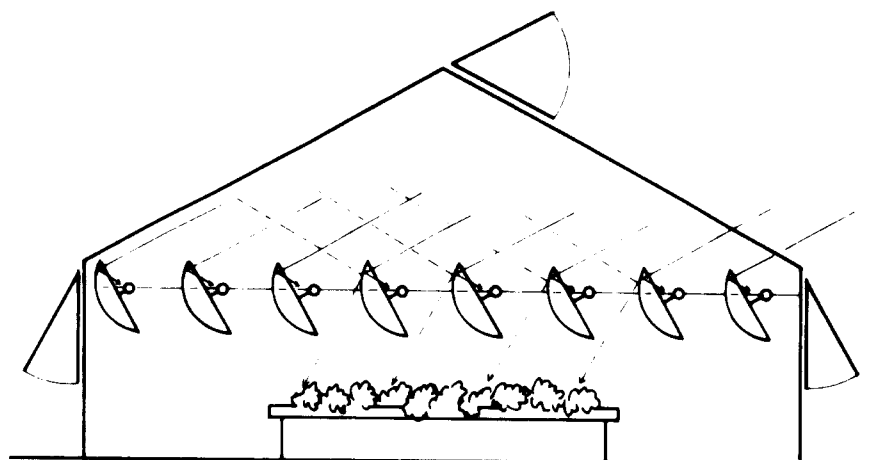


Figure 2. Serre avec capteurs solaires à effet de concentration

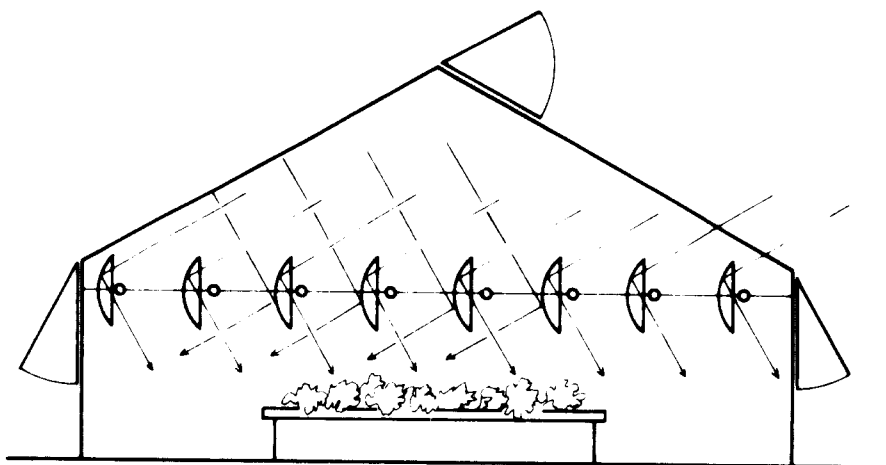


Figure 3. Position pour le captage du rayonnement diffus

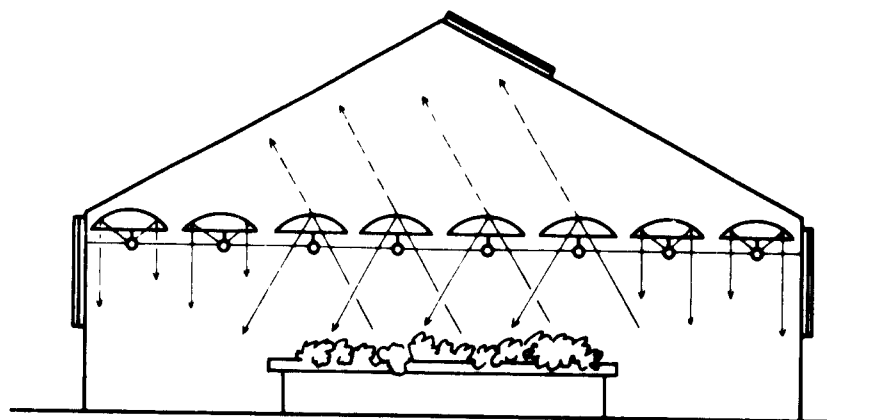


Figure 4. Position de nuit

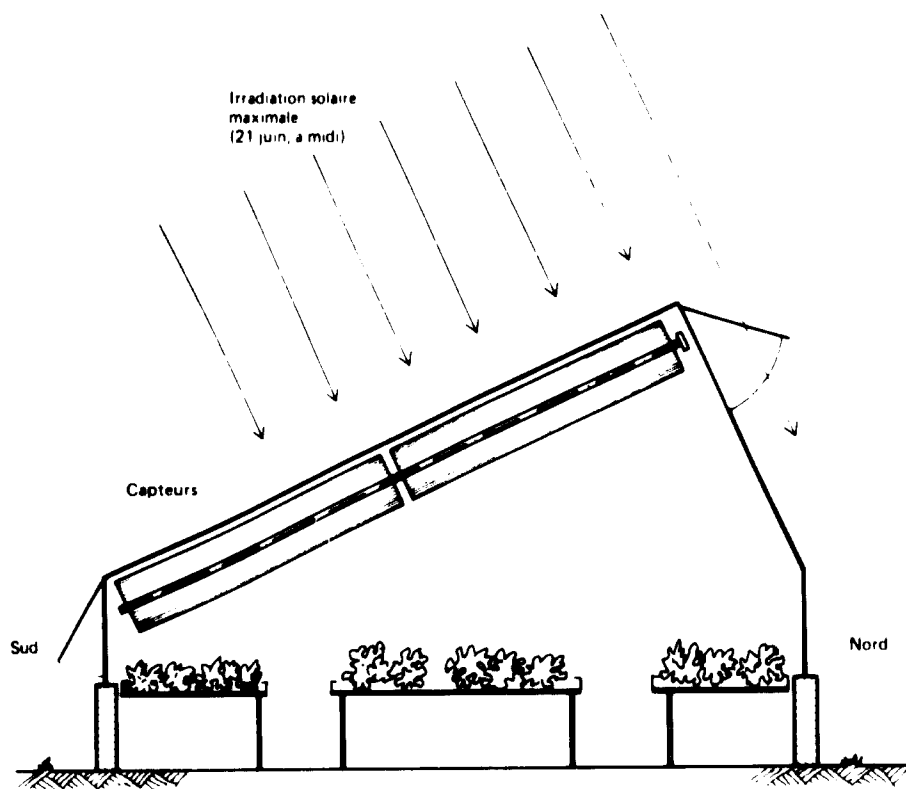


Figure 5. Serre pour l'exploitation de l'énergie solaire

en position horizontale au-dessus de la tuyauterie de l'absorbeur, grâce à un détecteur qui provoque, par l'intermédiaire du dispositif électronique de commande, la mise en route du moteur qui actionne les réflecteurs. En position de nuit, les réflecteurs empêchent le rayonnement vers l'extérieur. La chaleur émanant des plantes est réfléchiée sur les capteurs et demeure à l'intérieur de la serre.

Un réservoir classique (bassin ou ballon) peut être utilisé pour emmagasiner l'énergie thermique excédentaire. Quand la serre a besoin d'un apport de chaleur, une pompe de circulation fait passer l'eau chaude du réservoir dans la tuyauterie de l'absorbeur, qui fournit alors l'énergie supplémentaire nécessaire aux plantes grâce aux réflecteurs.

Il convient de faire quelques observations pour le choix de la batterie de capteurs. Si elle était montée en permanence ou temporairement sur le toit, la perte de lumière serait si importante avec les capteurs en position verticale qu'il n'y aurait pas suffisamment de lumière à l'intérieur de la serre pour une croissance optimale des plantes. C'est pourquoi on a rendu également réfléchissante la face externe des réflecteurs.

Beaucoup de maisons et d'écoles, d'hôpitaux et d'autres institutions publiques ont leur jardin, pour leur propre consommation ou à des fins éducatives. Il leur faut aussi des quantités relativement importantes d'énergie thermique pour le chauffage de l'eau, même pendant les mois d'été. La solution optimale serait une serre avec chauffage solaire.

Un modèle spécial de serre a été conçu à cette fin (voir figure 5). Comparé aux serres classiques, le côté sud du toit a une surface plus importante, le côté nord ayant une pente plus accentuée. Cette pente est de 65° , de sorte qu'aucun rayonnement solaire direct ne peut pénétrer dans la serre par le côté nord du toit, même à midi. Les capteurs sont disposés parallèlement au côté sud du toit. L'énergie récupérée est d'environ 30 % pour l'ensemble de l'année. Dans les cas où l'énergie récupérée peut être pleinement utilisée en été, ceci représente un avantage très intéressant. Ce modèle de serre remplit son rôle pour la croissance des plantes tout aussi bien qu'une serre classique. La surface de refroidissement n'est pas plus importante et un ombrage idéal est assuré. Les possibilités de ventilation ne sont pas restreintes et les capteurs peuvent être également utilisés à des fins de chauffage.

Fours solaires de séchage du bois : leur intérêt pour les pays en développement

R.A. Plumptre

*Institut forestier du Commonwealth, Oxford (Royaume-Uni de Grande-Bretagne
et d'Irlande du Nord)*

A moins que les fours solaires ne puissent concurrencer ou compléter les méthodes classiques de séchage du bois, le séchage solaire ne sera jamais utilisé commercialement et il restera ce qu'il a été jusqu'à présent : un intéressant exercice de recherche. Toute discussion du séchage solaire doit donc commencer par une description des principales méthodes classiques.

Méthodes classiques

Les méthodes classiques décrites ci-après peuvent toutes entrer en compétition avec les fours solaires, à l'exception de la dernière qui est très coûteuse.

Séchage à l'air en piles

Le bois est empilé sur des supports dans un chantier en plein air, avec ou sans une couverture imperméable à l'eau et aux rayons solaires. Le séchage est assuré par circulation de l'air à travers les piles; l'air entraîne l'humidité superficielle du bois. On ne peut pas régler la température, l'humidité ou le débit d'air autrement que par une orientation et un espacement convenables des piles et de bonnes méthodes d'empilement. Le séchage à l'air, qui est une méthode très répandue, est apparemment peu coûteux et simple à effectuer, mais le coût du maintien de stocks de bois pendant de longues périodes et celui de l'entretien des chantiers peuvent être importants.

Séchage à l'air sous abri

Le bois est placé dans un chantier couvert. La protection contre la pluie et le soleil est normalement meilleure qu'avec les piles en plein air, mais il est difficile de concevoir des abris permettant une

circulation de l'air aussi bonne que celle que l'on peut obtenir avec une bonne disposition des piles. Le coût est plus élevé qu'avec les piles en plein air, étant donné les frais de construction des abris.

Séchage à l'air en convection forcée

L'air est envoyé à travers une pile de bois, normalement sous abri, par un ou plusieurs ventilateurs installés d'un côté de la pile. Il n'y a pas de chauffage additionnel. Aux frais afférents aux méthodes précédentes, il faut ajouter le coût des ventilateurs et celui de l'énergie nécessaire pour les actionner. Les ventilateurs doivent normalement être de grande dimension pour assurer un courant d'air uniforme à travers la pile.

Préséchoirs

Les préséchoirs sont semblables aux fours classiques, mais leurs systèmes de chauffage, de ventilation et de réglage sont moins compliqués. Ils sont plus grands que les fours normaux; ils ont été largement utilisés dans les climats froids pour sécher de grandes quantités de bois jusqu'à ce que l'humidité tombe à 20 %, après quoi le séchage est terminé dans des fours classiques.

Fours classiques

Les fours classiques revêtent des formes très variées et plus ou moins complexes, mais la température, l'humidité et la ventilation sont toujours réglées de manière que les conditions de séchage soient optimales pour une essence donnée. Pour utiliser les fours de façon rationnelle, il faut répartir les pièces de bois par essence avant le séchage, et chaque essence doit être séchée selon un programme qui lui est propre.

Déshumidificateurs

Les déshumidificateurs sont des fours dans lesquels on n'utilise aucune chaleur extérieure; au contraire, l'air humide du four est réfrigéré, ce qui provoque la condensation de l'eau. On laisse ensuite l'air desséché revenir à la température normale, puis on le renvoie dans le four ou on le libère. Cette méthode a été couronnée de succès dans le séchage de petites quantités de bois sous des climats chauds, mais elle a un inconvénient: aucune chaleur n'étant normalement appliquée au bois, la vitesse de séchage interne du bois est lente.

Séchage par ondes radioélectriques

Le bois peut être séché par chauffage interne au moyen d'ondes radioélectriques. Toutefois, cette méthode est coûteuse et ne peut pas être utilisée pour de grandes quantités de bois.

Aperçu des recherches sur les fours solaires

Le tableau ci-après contient des données sur des fours solaires expérimentaux. La recherche sur le séchage solaire semble avoir commencé presque en même temps en Inde et aux Etats-Unis d'Amérique.

DONNÉES SUR DES FOURS SOLAIRES
EXPERIMENTAUX

| Emplacement | Capacité | Conception |
|--------------------------|---|---|
| Dehra Dun (Inde) | Neuf petits fours, échelle du laboratoire | Divers modèles, chambres séparées pour le chauffage de l'air et le chauffage du bois, convection de l'air |
| Colorado (Etats-Unis) | ... | Toit face au sud, synthétique en double épaisseur, ventilateurs éoliens |
| Wisconsin (Etats-Unis) | 425 bd ft (1 m ³) | Toit face au sud, synthétique en double épaisseur, un seul ventilateur |
| Rio Piedras (Porto Rico) | 2 000 bd ft (4,7 m ³) | Toit face au sud, synthétique en double épaisseur, quatre ventilateurs de 16 in. (40 cm) |
| Rio Piedras (Porto Rico) | 3 060 bd ft (7,1 m ³) | Toit face au sud, synthétique en double épaisseur, quatre ventilateurs de 16 in. (40 cm), toit vitré |
| Philippines | 480 bd ft (1,1 m ³) | Orientation nord-sud, synthétique en simple épaisseur, un ventilateur de 24 in. (61 cm) |

| Emplacement | Capacité | Conception |
|-------------------------------------|------------------------------------|---|
| Ouganda | 1 400 bd ft (3,3 m ³) | Orientation nord-sud, synthétique en double épaisseur, deux ventilateurs de 18 in. (46 cm), réflecteurs |
| Fort Collins, Colorado (Etats-Unis) | 1 200 bd ft (2,8 m ³) | Toit face au sud, couverture en polyester armuré en fibres de verre, deux ventilateurs de 24 in. (61 cm) |
| Philippines | 480 bd ft (1,1 m ³) | Toit face au sud, couverture en polyester armuré en fibres de verre, ventilateurs de 24 in. (61 cm) |
| Kumasi (Ghana) | 1 700 bd ft (4 m ³) | Serre convertie, un seul ventilateur |
| Tananarive (Madagascar) | 1 200 bd ft (4 m ³) | Orientation nord-sud, couverture en fibres de verre translucide, deux ventilateurs |
| Moshi (République-Unie de Tanzanie) | 4 000 bd ft (6 m ³) | Orientation nord-sud, toit plat vitré, parois en polythène, trois ventilateurs |
| Ouganda | 4 000 bd ft (9,4 m ³) | Orientation nord-sud, toit incliné, couverture en polyester (deux épaisseurs), quatre ventilateurs de 20 in. (51 cm), réflecteurs |
| Ouganda | 8 000 bd ft (18,9 m ³) | Orientation nord-sud, toit incliné, six ventilateurs de 20 in. (51 cm), couverture en PVF spécial (deux épaisseurs) |

Dehra Dun (Inde)

Rahman et Chawla¹ ont travaillé à l'échelle du laboratoire et ont essayé neuf modèles de fours miniatures. Dans le premier, une petite pompe envoyait de l'air à travers le bois empilé dans une chambre. Une autre chambre était utilisée pour chauffer l'air; elle était reliée par une canalisation à la chambre contenant le bois. Dans les autres fours, l'air circulait à travers le bois par convection; dans certains de ces fours, la chambre de chauffe était située au-dessous de la chambre contenant le bois; dans d'autres, il y avait une cheminée. Ces fours ont permis de petits gains de temps par rapport au séchage à l'air normal, mais tous les modèles avaient le même inconvénient: impossibilité de remettre l'air chaud en circulation; cet air était donc perdu après un seul passage à travers le bois. Malheureusement, il semble que les recherches n'aient pas été poursuivies; pour autant qu'on le sache, aucun autre résultat n'a été publié.

¹ M. A. Rahman et O. P. Chawla, "Seasoning of timber using solar energy", *Indian Forest Bulletin*, n° 229 (1961).

Wisconsin (Etats-Unis)

Au Laboratoire de recherche sur les produits forestiers de Madison (Wisconsin), Peck² a conçu un petit four semblable à un four classique, mais ayant un toit incliné face au sud et recouvert d'une double épaisseur de polyester spécial pour capter le rayonnement solaire à l'intérieur du four. Une tôle ondulée en aluminium noir a été placée au haut du four, à 15 cm au-dessous de la deuxième épaisseur de polyester, en vue d'absorber la chaleur; un ventilateur assurait un courant d'air sur les deux faces de la feuille d'aluminium. Des événements permettaient l'entrée et la sortie de quantités limitées d'air. Les vitesses de séchage ont été beaucoup plus rapides qu'avec le séchage à l'air: environ 60 % du temps pour le passage de bois vert à l'état séché à l'air. Les défauts de séchage ont été moindres qu'avec le séchage à l'air. Les coûts étaient à peu près les mêmes qu'avec le séchage à l'air, mais ils étaient la moitié des coûts de séchage en four. Toutefois, il s'agissait d'un petit four qui ne pouvait contenir que 1 m³ de bois.

Colorado (Etats-Unis)

Johnson³ a construit un petit four dans le Colorado pour sécher du bois à son propre usage. Le four consistait en une chambre dans laquelle des planches de bois étaient empilées sur des claies; la chaleur solaire était captée par des fenêtres absorbantes sur la face sud du four. Une circulation d'air était assurée par des ventilateurs éoliens. Le four séchait des planches de 1 in. (25 mm) en deux à six semaines selon les conditions météorologiques.

Rio Piedras (Porto-Rico)

En 1962, Peck et Maldonado ont publié un article⁴ décrivant un four construit à Rio Piedras (Porto-Rico) pour sécher 4-5 m³ de bois. Ce four était pratiquement identique au four construit par Peck dans le Wisconsin, sauf qu'il était plus grand et qu'il avait quatre ventilateurs de 16 in. (40 cm) actionnés par un moteur électrique de 1,5 hp (1,1 kW).

En 1966, Chudnoff, Maldonado et Goytia ont publié une description détaillée du fonctionnement d'une version agrandie du four construit par Peck et Maldonado à Rio Piedras⁵. Cette description

² E. C. Peck, "Drying 4/4 red oak by solar heat", *Forest Products Research Journal*, vol. 12, n° 3 (1962), p. 103-107.

³ C. L. Johnson, "Wind powered solar heated lumber dryer", *Southern Lumberman*, vol. 203, n° 25 (1961).

⁴ E. C. Peck and F. C. Maldonado, "Drying by solar radiation", *Forest Products Research Journal*, vol. 12, n° 10 (1962), p. 487-488.

⁵ M. Chudnoff, F. C. Maldonado et E. Goytia, United States Forest Service Research and Paper No. ITF-2 (Puerto Rico, Institute of Tropical Forestry, 1966).

constitue l'une des principales contributions à la documentation sur les fours solaires. Le four avait été allongé pour porter sa capacité à 7,1 m³ et la feuille de PVF de 1 mil à l'intérieur du four avait dû être remplacée par des feuilles de 2 mils après un an d'utilisation. Les feuilles de PVF de 2 mils sur le toit avaient dû être remplacées par un vitrage après deux ans; leur détérioration a été attribuée essentiellement à la flexion, mais on a observé des fendillements dus aux rayons ultraviolets. On a fait par la suite des essais avec des feuilles de PVF de 4 mils et des feuilles de polyester spécial de 5 mils.

On a comparé les vitesses de séchage à l'air et de séchage solaire dans diverses conditions météorologiques, y compris l'insolation. Les températures à l'intérieur du four étaient de 28 °F (15,5 °C) au-dessus de la température extérieure et l'humidité était de 21 % inférieure. Selon l'époque de l'année, l'humidité d'équilibre variait de 13-15 % pour le bois séché à l'air et de 8-10 % pour le bois séché dans le four. On a fait des essais avec différentes essences, qui ont été groupées en acajou (*Swietenia macrophylla*) et divers bois durs dont le poids spécifique variait de 0,48 à 0,82 avec une humidité de 12 %. Pour que l'humidité tombe de 50 % à 12 %, il a fallu 18 jours pour des planches d'acajou de 1 in. (25 mm), 25 jours pour des planches de 1½ in. (31 mm) et 41 jours pour des planches de 2 in. (50 mm). Pour faire tomber l'humidité de 60 % à 12 %, il a fallu 43 jours pour des mélanges de bois durs de 1½ in. (31 mm). La qualité du bois séché était aussi bonne ou même meilleure qu'avec le séchage à l'air. Il y a eu quelques problèmes de cémentation; des vaporisateurs ont été installés pour humidifier l'atmosphère du four pendant les premiers stades du séchage et pour conditionner du bois qui avait souffert de cémentation. L'eau des vaporisateurs était préalablement chauffée dans un appareil solaire. Le séchage était de deux à quatre fois plus rapide que le séchage à l'air.

Philippines

Casin en 1967⁶ et Casin, Ordinario et Tamayo en 1968⁷ ont décrit un petit four portatif de 1 m³ construit aux Philippines. Il était orienté nord-sud, contrairement à la plupart des fours décrits précédemment. Les extrémités étaient en contre-plaqué, avec une porte dans la face nord. Une circulation d'air était assurée par un ventilateur de 24 in. (61 mm) actionné par un moteur de 0,75 hp (560 W). Trois événements de 4 in. x 4 in. (10 cm x 10 cm) étaient aménagés sur une face du four. Des essais ont été faits avec quatre essences: *Shorea polysperma*,

⁶ R. F. Casin, *Solar Drying for Lumber*, Technical Note No. 76 (Los Baños, Philippines, Forest Products Research Institute, 1967).

⁷ R. F. Casin, L. B. Ordinario et G. Y. Tamayo, "Solar Drying of Apitong, Narra, Red Luan and Tanquile", *Philippine Lumberman*, vol. 15, n° 4 (1969), p. 23-30.

Pterocarpus indicus, *Shorea negrosensis* et *Dipterocarpus grandiflorus*. Les vitesses de séchage étaient beaucoup plus rapides; non seulement le four séchait le bois deux fois plus vite que le séchage à l'air, mais il l'amenait à une teneur en humidité inférieure. Les températures dans le four étaient de 7,2-11,7 °C plus élevées que la température extérieure. La cémentation a été importante pour certains bois et une humidification a été jugée nécessaire pour les essais ultérieurs.

Ouganda

Four solaire n° 1

Des essais ont commencé en 1954 avec un petit four solaire de 3,3 m³; leurs résultats ont été publiés en 1967⁸. La principale caractéristique de ce four est une double épaisseur de polyester spécial de 5 mils; lors de la rédaction de cet article, seule la feuille extérieure du toit était abîmée; la feuille intérieure et les murs étaient encore en bon état. Le four est orienté nord-sud; deux petits événements ont été aménagés sur les faces nord et sud. Deux ventilateurs de 18 in. (46 cm) sont actionnés par un moteur de 0,75 hp (560 W) monté à l'extérieur du four. Des réflecteurs courbes en aluminium sont installés sur chaque face du four pour faire pénétrer le rayonnement solaire. Le plafond intérieur, la cloison centrale montée au-dessous des ventilateurs et les autres parties internes, y compris le sol, sont peints avec une peinture noire mate. On a fait des essais avec neuf essences en différentes épaisseurs; on a fait des comparaisons avec le séchage sous abri, le séchage en plein air avec couverture et le séchage en étuve. La qualité du bois séché dans le four solaire était aussi bonne ou meilleure que celle du bois séché à l'air ou en étuve. Le four solaire a permis de faire tomber l'humidité du bois à 12 % dans un temps raisonnable, alors que le séchage à l'air n'a jamais permis d'aller au-dessous de 15-20 % (normalement environ 17 %), ce qui n'est pas suffisant pour que le bois puisse être utilisé dans l'ameublement ou la menuiserie de qualité. Dans les premiers stades du séchage, la vitesse n'est pas beaucoup plus grande qu'avec le séchage à l'air, mais le gain devient décisif lorsque l'humidité tombe au-dessous de 30 %. Pour des essences de poids spécifique moyen telles que *Chlorophora excelsa* en épaisseur de 1 in. (25 mm), le passage du bois vert au bois ne contenant que 12 % d'humidité a été fait en un mois ou même moins. Depuis 1967, ce four fonctionne presque continuellement pour le Département des forêts ou pour des ateliers gouvernementaux et privés. Peut-être grâce aux petits événements, il n'y a eu pratiquement aucun problème de cémentation.

⁸R. A. Plumpton, "The design and operation of a small solar seasoning kiln on the equator in Uganda", *Commonwealth Forestry Review*, vol. 46, n° 130 (1967).

Four solaire n° 2

Le four solaire n° 1 s'est révélé si utile et si rémunérateur qu'il a été décidé de réaliser un four de plus grandes dimensions, suffisamment important pour inciter les ateliers de menuiserie et d'ameublement à utiliser les fours solaires. Le résultat a été le four n° 2, dont les principales caractéristiques apparaissent dans les figures 1 et 2. Le principe est le même que celui du four n° 1, sauf que l'air circule de haut en bas le long d'un côté du four, puis est détourné de 180° par des déflecteurs en aluminium et remonte à travers la pile de bois. La circulation de l'air est assurée par quatre ventilateurs de 20 in. (51 cm) actionnés par deux moteurs de 2 hp (1,5 kW) montés sur le toit du four. Les ventilateurs sont réversibles. Le four peut contenir une pile de bois d'environ 7,2 m x 2,3 m x 1,6 m. Des réflecteurs améliorés, de la même longueur que le four, sont polis avec un brillant aux silicones pour diminuer le plus possible l'oxydation de leur surface. Le four est recouvert de deux feuilles de polyester spécial de 5 mils, espacées de 4,4 cm. Ces feuilles sont étirées dans le sens de la largeur du four (et non de la longueur) et maintenues par des liteaux de bois. Les membrures des parois et les chevrons du toit sont espacés de 107 cm, pour coïncider avec la largeur des feuilles de polyester.

Quatre événements (voir figure 2) sont aménagés dans l'axe des ventilateurs, juste sous les gouttières du toit, de chaque côté du four; ils sont commandés comme le montrent les figures 1 et 2. Les réflecteurs sont installés le long du four. Les trous dans les cadrans de réglage sont marqués en heures. Lorsque la clavette maintenant le réflecteur est placée dans le trou approprié, un faisceau de lumière est réfléchi à angle droit à l'intérieur du four et sur l'absorbeur en aluminium peint en noir. Les réflecteurs ont 2,4 m de largeur et 3,6 m de longueur; il y en a deux de chaque côté du four. Le sol du four est en béton; il a été posé gratuitement par une entreprise de construction qui voulait faire sécher du bois pour l'utiliser dans un hôtel. Le chariot et les rails ont été fabriqués dans les ateliers de la Section des travaux du Département des forêts, avec des chariots et rails d'une ancienne sucrerie, des profilés d'acier, des longerons en acier laminé et des essieux de 1 1/2 in. (38 mm). On a ajouté une source de chaleur d'appoint sous forme d'un chauffe-eau solaire de fabrication artisanale, relié à une canalisation de 3 in. (76 mm) peinte en noir et fixée au mur du four, entre la feuille intérieure de polyester et l'absorbeur en aluminium. On obtient ainsi une circulation continue d'eau chaude. Toutefois, il est douteux que cela contribue beaucoup à élever la température dans le four, du fait de la faible capacité calorifique en regard d'un plein chargement de bois vert.

Le second four a été comparé au premier et on constate qu'il était environ 10 % plus lent. La qualité du bois séché était meilleure qu'avec le four n° 1. Les

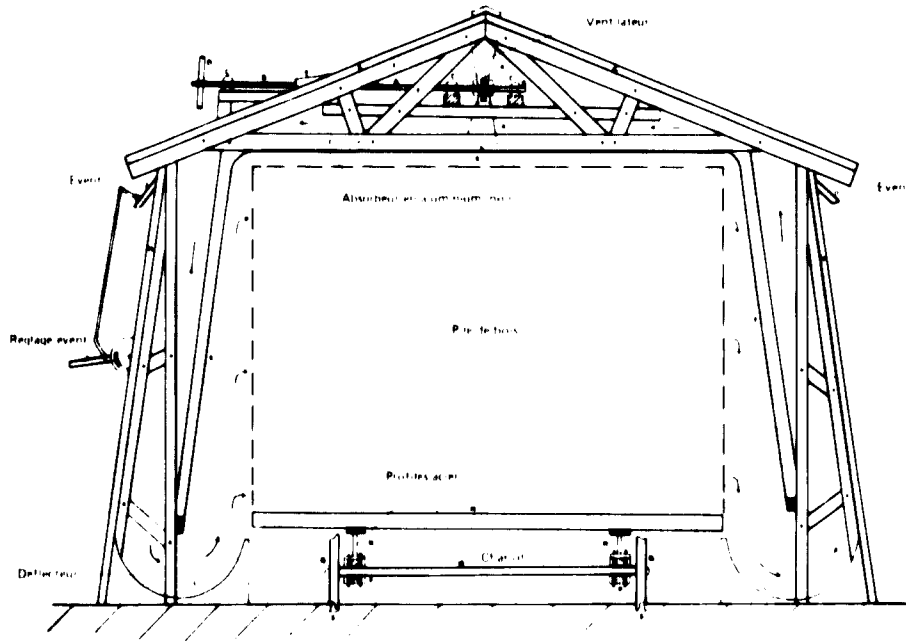


Figure 1. Coupe transversale du four n° 2 de l'Ouganda

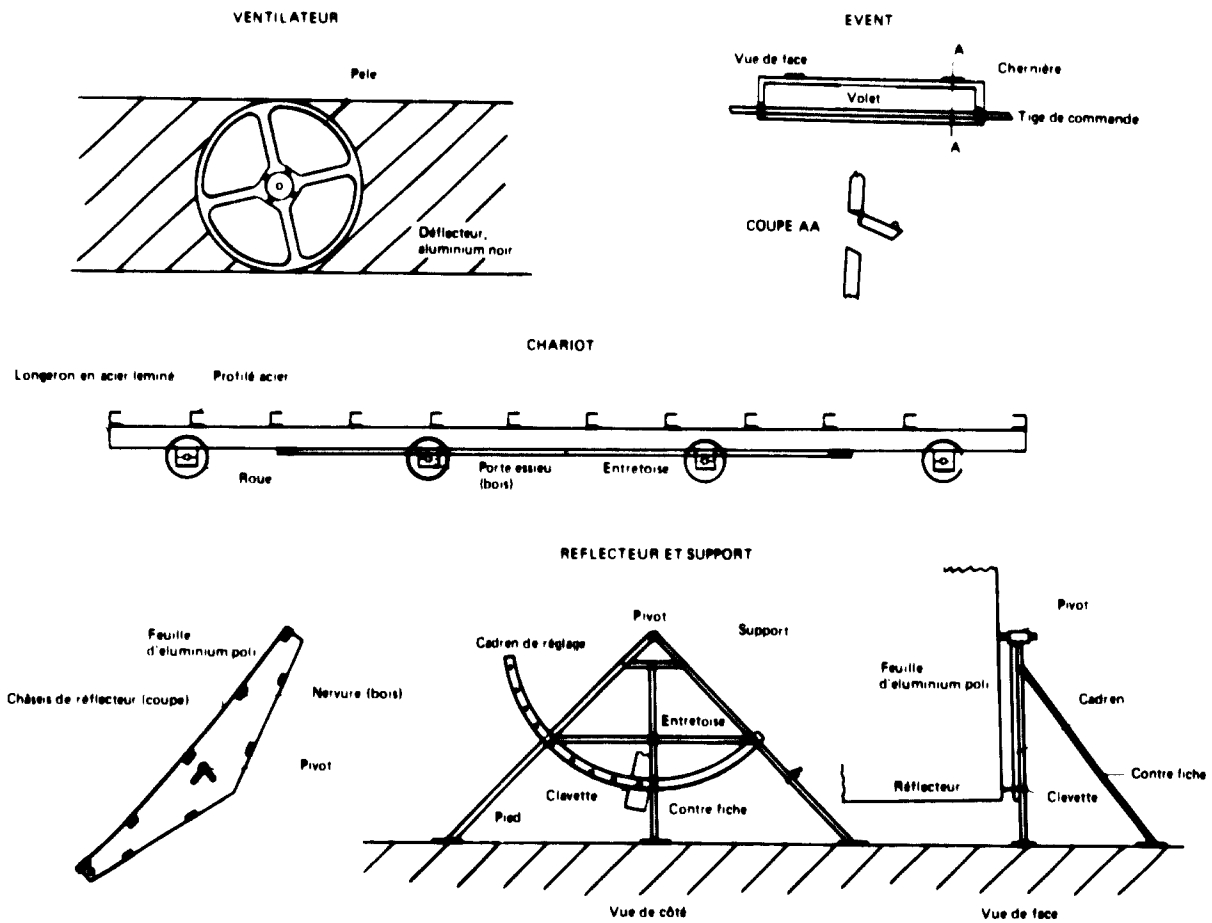


Figure 2. Four n° 2 de l'Ouganda : détails des ventilateurs, événements, chariot et réflecteurs

évents sont trop grands pour un conditionnement optimal et il faut les maintenir presque fermés pendant toute la période de séchage.

Le coût de construction du four est estimé à environ 12 000 shillings ougandais (1 700 dollars).

Depuis 1968, le four a été utilisé presque constamment pour le séchage de bois destiné à l'ameublement. Normalement, le chargement est fait avec une seule essence à la fois; toutefois, s'il ne faut sécher qu'une petite quantité d'une même essence, on fait des mélanges. Si l'on doit mélanger des essences ou des planches de diverses épaisseurs, il faut placer dans le bas l'essence qui sèche le plus lentement ou les planches les plus épaisses, afin de pouvoir retirer les pièces ayant séché le plus vite sans avoir à défaire toute la pile. On a constaté qu'il ne fallait pas mélanger de petites quantités de bois vert à du bois demi-séché, à moins qu'il ne s'agisse de bois séchant rapidement sans danger, car un séchage trop rapide dans une atmosphère peu humide pouvait provoquer une cémentation ou d'autres altérations. Toutefois, il

ne fait pas de doute que, du fait de sa vitesse de séchage relativement lente, ce four offre plus de possibilités qu'un four classique pour ce qui est du pouvoir de séchage d'un mélange de bois verts.

Outre le four construit par le Département des forêts, seulement deux autres fours du même modèle ont été construits en Ouganda: l'un par l'Administration pénitentiaire pour fournir du bois sec à son atelier d'ameublement et l'autre par une entreprise privée de menuiserie. Aucun des deux n'est jamais devenu pleinement opérationnel: le premier était recouvert d'un polythène mince qui s'est désintégré rapidement; le deuxième n'a jamais été terminé parce que l'administrateur intéressé a quitté l'entreprise avant de prendre des mesures pour obtenir le matériau de couverture approprié.

Four solaire n° 3

La construction du four n° 2 a été longue et compliquée. Ce four a été un succès en ce sens qu'il a

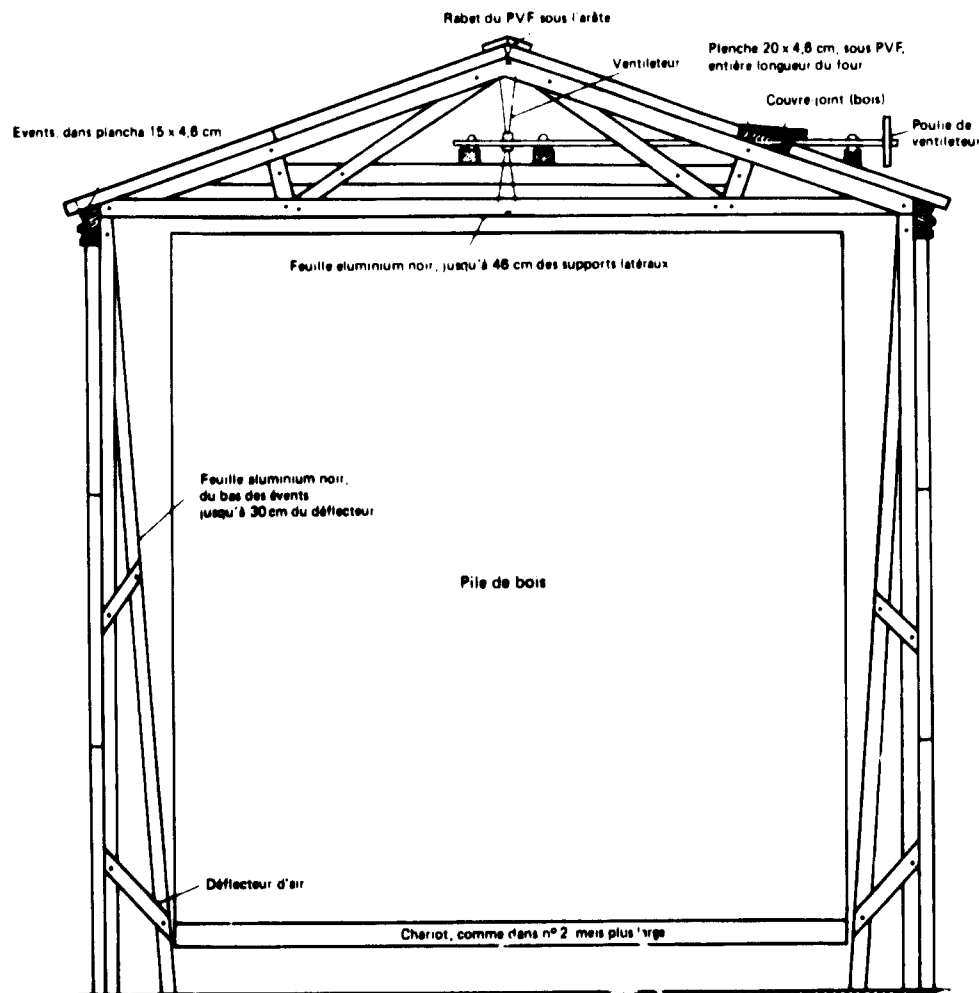


Figure 3. Coupe du four n° 3 avec détails sur certains éléments

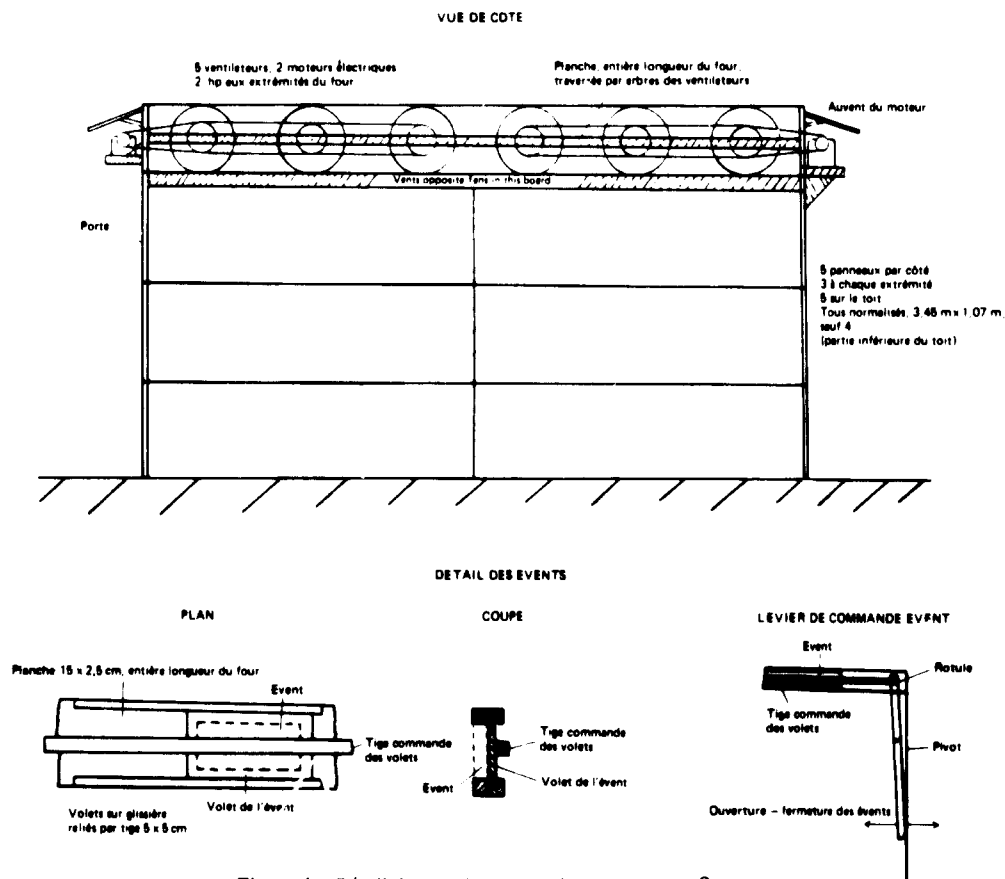


Figure 4. Détail des ventilateurs et évents du four n° 3

donné de bons résultats et qu'il continue de fonctionner, mais il est trop vaste et exige trop de matériaux en regard de sa capacité; de ce fait, il est peu rentable. De plus, il n'a pas été conçu pour être construit en série. Un troisième four a été conçu en 1970 et construit au cours du premier semestre de 1971 en vue de doubler la capacité du four n° 2 tout en maintenant au minimum le coût et la complexité de construction (voir figures 3 et 4).

L'une des différences de conception est que l'air ne descend pas le long d'une paroi du four pour monter ensuite à travers la pile de bois, comme dans le cas du four n° 2. L'air passe essentiellement à l'intérieur mais partiellement à l'extérieur de l'absorbeur, lequel s'étend le long des parois du four. La position des évents est telle qu'ils sont partiellement couverts par le haut de l'absorbeur et qu'une faible proportion seulement de l'air passant à travers les ventilateurs peut entrer par un évent et sortir par l'évent opposé. Les évents sont plus petits et mieux joints (en les bordant de feutre ou autre matériau similaire) que les évents du four n° 2. La structure générale du four est la même, mais la feuille de polymère synthétique (PVF 4 mils pour la toiture et PVF de 2 mils pour les parois, car on ne pouvait plus obtenir de polyester spécial) est tendue sur des

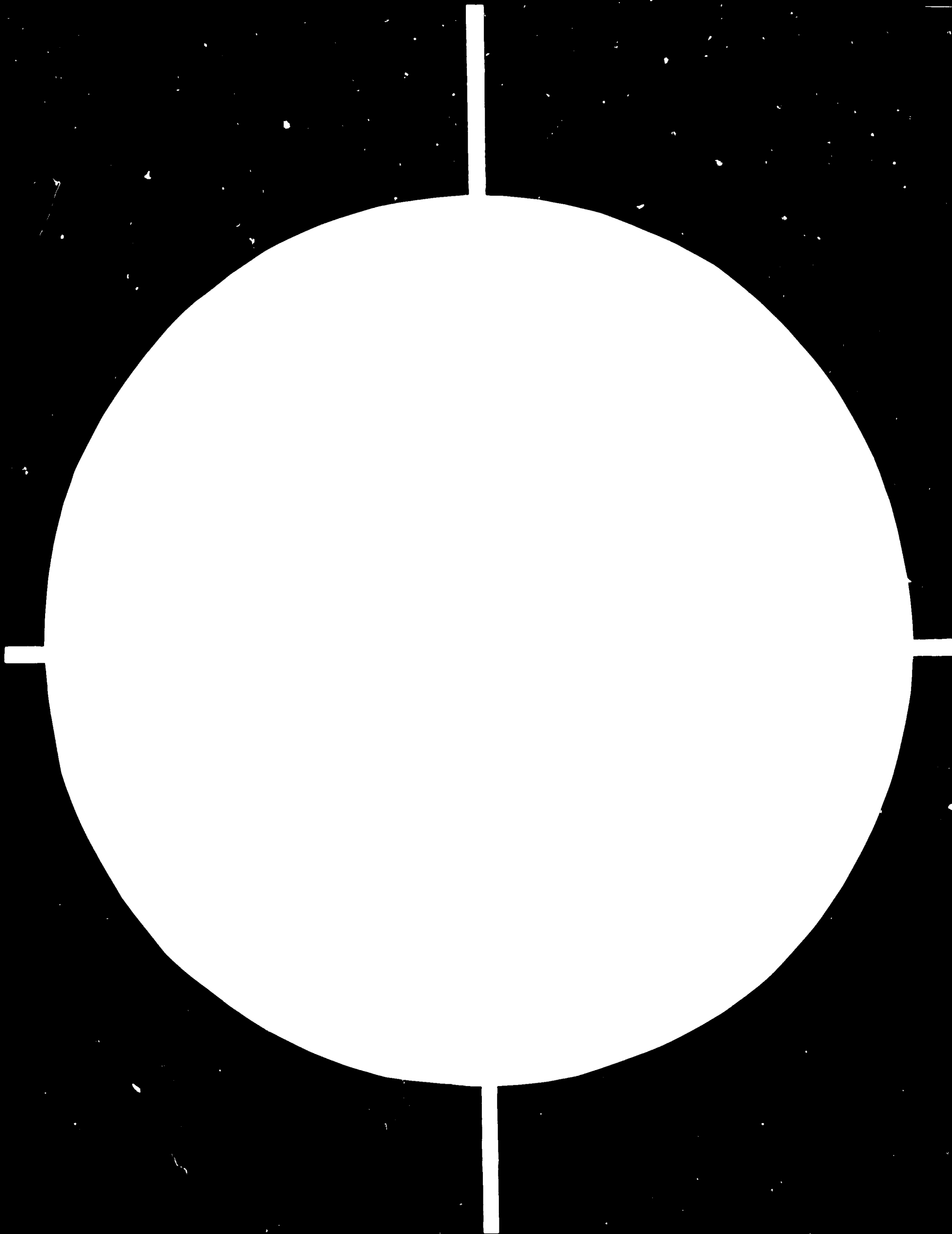
panneaux normalisés qui sont assemblés avant fixation définitive de la feuille à l'extérieur des panneaux. Il faut au total 22 panneaux normalisés pour les parois, la porte et la partie supérieure du toit. Il ne faut que quatre panneaux non normalisés pour la partie inférieure du toit; les panneaux du côté de l'arbre du ventilateur sont plus petits que les panneaux du côté opposé. Il y a six ventilateurs de 20 in. (51 cm), au lieu de quatre dans le four n° 2, pour tenir compte des plus grandes dimensions de la pile de bois, mais ils sont toujours actionnés par deux moteurs de 2 hp (1,5 kW), chacun étant suffisamment puissant pour actionner trois ventilateurs. Les moteurs sont placés à l'extrémité du four, afin de ne pas projeter d'ombre sur le toit et réduire ainsi la quantité de rayonnement solaire pénétrant dans le four. La porte a été conçue pour que l'on puisse la faire en panneaux normalisés et la rabattre complètement sur un côté. Pour diminuer le coût, le sol du four est en gravier damé et recouvert de tarmac. Les rails du chariot sont posés sur des traverses en bois traité sous pression; une poutre en ciment sous chaque rail augmente la rigidité et prévient un affaissement.

Les ventilateurs et les moteurs ont fonctionné parfaitement; il a suffi de resserrer et de graisser les

C-537



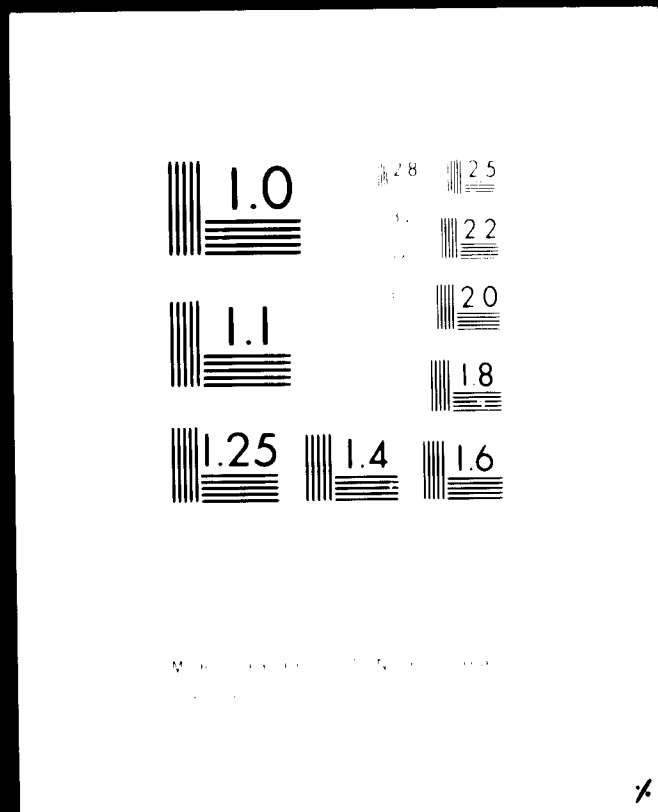
81.07.13



2 OF 2

08054-

08072-F



24x
D

paliers de temps à autre. Le revêtement extérieur de la toiture a dû être changé, mais seulement après six ans de service. Il faut nettoyer ou repeindre les surfaces noires à l'intérieur du four, mais on ne le fait en principe que tous les deux ans. Aucun préposé à temps complet n'est nécessaire, les fours sont mis en marche le matin et arrêtés le soir et la position des réflecteurs est ajustée toutes les heures par un inspecteur qui exerce d'autres fonctions; en dehors de ses heures de travail, ces tâches sont assumées par un gardien. Le Ministère des travaux publics possède son propre four à chauffage électrique et commande automatique, qui a une capacité d'environ 2 m³.

Fort Collins, Colorado (États-Unis)

Troxwell et Mueller ont décrit en 1968 un four solaire d'une capacité de 2,8 m³ installé à Fort Collins⁹. Ce four est recouvert d'une simple feuille ondulée de polyester armuré en fibres de verre. Ce matériau translucide a été essayé en même temps que du verre, à l'aide d'un pyréliomètre d'Eppley, pour comparer les propriétés de transmission du rayonnement solaire. On a constaté qu'il n'était que légèrement inférieur au verre à ce sujet. Auparavant, des feuilles de PVF avaient donné de mauvais résultats du fait des vents violents communs dans la région. Le four était équipé de deux ventilateurs de 24 in. (61 cm) assurant la circulation de l'air à une vitesse de 100-300 ft/mn (30-100 m/mn). Il était orienté est-ouest, avec un toit face au sud. On a constaté des différences de température au milieu de la journée en été. Le réglage des événements était important pour assurer des conditions optimales. À l'aide du pyréliomètre, on a calculé d'après le rayonnement solaire pénétrant à l'intérieur du four et l'humidité du bois que 25 % à 45 % de l'énergie solaire captée étaient utilisés pour sécher le bois; le reste était dissipé. Des essais avec du sapin d'Engelman et du pin forestier ont donné des vitesses de séchage satisfaisantes.

Dans une monographie intéressante¹⁰, Wengert a identifié les sources de la perte d'énergie dans le four solaire de Fort Collins et montré qu'environ 16 % seulement de l'énergie solaire frappant la surface extérieure du four étaient utilisés pour sécher le bois; le reste était dissipé à peu près comme suit (en pourcentages):

| | |
|----------------------------------|-----------|
| Dans les parois et le toit | 30 |
| Par réflexion | 17 |
| Dans le sol | 11 |
| Dans les matériaux du séchoir | 7 |
| Énergie à grande longueur d'onde | 13 |
| Par les événements | 14 |
| Total | 92 |

⁹H. I. Troxwell et L. A. Mueller, "Solar lumber drying in central Rocky Mountain region", *Forest Products Research Journal*, vol. 18, n° 1 (1968), p. 19-24.

¹⁰E. M. Wengert, *Improvements in Solar Dry Kiln Design*, United States Forest Service Research Note FPL-0212 (United States Forest Service, 1971).

L'addition des pertes ci-dessus et des 16 % utiles donne un chiffre supérieur à 100; ceci est dû à un apport d'énergie non mesuré par les ventilateurs et aux erreurs d'expérience. Le four était recouvert d'une seule feuille de polyester armuré en fibres de verre. Wengert a suggéré l'utilisation d'une double épaisseur; il a également suggéré une meilleure isolation du sol, le montage dans le toit de déflecteurs peints en noir pour absorber une plus grande quantité d'énergie incidente et des améliorations du système de ventilation. Il a proposé de revêtir les parois de produits chimiques réfléchissant les rayons infrarouges, par exemple le dioxyde de titane, afin de réduire les pertes de rayonnements à grande longueur d'onde.

Ghana

À Kumasi, Martinka¹¹ a utilisé une ancienne serre à toit vitré, pouvant contenir environ 4 m³ de bois, comme four solaire improvisé pour comparer le séchage solaire au préséchage en four et au séchage à l'air. Le préséchoir pouvait contenir 96 bd ft (0,23 m³). Un seul ventilateur était utilisé dans le four solaire pour assurer la circulation de l'air et une feuille d'aluminium noire était utilisée pour absorber la chaleur. Avec *Nauclea* et *Entandrophragma angolense*, il a constaté que la vitesse de séchage dans le four solaire était comprise entre les vitesses de séchage à l'air et dans le préséchoir, probablement parce que l'isolation de la serre était mauvaise et que la circulation de l'air était moins bonne que dans le préséchoir; il faut ajouter que le préséchoir était beaucoup plus petit.

Madagascar

En 1970, Gueneau¹² a décrit un four solaire à Tananarive, conçu comme le four de Fort Collins (voir ci-dessus), mais orienté nord-sud avec le toit face à l'ouest. Le four était recouvert d'une seule feuille ondulée de polyester armuré en fibres de verre. Deux ventilateurs assuraient la circulation de l'air et un hygromètre permettait de contrôler l'humidité à l'intérieur du four. Le sol était en béton peint en noir. Les feuilles en fibres de verre étaient jointes avec du polystyrène. La construction du four avait coûté 417 000 FMG (environ 1 500 dollars). Deux événements étaient aménagés sur la paroi est du four juste au-dessous du toit, et deux autres sur la paroi ouest près du sol. Des essais ont été faits avec *Pinus Kesiya* et *Dalbergia baroni*; la réduction du temps de séchage par rapport au séchage à l'air a été de 34-68 % pour le pin et de 48 % pour *Dalbergia*. Le gain de temps était

¹¹I. Martinka, *Predrying of Some Ghanaian Timber*, Technical Note No. 11 (Ghanaian Forest Research Institute, 1969).

¹²P. Gueneau, "Une expérience de séchage solaire du bois", *Bois et forêts des Tropiques*, n° 131 (1970), p. 69 et 70.

particulièrement sensible lorsque l'humidité tombait au-dessous de 20%. On a recommandé d'utiliser le four solaire après une période préliminaire de séchage à l'air, pour amener le bois à l'humidité d'équilibre requise de 10%.

République-Unie de Tanzanie

En 1968, un four solaire a été construit à Moshi (République-Unie de Tanzanie) par la Section d'application du Département des forêts. Il avait un toit plat constitué d'un seul vitrage et des parois revêtues de polythène. Un absorbeur en fer galvanisé était placé à 6 m. (15 cm) à l'intérieur des parois peintes en noir; la circulation de l'air était assurée par trois ventilateurs montés au-dessus de l'absorbeur; ce dernier se prolongeait horizontalement pour constituer le plafond du four. Le four avait une capacité de 6 m³. Malheureusement, on ne dispose d'aucune donnée sur son fonctionnement.

Facteurs importants du séchage solaire

Isolation

Wengert^{1,3} a montré qu'une grande partie des pertes de chaleur dans un four solaire était due à une mauvaise isolation du toit, des parois et du sol. Il s'agissait d'un four dont le revêtement consistait en une simple feuille de polyester armuré en fibres de verre. Des fours ayant un revêtement en deux épaisseurs sont certainement plus efficaces. Si l'on utilise un polymère synthétique souple, la double épaisseur est sans doute moins efficace qu'avec une feuille rigide qui maintient un espace d'air constant et diminue le mouvement de l'air dans cet espace au cours des vibrations provoquées par les ventilateurs. Il est certainement possible de réaliser à peu de frais des portes mieux ajustées, les événements doivent être efficaces et facilement ajustables afin de pouvoir régler plus précisément le volume d'air pénétrant dans le four ou s'en échappant.

Le choix du revêtement est limité par le nombre réduit de matériaux transparents ou translucides disponibles. Etant donné que le revêtement représente une large partie du coût de la construction d'un four, il faut trouver un compromis entre le matériau idéal et le plus économique. Il est regrettable que le polyester spécial utilisé dans les deux premiers fours de l'Ouganda ne soit plus en production; en Ouganda, tout matériau de couverture approprié, autre que le verre qui est coûteux, doit être importé spécialement de l'étranger, normalement avec un délai de six mois. Il est hors de doute que c'est ceci, plus que tout autre facteur, qui a freiné l'utilisation des séchoirs solaires en Ouganda.

^{1,3}Op. cit.

Circulation de l'air

Le débit et la régularité du courant d'air à travers la pile de bois est un facteur important de la vitesse de séchage. Si le four n'est que partiellement rempli, une grande quantité d'air passera au-dessus de la pile. Une manière facile de prévenir ceci consiste à fixer une feuille de polymère synthétique au toit ou au plafond du four et d'enrouler le bas de la feuille sur une pièce de bois posée au haut de la pile. Il est important de bien concevoir les absorbeurs pour assurer un courant d'air uniforme à travers le bois et une bonne absorption de la chaleur.

Le réglage des événements est également important. Une mauvaise ventilation a été un défaut de nombreux fours expérimentaux; il faut trouver un équilibre approprié entre humidité et température. Au début du séchage, notamment aux alentours du point de saturation de la fibre, le facteur limitatif est la vitesse à laquelle l'eau passe du centre de la pièce de bois à la périphérie. Un gradient d'humidité trop élevé provoque la cimentation du bois; au début du séchage, la température et l'humidité doivent être élevées. Ce n'est qu'aux derniers stades du séchage qu'il est possible d'obtenir dans un four solaire des températures élevées et de faibles humidités. Il est donc nécessaire d'étudier plus avant la conception et le réglage des événements.

Dimension des fours

Pour avoir un intérêt commercial, un four solaire doit avoir une capacité de 10-20 m³, même dans un pays en développement où les fabriques de meubles et les menuiseries sont plus petites que dans les pays industrialisés. Jusqu'à présent, la plupart des fours expérimentaux étaient de petites dimensions; il faut étudier plus avant la question de la taille du four en vue de diminuer le rapport surface du four/volume de bois traité. En Ouganda, le four n° 3 a été construit pour étudier ce problème. Si ce four fonctionne de manière satisfaisante, il pourra servir de base à la conception d'un four industriel adapté aux conditions en Ouganda.

Réflecteurs

Avec des fours de 10-20 m³ ou davantage, il faut le plus de chaleur possible, ce qui signifie la surface de captage la plus grande possible. En Ouganda, traversé par l'équateur, il est facile de concevoir et d'utiliser des réflecteurs simples qui réfléchissent une quantité importante d'énergie solaire à travers les parois du four. Loin de l'équateur, cela serait plus difficile. On pourrait concevoir des appareils simples de chauffage de l'air en vue de le préchauffer avant son admission dans le four par les événements.

Coût

Il est certainement possible d'améliorer grandement le rendement des fours solaires, mais il faut tenir compte du coût. La principale justification des fours solaires est leur faible coût et la facilité de construction, par comparaison aux fours classiques. Il serait ridicule de perdre cet avantage majeur par l'emploi de méthodes raffinées visant à augmenter leur rendement.

Qualité de bois séché

Presque tous les chercheurs s'intéressant au séchage solaire ont conclu à la bonne qualité du bois obtenu. Il est presque certain que cela est dû à l'absence de chauffage solaire pendant la nuit : la température plus basse, l'humidité plus élevée et l'absence de courant d'air permettent chaque nuit une période de "conditionnement" pendant laquelle l'humidité interne et l'humidité superficielle ont le temps de s'équilibrer. Ceci est particulièrement important pour les essences dures et lourdes, qui séchent plus lentement. On peut obtenir le même résultat avec une bonne programmation des fours classiques, mais cela exige une main-d'œuvre qualifiée.

Les fours solaires et leurs concurrents

Les fours solaires peuvent-ils entrer en concurrence avec les principales méthodes classiques décrites plus haut ? C'est la question qui est discutée ci-après.

Séchage à l'air

Il est généralement admis que le séchage en four solaire est pour le moins aussi coûteux que le séchage à l'air, même si l'on tient compte de la plus longue immobilisation de capital pendant le séchage à l'air. Mais le séchage solaire a trois avantages principaux sur le séchage à l'air. Premièrement, il est plus rapide, normalement deux fois plus rapide pour parvenir à l'humidité d'équilibre. Deuxièmement, il est possible d'abaisser l'humidité du bois à une teneur moindre que la teneur d'équilibre dans des bâtiments fermés, ce qui signifie que le bois peut être séché suffisamment pour répondre aux besoins des fabriques de meubles et de la menuiserie fine; c'est là sans aucun doute le plus grand avantage du séchage solaire sur le séchage à l'air. Troisièmement, la qualité du bois est presque toujours supérieure à celle du bois séché à l'air, parce que l'humidité est plus uniforme à tous les stades du séchage. De plus, dans le séchage en four solaire, les extrémités de la pile de bois ne reçoivent pas plus d'air, de lumière et de chaleur que le centre, alors que le contraire est courant dans tous

les cas de séchage à l'air. De ce fait, il y a moins de risques d'altération du bois sous forme de fendillements ou éclatements aux extrémités.

Le principal inconvénient du séchage solaire est la faible capacité des fours.

Séchoirs à convection forcée

Des recherches plus poussées permettront peut-être de rendre les séchoirs à convection forcée de l'air compétitifs avec les fours solaires. Il faudrait utiliser de grands ventilateurs, à moins de concevoir des systèmes compliqués de déflecteurs; pour être efficaces, ils devraient être recouverts d'une toiture et montés dans un mur ou une cloison. Les dépenses d'investissement pour de tels séchoirs sont donc importantes; de plus, ils n'offrent pas les mêmes avantages que les fours solaires pour ce qui est de la température et du contrôle de l'humidité. Par conséquent, les séchoirs à convection forcée de l'air ne menacent pas pour le moment les fours solaires dans les régions tropicales.

Préséchoirs

Si les préséchoirs ne sont utilisés qu'aux fins pour lesquelles ils ont été conçus, il est peu probable qu'ils puissent concurrencer les fours solaires, étant donné que ces derniers sont plus efficaces et offrent de plus grands avantages aux derniers stades du séchage. En revanche, si les préséchoirs sont modifiés pour constituer des fours classiques à bas prix, avec un mode de chauffage adapté aux besoins des pays en développement, ils auront beaucoup plus de chances de concurrencer les fours solaires. On pourrait fort bien, par exemple, augmenter la chaleur solaire avec un simple chauffe-eau constitué par un ballon de 200 litres au-dessus d'un feu de bois.

Fours classiques

Dans tous les cas où des analyses de prix ont été faites, les fours solaires se sont révélés moins coûteux que les fours classiques. Dans les limites de leur taille, ils sont donc concurrentiels; toutefois, étant donné qu'ils sont plus lents et qu'ils doivent être exposés le plus longtemps possible au rayonnement solaire direct, ils exigent une plus grande surface au sol que les fours classiques pour le même volume de bois traité. Sous leur forme actuelle, ils se prêtent mieux au séchage de petites quantités de bois qu'au traitement en masse. Il s'ensuit que les fours solaires devraient être utilisés initialement par de petites entreprises de menuiserie et d'ameublement. Plus tard, ils pourront être utilisés en batterie pour le séchage de plus grandes quantités de bois, mais il faudra d'abord procéder à certaines améliorations. Un

avantage des fours solaires est qu'ils n'exigent pas de main-d'œuvre hautement qualifiée et qu'il suffit de s'en occuper de temps à autre

Déshumidificateurs

Du fait de leur faible rendement, notamment pour le séchage de grumes de grandes dimensions, il semble peu probable que les déshumidificateurs puissent concurrencer les fours solaires.

Remarques sur les comparaisons de coûts

Les seules analyses des coûts qui aient été faites pour comparer le séchage solaire aux autres méthodes sont celles de Peck¹⁴. En Ouganda, ni le four vapeur géré par le Département des forêts, ni le four électrique géré par le Ministère des travaux publics ne sont représentatifs des fours commerciaux potentiellement concurrentiels, car ils sont trop petits et leur exploitation est trop coûteuse. On ne dispose pas d'analyse des coûts pour les fours exploités commercialement dans le pays, qui sont situés à 50 miles (80 km) des fours solaires.

Il ne serait pas justifié de comparer les coûts du séchage à l'air et ceux du séchage solaire, étant donné que la meilleure manière d'utiliser un four solaire est presque certainement d'abaisser l'humidité d'un bois préalablement séché à l'air à un taux qui ne peut pas être atteint par le seul séchage à l'air.

Intérêt des fours solaires pour les pays en développement

Dans les pays en développement, l'industrie du bois est constituée d'entreprises qui sont normalement petites et souvent séparées l'une de l'autre par de grandes distances; les communications laissent souvent à désirer. Chaque entreprise a besoin d'une quantité relativement faible de bois; ceci favorise le four solaire, moins cher à construire et à exploiter et traitant de faibles volumes de bois. De plus, la plupart des pays en développement ont des climats qui favorisent le séchage solaire. Une certaine concentration de l'industrie du bois est nécessaire, car le charpentier du village ne sera pas en mesure d'acheter un four solaire et, de toute façon, il lui importe peu ainsi qu'à ses clients que le bois soit absolument sec. Lorsque l'industrie du bois aura atteint le stade où les entreprises utilisent 10-40 m³ de bois par mois ou bien se constituent en coopératives, il y aura probablement une demande de fours solaires. Au

¹⁴ *Op. cit.*

présent stade de développement, ce n'est pas toujours le coût unitaire du bois séché qui détermine la méthode de séchage à utiliser; ce sont plutôt les dépenses d'investissement afférentes à cette méthode. Ainsi, les dépenses initiales doivent être aussi faibles que possible. Les fours devraient être conçus de manière à pouvoir être construits facilement avec des matériaux aisément disponibles. A ce propos, des constructions modulaires et des éléments normalisés sont intéressants s'ils sont fournis avec de bonnes instructions de montage.

Recommandations

Coordination et centralisation des recherches

Il faut faire des recherches dans la voie suggérée par Wengert¹⁵ pour découvrir la nature des pertes d'énergie et pour tester les modifications tendant à les réduire. Il est essentiel de faire des recherches pour trouver les meilleurs matériaux de revêtement. Cette recherche peut être faite partout où l'on dispose du personnel, des ressources et des moyens appropriés; les résultats seront applicables dans toutes les régions du monde. L'étude des dimensions et formes optimales des fours, qui varieront d'un pays à l'autre, doit être laissée à des chercheurs dans chaque pays intéressé, afin qu'ils puissent adapter la conception des fours aux conditions régnant dans le pays.

Fonds pour la recherche-amélioration

Dans la plupart des pays en développement, les fonds affectés à la recherche sont limités, notamment pour la recherche sur les fours solaires qui n'apportera sans doute pas de grands bénéfices immédiats. Etant donné que "voir, c'est croire", des fours commerciaux ne deviendront une réalité dans un pays quelconque que si l'on peut faire la démonstration, dans ce pays ou un pays voisin, d'un four solaire de dimension commerciale. De ce fait, des fonds sont nécessaires non seulement pour la recherche, mais aussi pour la construction de prototypes.

Diffusion des informations

La plupart des recherches sur les fours solaires ont été faites sans connaître les recherches effectuées autre part. Un groupe de correspondants, composé de personnes travaillant sur les fours solaires dans différentes parties du monde, permettrait de résoudre ce problème. Un président ou un secrétaire serait nécessaire pour assurer la diffusion des informations.

¹⁵ *Op. cit.*

Réfrigération solaire

Erich A. Farber

*Laboratoire de l'énergie solaire et de la conversion de l'énergie,
Université de Floride (Etats-Unis)*

La réfrigération est chose courante dans les pays industrialisés grâce à l'électricité produite par des combustibles fossiles, mais il n'en est pas de même dans la plus grande partie du monde et pour la grande majorité des peuples. Cependant, l'énergie solaire est disponible dans la plupart des régions habitées et la conversion de l'énergie solaire en d'autres formes d'énergie permettant la réfrigération pourrait présenter un intérêt énorme pour l'humanité. Le présent article est une analyse détaillée de quelques méthodes qui pourraient être utilisées à cet effet et il contient des recommandations pour leur application.

Méthodes fondamentales

Les modes de réfrigération les plus communément utilisés sont les machines frigorifiques à compression, constituées essentiellement d'un compresseur actionné par énergie mécanique ou le plus souvent électrique, et les machines frigorifiques à absorption, dans lesquelles le compresseur est remplacé par un absorbeur, un bouilleur et une petite pompe (voir figures 1 et 2). Dans les deux cas, la machine comporte un condenseur, un détendeur ou autre système régulateur et un évaporateur. Dans une machine à absorption à trois fluides, on peut même supprimer la pompe. Une description détaillée des deux méthodes est donnée ci-après.

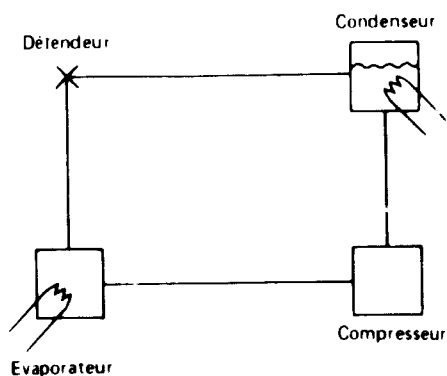


Figure 1. Machine frigorifique à compression

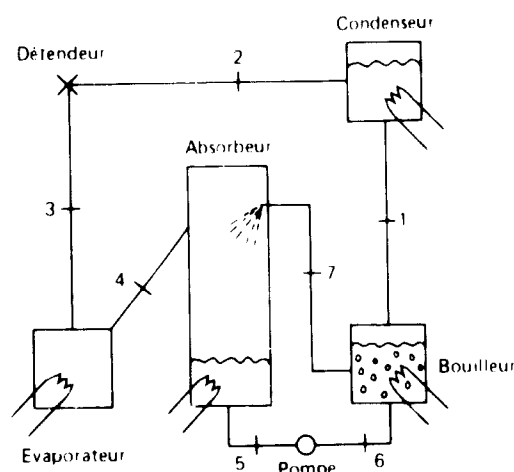


Figure 2. Machine frigorifique à absorption à fonction continue

Machines frigorifiques solaires

Lorsqu'on utilise le rayonnement solaire comme source d'énergie pour la réfrigération, on peut appliquer de nombreuses méthodes. L'énergie solaire peut être convertie en énergie mécanique qui actionnera le compresseur d'une machine à compression classique; elle peut aussi être convertie en énergie électrique, soit grâce à un moteur solaire actionnant un alternateur, soit grâce à un appareil à semi-conducteurs actionnant un réfrigérateur électrique classique. Toutefois, étant donné que l'on peut convertir l'énergie solaire plus efficacement en énergie thermique qu'en énergie mécanique ou électrique, son utilisation pour actionner une machine frigorifique à absorption semble constituer la meilleure solution pour le moment.

Dans les applications à haute température, l'énergie solaire doit être concentrée; ceci exige dans la plupart des cas des capteurs suivant la course du soleil, qui sont plus compliqués et plus coûteux. L'effet du vent, la durée de vie des réflecteurs, le mécanisme d'orientation, etc. posent quelquefois des

problèmes. Il faut aussi tenir compte du fait que les capteurs solaires à effet de concentration n'utilisent que le rayonnement direct, il s'ensuit que, même par temps clair, une certaine quantité d'énergie solaire est perdue et que par temps complètement couvert ils sont inopérants.

Dans les applications à basse température, on peut utiliser des capteurs plans, qui captent en même temps le rayonnement direct et le rayonnement diffus. Il n'y a pas encore sur le marché de machines frigorifiques fonctionnant dans cette gamme de températures; il faut les concevoir et les fabriquer spécialement.

Caractéristiques de fonctionnement

Les machines frigorifiques à compression sont très répandues et presque tout le monde sait comment elles fonctionnent. Il n'en est pas de même des machines à absorption, dont le fonctionnement sera brièvement décrit.

La machine à absorption à fonction intermittente, schématisée dans la figure 3, est la plus simple à construire; elle comporte deux appareils jouant chacun un double rôle. Pendant la charge, un appareil sert de bouilleur: sous l'effet de la chaleur, le réfrigérant (ammoniac) se dégage de l'absorbant (eau); l'autre appareil sert de condenseur: le réfrigérant y passe de l'état gazeux à l'état liquide.

La charge est normalement plus rapide que le refroidissement, pendant lequel l'appareil qui avait servi de bouilleur devient l'absorbeur et celui qui était le condenseur devient l'évaporateur, où se produit le froid désiré.

La machine à absorption à fonction continue est semblable à une machine à compression, le compresseur étant remplacé par un absorbeur, un bouilleur et une pompe. La solution réfrigérant-absorbant est chauffée dans le bouilleur, le réfrigérant se dégage de la solution et va dans le condenseur où il se liquéfie; il passe ensuite dans le détendeur, puis dans l'évaporateur où se produit le froid désiré. Son

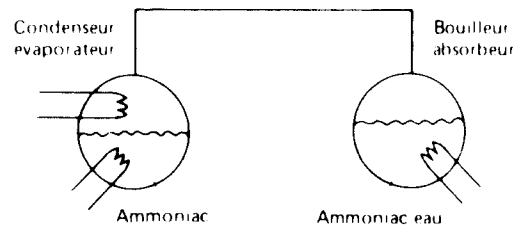


Figure 3. Machine frigorifique à absorption à fonction intermittente

travail accompli, le réfrigérant passe dans l'absorbeur, où il est de nouveau dissous dans l'absorbant. La solution est alors pompée dans le bouilleur, et le cycle recommence. En d'autres termes, l'absorbant est un simple moyen de transport. Dans la figure 2, l'absorbant effectue le circuit 5-6-7-5, se chargeant de réfrigérant entre 7 et 5 et l'abandonnant entre 6 et 7. Le réfrigérant effectue le circuit 1-2-3-4-5-6-1.

Analyse thermodynamique

Maints fluides peuvent servir d'absorbant et de réfrigérant. L'ammoniac et l'eau sont les plus répandus et les mieux connus, et l'analyse ci-dessous ne portera donc que sur eux.

Etant donné que la fonction continue est plus compliquée que la fonction intermittente, c'est elle qui sera considérée. Pour faire cette analyse, il faut avoir des diagrammes pression-température pour l'ammoniac et des diagrammes enthalpie-concentration pour les solutions aqueuses d'ammoniac. Tous les manuels de réfrigération contiennent ces diagrammes. Le tableau ci-dessous donne des chiffres tirés de ces diagrammes pour les sept points indiqués dans la figure 2, en supposant que le bouilleur fonctionne à la température de 160 °F (71 °C), que l'on peut obtenir facilement avec l'énergie solaire, l'évaporateur à 20 °F (-7 °C), le condenseur et l'absorbeur à 80 °F (27 °C).

CONDITIONS DE FONCTIONNEMENT D'UNE MACHINE A ABSORPTION A FONCTION CONTINUE AVEC SOLUTION AQUEUSE D'AMMONIAC

| Point de la figure 2 | Température | | Pression relative | | Concentration d'ammoniac (en poids) | Enthalpie | | Débit | |
|----------------------|-------------|----|-------------------|-----|-------------------------------------|-----------|-------|-------|------|
| | F | °C | psi | bar | | Btu/lb | kJ/kg | lb/h | kg/h |
| 1 | 160 | 71 | 140 | 9,6 | 1 | 696 | 1 620 | 1 | 0,5 |
| 2 | 80 | 27 | 140 | 9,6 | 1 | 132 | 307 | 1 | 0,5 |
| 3 | 20 | -7 | 35 | 2,4 | 1 | 132 | 307 | 1 | 0,5 |
| 4 | 20 | -7 | 35 | 2,4 | 1 | 618 | 1 438 | 1 | 0,5 |
| 5 | 80 | 27 | 35 | 2,4 | 0,50 | 18 | 42 | 20 | 9,1 |
| 6 | 80 | 27 | 140 | 9,6 | 0,50 | 17,6 | 40,9 | 20 | 9,1 |
| 7 | 160 | 71 | 140 | 9,6 | 0,47 | 67 | 156 | 19 | 8,6 |

Pour un réfrigérateur classique de 12 ft³ (340 l) en fonctionnement continu, les quantités de chaleur qui doivent être échangées sont les suivantes :

| | Btu/h | kJ/kg | |
|-------------|-------|-------|---------|
| Bouilleur | 2 321 | 5 399 | ajoutée |
| Condenseur | 564 | 1 312 | rejetée |
| Évaporateur | 486 | 1 130 | ajoutée |
| Absorbeur | 2 251 | 5 236 | rejetée |

Les chiffres ci-dessus sont dans les limites de précision permises par des diagrammes de la

dimension d'une page de livre. Pour des valeurs plus précises, il faut utiliser des tableaux ou des diagrammes plus grands.

Le coefficient de performance de cette machine dans les conditions de fonctionnement ci-dessus est d'environ 0,21; la puissance nécessaire à la pompe de circulation du fluide est d'environ 0,003 hp (2 mW).

Une description détaillée d'une machine fondée sur les principes ci-dessus est donnée dans l'article par Assad Takla, page 7.

Chauffage et rafraîchissement solaires des locaux et chauffe-eau solaires

V. G. Bhide

Laboratoire national de physique, New Delhi (Inde)

Introduction

Il a été établi assez sûrement que la productivité de l'être humain est optimale dans certaines conditions ambiantes de température et d'humidité. On estime que les températures optimales sont comprises entre 20 et 25 °C.

En Inde, les conditions climatiques sont très variées. Dans certaines régions, les températures peuvent tomber au-dessous de zéro en hiver, alors que dans d'autres elles peuvent atteindre 45 °C en été. Pour rendre ces conditions plus confortables, il faut normalement chauffer ou rafraîchir les locaux.

Du fait de la crise de l'énergie, des chercheurs partout dans le monde explorent la possibilité d'utiliser l'énergie solaire pour le chauffage ou le rafraîchissement des locaux. En fait, les résultats obtenus au cours des dernières années ont montré que le chauffage et le rafraîchissement solaires des locaux sont non seulement techniquement faisables, mais aussi économiquement concurrentiels. En Inde également, des chercheurs ont étudié la faisabilité du chauffage et du rafraîchissement solaires des locaux. Cet article présente les résultats de projets expérimentaux réalisés en Inde.

Chauffage des locaux

Le premier grand projet expérimental de chauffage des locaux a été réalisé par le Laboratoire national de physique (LNP). Le commanditaire, Bharat Heavy Electricals Ltd. (BHEL), avait constaté que la productivité dans son usine de Haridwar était très faible pendant les mois d'hiver. En vue de déterminer si le chauffage des locaux pourrait l'améliorer, BHEL a proposé au LNP de collaborer à la conception, au montage et à l'évaluation d'un système de chauffage des locaux.

Les principaux objectifs du projet étaient les suivants :

a) Etablir la faisabilité d'un chauffage des lieux de travail dans l'usine;

b) Concevoir un système efficace et économique de chauffage solaire de l'usine;

c) Déterminer le mode de fonctionnement exigeant le minimum d'énergie auxiliaire;

d) Evaluer la performance du système de chauffage et de chacun de ses principaux éléments;

e) Comparer la performance réelle du système aux résultats prédits par un modèle mathématique;

f) Modifier éventuellement le système.

L'usine est un grand bâtiment avec de larges ouvertures. De grosses machines sont installées en divers points et on avait prévu le déplacement d'une grue dans le bâtiment. Cela étant, on a abandonné l'idée de chauffer toute l'usine et on a décidé de ne fournir qu'un chauffage localisé aux ouvriers travaillant devant les machines. Le système de chauffage est schématisé dans la figure 1. Il comprend essentiellement deux cycles : captage de l'énergie et rayonnement de l'énergie. Dans le premier cycle, l'eau circule dans une batterie de capteurs solaires sur le toit de l'usine. L'eau ainsi chauffée est stockée dans un réservoir isolé thermiquement. Dans le deuxième cycle, l'eau chaude circule à travers des radiateurs à serpentin et ventilateur. Les critères conceptuels des deux cycles sont discutés ci-dessous.

Rayonnement de l'énergie

Admettons que le circuit comporte uniquement un réservoir d'eau chaude, une pompe et un radiateur, comme dans la figure 1. Pour analyser la performance et la mettre en équation, on fait les simplifications raisonnables suivantes :

a) La déperdition de chaleur du réservoir est négligeable comparée à la quantité de chaleur rayonnée par le radiateur;

b) Le coefficient de transfert de chaleur est le même pour tous les radiateurs;

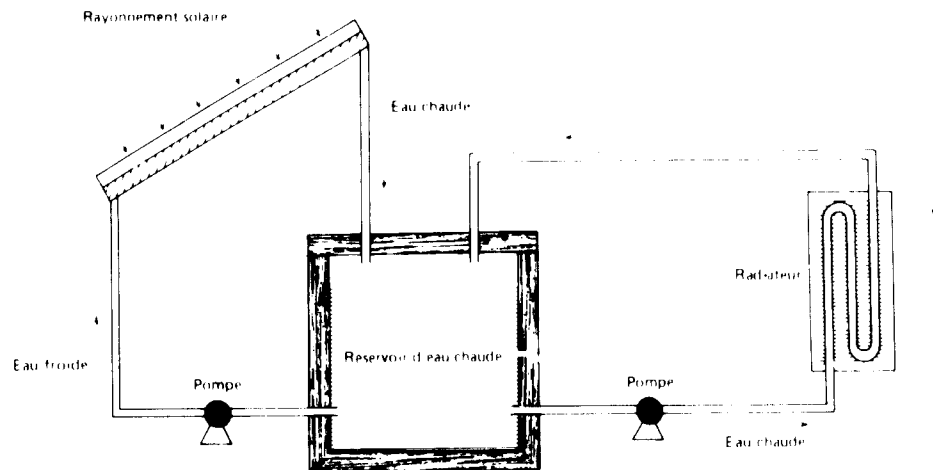


Figure 1. Système de chauffage des locaux

c) Les chaleurs spécifiques de l'eau et de l'air sont constantes dans la gamme de températures envisagée:

d) Pendant la durée du cycle, on n'ajoute et n'enlève pas d'eau au réservoir;

e) La pompe de circulation ne modifie pas la température de la pompe d'eau.

Désignons par M la masse d'eau chaude dans le réservoir plein et par T_0 sa température au début du cycle ($t=0$). Désignons par \dot{m}_w le débit massique d'eau dans le radiateur et par \dot{m}_a le débit massique d'air à travers le radiateur. A mesure que l'eau circule dans le radiateur et échange de la chaleur avec l'air qui le traverse, la température de l'eau dans le réservoir diminue. Soit T la température au temps t . Si la chaleur spécifique de l'eau est C_w et la température de l'eau après son passage dans le radiateur est T_{w2} , nous pouvons écrire :

$$M C_w \frac{dT}{dt} = N \dot{m}_w C_w (T_{w2} - T) \quad (1)$$

N étant le nombre de radiateurs.

Pour trouver comment T_{w2} varie avec T , nous devons considérer l'équilibre de chaleur pendant le processus d'échange. A mesure que l'eau chaude cède de la chaleur à l'air soufflé à travers le radiateur, la température de l'air augmente de la température ambiante T_a à la température T_{a2} . Dans ces conditions, nous avons

$$\dot{m}_w C_w (T - T_{w2}) = \dot{m}_a C_a (T_{a2} - T_a) \quad (2)$$

où C_a est la chaleur spécifique de l'air. Nous pouvons maintenant définir deux paramètres R et ϵ :

$$R \equiv \frac{\dot{m}_a C_a}{\dot{m}_w C_w} \quad (3)$$

$$\epsilon \equiv \frac{T_{a2} - T_a}{T - T_a} \quad (4)$$

Le produit ϵR est le rapport entre la chaleur réellement échangée et la chaleur maximale qui pourrait l'être, que nous considérons comme une caractéristique constante du radiateur, bien que ϵ soit un rapport mettant en jeu les deux variables de notre problème.

En combinant les équations (1), (2), (3) et (4), nous pouvons écrire :

$$M C_w \left(\frac{dT}{dt} \right) + N \dot{m}_w C_w \epsilon R (T - T_a) = 0 \quad (5)$$

qui a pour solution :

$$(T - T_a) = (T_0 - T_a) \exp(-N \dot{m}_w \epsilon R t M) \quad (6)$$

L'équation ci-dessus montre que la température du réservoir diminue exponentiellement avec le temps. Les équations précédentes permettent également de déterminer comment la température de l'air chaud change avec le temps. Grâce à l'équation (4), nous voyons que la température de l'air chaud T_{a2} est donnée par

$$(T_{a2} - T_a) = \epsilon (T_0 - T_a) \exp(-N \dot{m}_w \epsilon R t M) \quad (7)$$

Cette équation montre que la température de l'air chaud diminue elle aussi exponentiellement avec le temps. En définissant un paramètre $a \equiv N \dot{m}_w \epsilon R / M$ et en traçant les courbes de températures du réservoir et de l'air chaud en fonction du temps, on obtient les graphiques des figures 2 et 3. La figure 2 fournit les données conceptuelles. Selon la température que l'on désire assurer après une certaine durée (en l'occurrence à la fin d'une période de 8 heures de travail), on détermine la valeur de a . Connaissant \dot{m}_w , ϵ et R , on peut déterminer la capacité du réservoir.

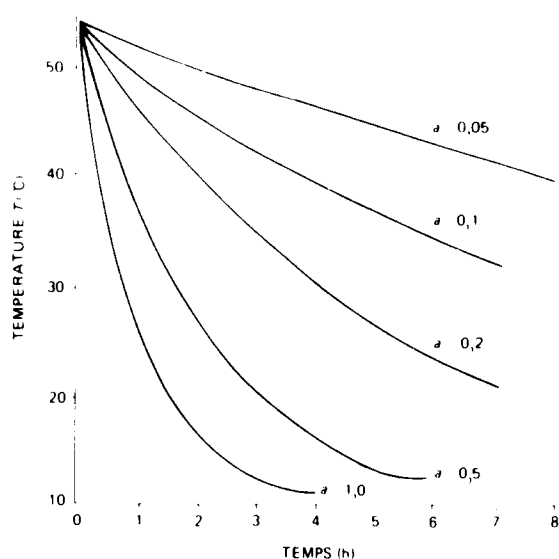


Figure 2. Variation de la température du réservoir avec le temps pour diverses valeurs de a

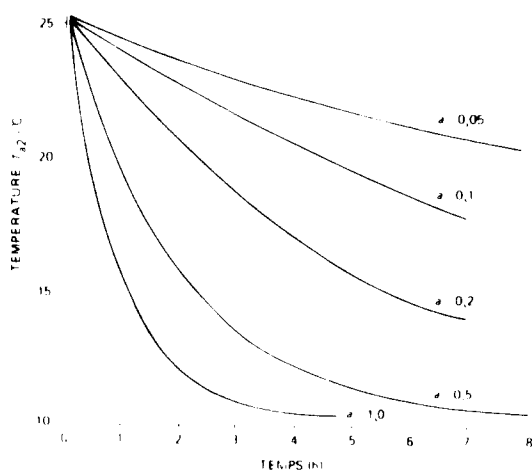


Figure 3. Variation de la température de l'air chaud avec le temps pour diverses valeurs de a

Le tableau 1 donne la performance mesurée du radiateur.

Si l'on veut qu'à la fin de la deuxième période de travail soit 6 heures après le début du cycle de rayonnement la température soit égale à 65 °F (18,3 °C), il faut que a soit égal à 0,150. Avec cette valeur, on peut déterminer la capacité, M , du réservoir d'eau chaude. Pour $\dot{m}_w = 450$ kg/h (990 lb/h) et $\dot{m}_a = 408$ kg/h (900 lb/h), la valeur de M est de 700 l par radiateur. En ce cas, les températures du réservoir et de l'air chaud varieront comme suit :

$$(T - T_a) = (T_0 - T_a) \exp(-0.15 t) \quad (8)$$

et

$$(T_{a2} - T_a) = \epsilon (T - T_a) \quad (9)$$

Ces courbes sont données dans la figure 4.

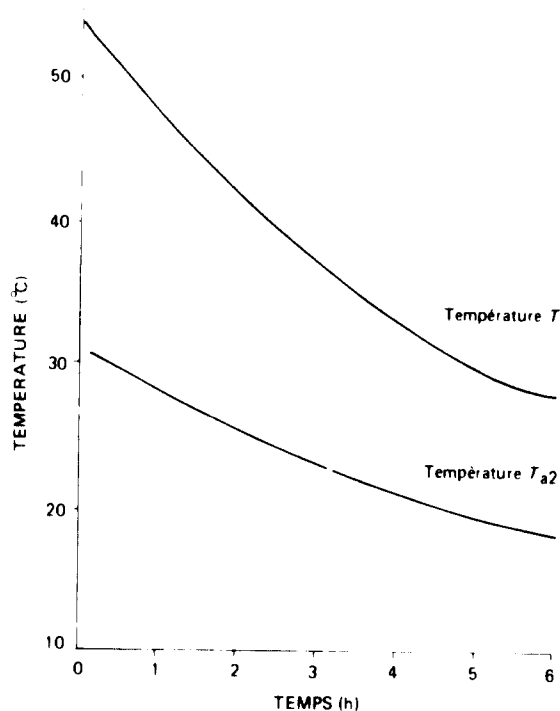


Figure 4. Variation des températures du réservoir et de l'air chaud avec le temps pour $a = 0.15$

TABLÉAU 1. PERFORMANCE DU RADIATEUR

| Numéro de la mesure | Débit massique (kg/h) | | Température de l'eau chaude (°C) | Baisse de la température de l'eau (°C) | Augmentation de la température de l'air (°C) | ϵ | R | ϵR |
|---------------------|-----------------------|-----|----------------------------------|--|--|------------|-------|--------------|
| | Eau | Air | | | | | | |
| 1 | 450 | 408 | 54,4 | 5,8 | 19,0 | 0,49 | 0,218 | 0,106 |
| 2 | 450 | 272 | 54,4 | 4,4 | 19,4 | 0,50 | 0,145 | 0,072 |
| 3 | 180 | 408 | 54,4 | 10,0 | 17,8 | 0,46 | 0,545 | 0,250 |
| 4 | 180 | 272 | 54,4 | 7,2 | 18,3 | 0,47 | 0,343 | 0,161 |
| 5 ^a | 450 | 408 | 60 | 4,7 | 20,3 | 0,45 | 0,218 | 0,098 |
| 6 ^a | 450 | 272 | 60 | 3,3 | 21,1 | 0,47 | 0,145 | 0,068 |

^a Mesures prises dans une pièce fermée.

Ainsi, pour obtenir la température désirée à la fin d'une période de travail, la température du réservoir d'eau au temps $t = 0$ du cycle de rayonnement doit être de 130°F ($54,4^\circ\text{C}$). Connaissant ces paramètres, on peut maintenant déterminer la surface des capteurs solaires.

Captage de l'énergie

Pendant le cycle de captage de l'énergie, l'eau du réservoir circule dans la batterie de capteurs et l'eau chaude est stockée dans le réservoir. Pour une insolation H_f et un coefficient de déperdition de chaleur U_L , il est possible de déterminer, pour un débit donné, la température du réservoir en fonction du temps. On peut montrer que, dans ces conditions, la température du réservoir variera comme suit :

$$(T - T_a) = \frac{H_f}{U_L} (1 - e^{-\beta t}) + P e^{-\beta t}$$

où

$$\beta = \frac{N \dot{m}_w}{M} (1 - e^{-\beta t}),$$

et

$$P = (T - T_a) \text{ at } t = 0.$$

Dans l'équation précédente, β_L est un facteur déterminé par H_f , U_L , la chaleur spécifique, etc.

Etant donné que l'insolation H_f n'est pas constante pendant toute la journée, ce modèle mathématique n'est pas réalisable. Toutefois, il existe une autre méthode pour déterminer la surface des capteurs.

Les capteurs plans utilisés par le LNP dans ses expériences sur le chauffage des locaux sont les mêmes que dans l'expérience sur les pompes solaires (page 57). La figure 5 montre le rendement des capteurs en fonction de leur température pour diverses valeurs de l'insolation. Ces courbes permettent de déterminer le rendement de l'extraction de chaleur à la température désirée ($54,5^\circ\text{C}$) pour diverses valeurs de l'insolation. Lorsqu'on connaît ce rendement et les variations diurnes de l'insolation, il est possible de déterminer le gain utile d'énergie thermique. La figure 6 montre les variations annuelles du gain quotidien d'énergie utile lorsque la chaleur est extraite à 60°C . A partir de cette courbe, il est facile de déterminer la surface de capteurs requise pour fournir 700 l d'eau chaude par radiateur.

Paramètres du système

Les paramètres conceptuels pour assurer une température confortable à 15 lieux de travail dans l'usine étaient les suivants :

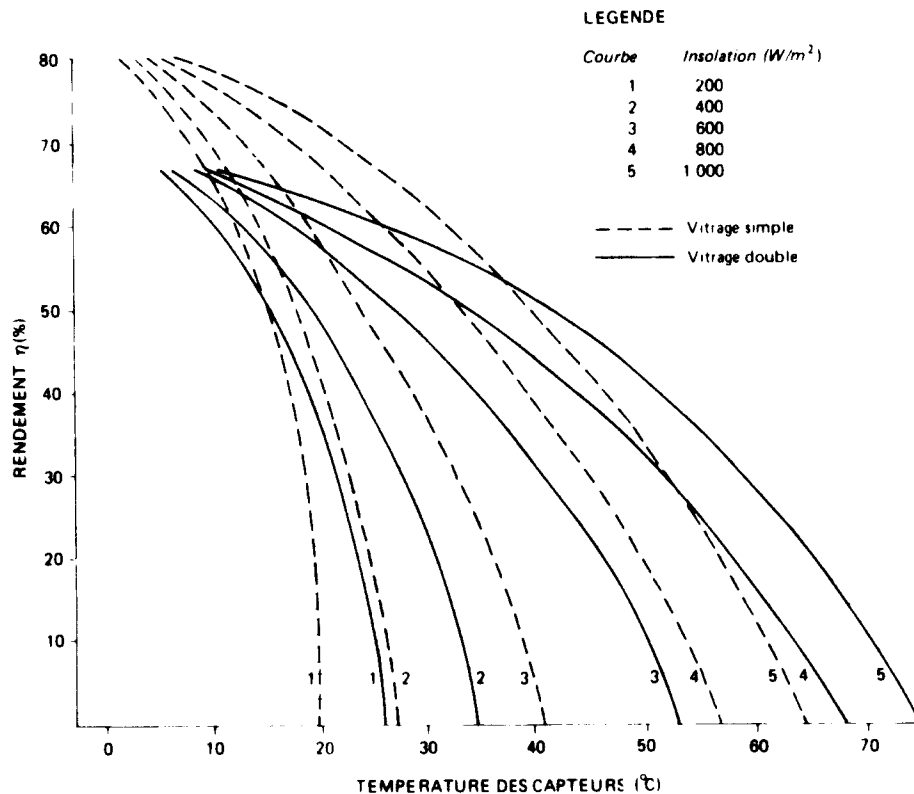


Figure 5. Variation du rendement des capteurs avec leur température

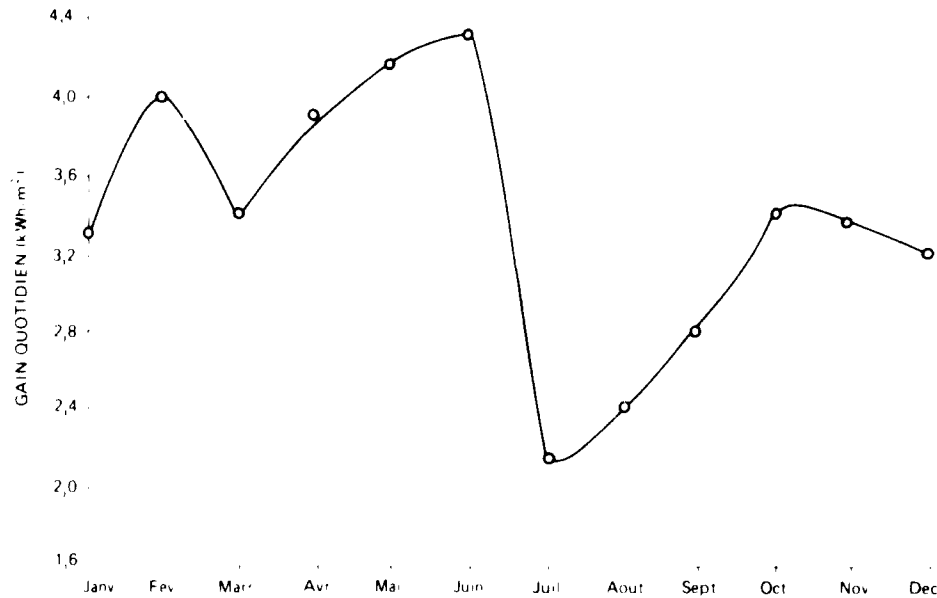


Figure 6. Variation annuelle du gain quotidien d'énergie utile par un capteur à 60 °C

| | |
|---|--------------------------|
| Température ambiante | 50 °F (10 °C) |
| Température initiale de l'eau chaude | 130 °F (54,4 °C) |
| Température initiale de l'air chaud | 80 °F (26,7 °C) |
| Température de l'air chaud après 6 heures | 65 °F (18,3 °C) |
| Radiateur | serpentin et ventilateur |
| Nombre de radiateurs, N | 15 |
| Débit d'eau par radiateur, m_w | 990 lb/h (450 kg/h) |
| Débit d'air, m_a | 900 lb/h (408 kg/h) |
| Valeur de ϵ | 0,49 |
| Valeur de R | 0,218 |
| Valeur de a | 0,15 |
| Surface des capteurs | 105 m² |

La figure 7 donne le schéma de montage de l'installation.

Pendant les premiers 18 mois de fonctionnement, l'installation a donné des résultats très satisfaisants. La figure 8 montre la performance réelle pendant un jour caractéristique.

Chauffage et rafraîchissement combinés des locaux

Cycle de chauffage

Encouragés par ce succès dans le chauffage de lieux de travail dans une usine, nous avons entrepris de concevoir et d'installer un système de chauffage et de rafraîchissement pour une pièce du LNP ayant pour dimensions 6,1 m x 3,7 m x 3,0 m, avec deux portes de 2,1 m x 1,2 m et trois fenêtres de 1 m. Pour le chauffage, on a posé que la température ambiante de 10 °C devait être portée à 25 °C. Pour le rafraîchissement, on a posé que la température ambiante de 35 °C devait être ramenée à 25 °C. On a calculé qu'il fallait fournir environ 9 430 MJ/h

(2 250 kcal/h) à la pièce pendant le cycle de chauffage. La réfrigération nécessaire pendant les mois d'été était à peu près de 12 600 MJ/h (3 000 kcal/h). La différence entre les deux valeurs est due à la nécessité d'un ajustement de l'humidité pendant les mois d'été.

Le schéma de l'installation de chauffage est semblable à celui de la figure 1; l'installation comporte une batterie de capteurs sur le toit du bâtiment, un ballon d'eau chaude calorifugé et un radiateur. Le type de radiateur décrit plus haut a été utilisé dans cette expérience, les valeurs calculées de ϵ et R étant respectivement 0,49 et 0,218.

Dans une expérience typique, l'eau chaude arrivait dans le radiateur à la température de 60 °C, avec un débit de 400 kg/h. Le débit d'air était d'environ 280 kg/h. La température de l'eau tombait à 54 °C. On a obtenu une augmentation d'environ 21 °C de la température de l'air. Ainsi, la perte de chaleur de l'eau, égale à la chaleur fournie à la pièce, a été de 10 055 MJ/h (2 400 kcal/h). Il s'ensuit que la batterie de capteurs devait avoir une surface telle qu'elle puisse fournir 10 055 MJ/h (2 400 kcal/h) à 60 °C. Grâce à une vanne de dérivation à thermostat, l'eau ne peut pénétrer dans le ballon qu'à la température de 60 °C. On a utilisé des capteurs plans à haut rendement. Le gain d'énergie quotidien en sept heures de fonctionnement durant l'hiver à Delhi est le suivant :

| Mois | Gain d'énergie (kWh/m²) |
|----------|-------------------------|
| Novembre | 3,5 |
| Décembre | 3,1 |
| Janvier | 3,3 |
| Février | 4,0 |
| Moyenne | 3,5 |

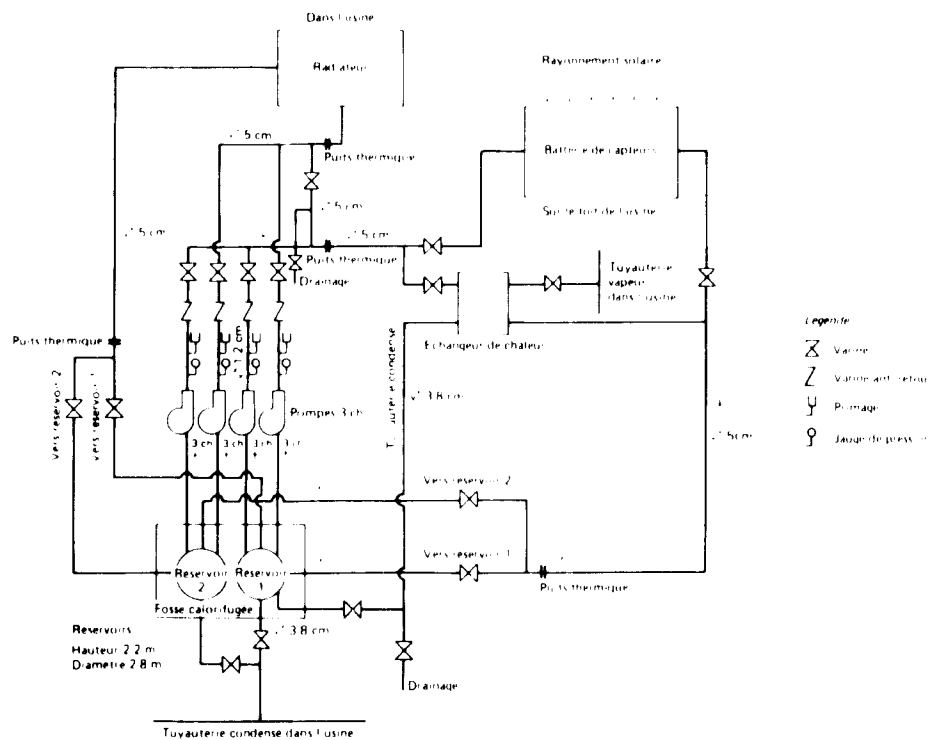


Figure 7. Installation de chauffage solaire à Haridwar: schéma de montage

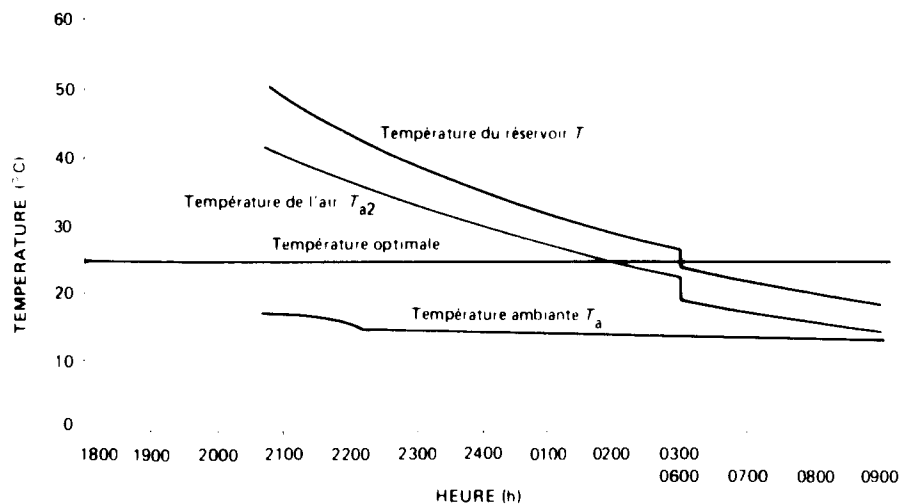


Figure 8. Cycle de rayonnement à Haridwar, 6 février 1976

Le gain d'énergie horaire était donc en moyenne de 0,5 kWh, soit environ $1\,800\text{ MJ h}^{-1}\text{ m}^{-2}$. Ainsi, pour obtenir un gain d'énergie utile d'environ 9 430 MJ/h, il faut 5 m^2 de capteurs. On peut résumer comme suit les paramètres de l'appareil de chauffage :

Surface de capteurs
Radiateur

5 m^2
serpentin et
ventilateur

| | |
|---|----------|
| Valeur de ϵ | 0,49 |
| Valeur de R | 0,218 |
| Débit d'eau dans les capteurs | 400 kg/h |
| Température de l'eau à l'entrée du radiateur | 60 °C |
| Débit d'air à travers le radiateur | 280 kg/h |
| Température de l'eau à la sortie du radiateur | 54 °C |
| Augmentation de la température de l'air | 21 °C |

La figure 9 montre la performance satisfaisante du système de chauffage pendant une journée typique.

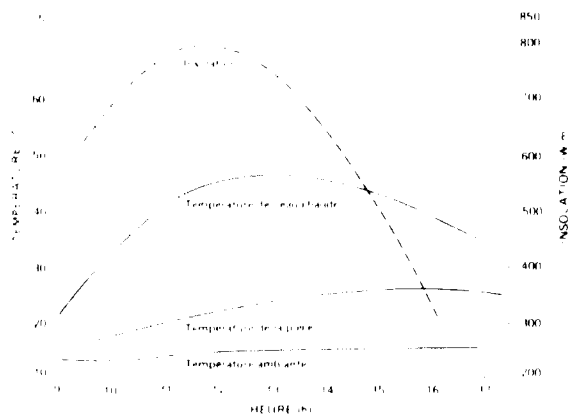


Figure 9. Performance du système de chauffage au L.N.P. 1er février 1977

Cycle de rafraîchissement

Ce cycle est plus compliqué que le cycle de chauffage. Il existe essentiellement trois méthodes de réfrigération :

- Déshumidification et refroidissement par évaporation;
- Compression de vapeur;
- Absorption de vapeur.

Dans la méthode de déshumidification-évaporation, l'air de la pièce est déshumidifié par un absorbant; cette opération est suivie d'une évaporation adiabatique, avec désorption de l'absorbant dans un capteur plan ouvert à l'air ambiant. Cette méthode est efficace lorsque l'humidité est très forte, mais elle ne l'est pas lorsque l'humidité est faible. Un autre inconvénient est qu'il ne peut y avoir intégration au système de chauffage.

La méthode par compression de vapeur est hors de question, car elle exige l'emploi d'un compresseur.

Dans une machine frigorifique solaire, on dispose d'énergie thermique à des températures allant jusqu'à 100 °C. De ce fait, la méthode par absorption de vapeur est la plus appropriée.

Les principaux éléments d'une machine à absorption sont indiqués dans la figure 10. On utilise un mélange réfrigérant-solvant. Ce mélange est chauffé dans le bouilleur par de l'eau chauffée dans des capteurs solaires; le réfrigérant se dégage en phase gazeuse, avec une petite quantité de vapeur de solvant. Ce mélange de vapeurs, avec peut-être une petite quantité de solution, pénètre dans le séparateur, où la vapeur de solvant est condensée et séparée. Le réfrigérant pénètre ensuite dans le condenseur où il se liquéfie. Le liquide est envoyé à travers une vanne de régulation dans l'évaporateur. Là, il absorbe la chaleur latente de la solution présente et produit le froid désiré. De l'évaporateur, la vapeur de réfrigérant est transportée par un gaz

(normalement de l'hydrogène) dans l'absorbeur, où elle est de nouveau absorbée par la solution. La solution ainsi obtenue est envoyée dans le bouilleur et le cycle recommence.

Il faut apporter un soin particulier au choix de la combinaison réfrigérant-solvant et aux opérations suivantes : passage de la solution de l'absorbeur dans le bouilleur, séparation de la vapeur de réfrigérant, condensation de la vapeur de réfrigérant, passage de l'évaporateur dans l'absorbeur. Le produit des rendements individuels de ces opérations détermine le rendement final.

Les combinaisons réfrigérant/solvant les plus communément utilisées sont les suivantes : ammoniac/eau, eau/bromure de lithium et fluoralcane/tétra-éthylène-glycol. La qualité la plus importante du mélange réfrigérant/solvant est que le solvant soit capable d'absorber une grande proportion du réfrigérant. Pour une réfrigération donnée, plus forte sera la concentration du réfrigérant dans le solvant et plus faible devra être le débit entre l'absorbeur et le bouilleur. Il est bien connu que plus grande est l'absorption de réfrigérant dans le solvant et plus grande est la déviation négative de la loi de Raoult; ceci implique également qu'il y a un lien plus étroit entre les molécules de réfrigérant et les molécules de solvant. Ce lien plus étroit signifie que le bouilleur devra fournir davantage de chaleur pour vaporiser le réfrigérant. La combinaison réfrigérant/solvant la plus généralement utilisée est la solution aqueuse d'ammoniac, qui présente plusieurs avantages sur les autres combinaisons. Le pouvoir frigorifique de l'ammoniac est assez élevé. Les températures que l'on peut obtenir avec des capteurs plans et des solutions aqueuses d'ammoniac sont suffisantes pour le

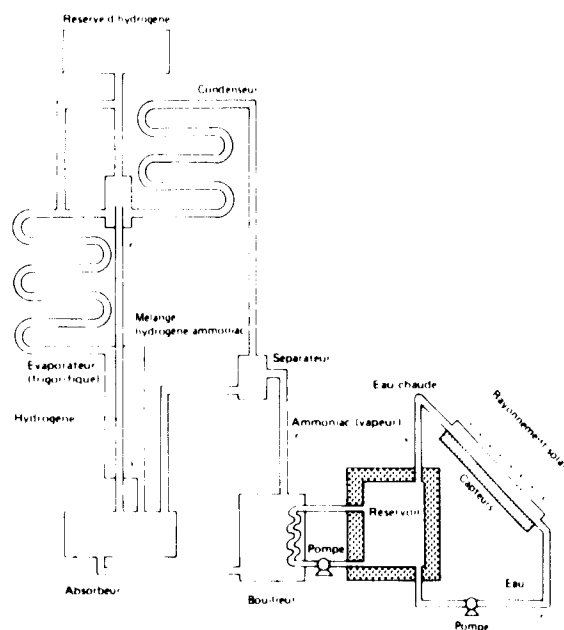


Figure 10. Machine frigorifique à absorption

fonctionnement du système. Ces avantages et quelques autres ont incité à choisir une solution aqueuse d'ammoniac pour la machine frigorifique construite au LNP.

Contraintes conceptuelles

Comme indiqué plus haut, le transfert de chaleur doit s'élever à 12 600 MJ/h (3 000 kcal/h). L'appareil a été conçu à cette fin. Le même radiateur à serpentin et ventilateur a été utilisé pour le chauffage et pour le rafraîchissement. L'eau froide circule dans le serpentin, sur lequel de l'air est soufflé. Le débit d'eau dans le serpentin a été maintenu à 400 kg/h, comme pour le chauffage. L'eau froide entre à 10 °C et sort à 18 °C. Le débit d'air est de 280 kg/h. La température de l'air baisse de 35 °C à 25 °C. Le refroidissement de l'air entraîne également un changement du degré hygrométrique.

Dans le cycle à absorption, la chaleur est absorbée dans le bouilleur et l'évaporateur et libérée dans l'absorbeur et le condenseur. Les températures de ces éléments entraînent d'autres contraintes. Dans les régions septentrionales de l'Inde en été, l'eau de refroidissement peut être obtenue à 30 °C, même dans des conditions extrêmes. Par conséquent, on a choisi pour l'absorbeur et le condenseur des températures de 30 °C. Etant donné que la solution aqueuse d'ammoniac est chauffée dans le bouilleur par l'eau venant des capteurs solaires, la température maximale était de 90 °C. Une fois que les

températures du bouilleur, du condenseur et de l'absorbeur sont fixées, celle de l'évaporateur est déterminée automatiquement. Dans l'appareil décrit, la température de l'évaporateur doit être de 10 °C.

Paramètres conceptuels

La figure 11 donne le schéma de l'installation. L'eau chauffée par l'énergie solaire est stockée dans un réservoir calorifugé à la température de 92 °C. Pour ce faire, on monte une vanne de dérivation à thermostat dans le circuit, à la sortie des capteurs. Cette eau chaude est ensuite envoyée dans le bouilleur; elle pénètre par le haut et sort par le bas, à une température de 85 °C. Le débit est maintenu à 5 l/mn. Le serpentin dans le bouilleur contient une solution aqueuse d'ammoniac fortement concentrée. Le débit de la solution aqueuse d'ammoniac (51 % d'ammoniac) est de 2 kg/mn. Dans le bouilleur, l'ammoniac se dégage en phase gazeuse à raison de 0,2 kg/mn; ce gaz, mélangé à 1,8 kg de solution (41 %, ou 0,82 kg d'ammoniac), pénètre dans le séparateur à 85 °C. La solution faiblement concentrée s'écoule, par le bas du séparateur, vers l'échangeur de chaleur. Du séparateur, l'ammoniac gazeux (0,2 kg/mn) pénètre au niveau intermédiaire de l'analyseur, qui contient une solution fortement concentrée d'ammoniac. Dans l'analyseur, toute trace de vapeur d'eau dans l'ammoniac gazeux est éliminée. L'ammoniac déshydraté sort de l'analyseur à la température de 78 °C (avec un débit d'environ

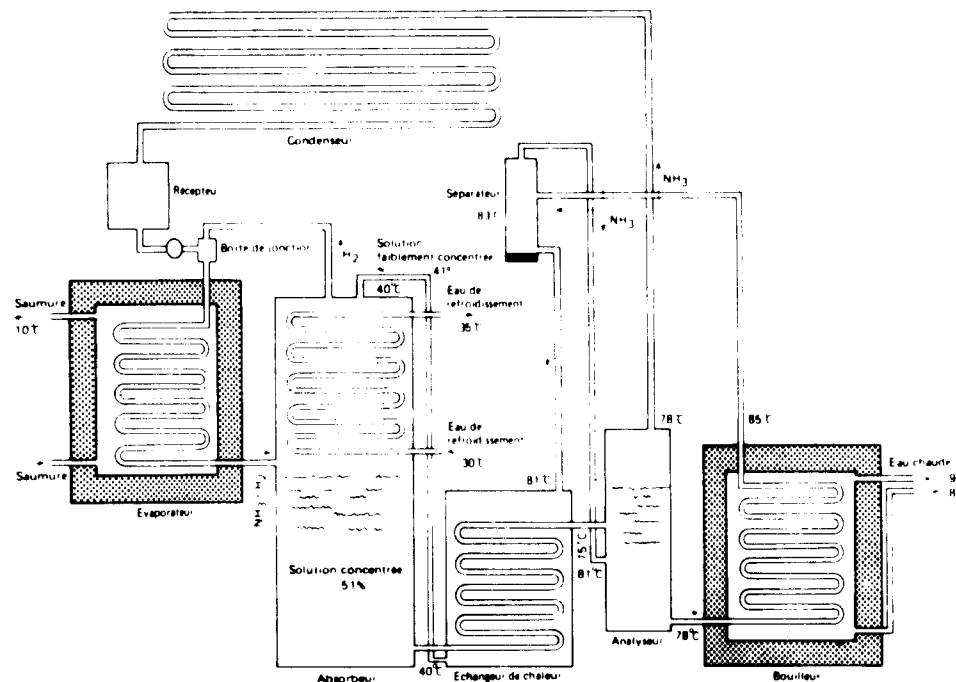


Figure 11. Système de réfrigération solaire

0,2 kg/mn) et pénètre dans le condenseur. Celui-ci est refroidi par de l'eau à 30 °C et l'ammoniac se condense à une température d'environ 35 °C. Pendant le processus de condensation, l'extraction de chaleur par l'eau froide du condenseur s'élève à 242 000 MJ/mn (57 700 kcal/mn). L'ammoniac liquide passe du condenseur dans le récepteur. Il traverse ensuite un registre, puis est mélangé à de l'hydrogène dans la boîte de jonction. Le mélange hydrogène-ammoniac pénètre dans l'évaporateur, où l'ammoniac s'évapore. Le mélange ammoniac gazeux/hydrogène est plus lourd et il descend donc dans l'absorbeur. Celui-ci est refroidi par de l'eau à 30 °C. L'ammoniac qui y pénètre se mélange avec la solution, et la solution concentrée (51 % d'ammoniac) tombe au fond de l'absorbeur. Cette solution concentrée pénètre dans l'échangeur de chaleur, où il y a échange de chaleur avec la solution moins concentrée qui vient du séparateur à 80 °C. Du fait de cet échange de chaleur, la température de la solution concentrée s'élève à 75 °C; la solution concentrée pénètre dans l'analyseur et une quantité égale de solution est transférée de l'analyseur au bouilleur pour recommencer le cycle. Toute l'installation est maintenue à une pression de 12,1 bars (175 psia). L'hydrogène sert de moyen de transport; il aide à

déplacer la vapeur d'ammoniac de l'évaporateur dans l'absorbeur et sert également à réduire la pression partielle de l'ammoniac à 5,2 bars (75 psia). C'est à cause de cette réduction de la pression partielle que le point d'ébullition de l'ammoniac dans l'évaporateur est d'environ 5 °C.

Le gain d'énergie quotidien pendant une période de 7 heures en été est le suivant :

| Mois | Gain d'énergie (kWh/m ²) |
|---------|---|
| Avril | 3,0 |
| Mai | 3,4 |
| Juin | 3,8 |
| Moyenne | 3,4 |

Le gain horaire d'énergie utile est donc en moyenne d'environ 0,5 kWh/m². De ce fait, il faut 7 m² de capteurs pour produire le froid désiré. On voit donc que la surface des capteurs doit être à peu près la même pour le chauffage et pour le rafraîchissement des locaux. Les radiateurs sont également les mêmes pour les deux cycles. Un tel appareil de chauffage et de rafraîchissement combinés est à l'essai. Le cycle de chauffage a été essayé avec succès et on espère essayer prochainement le cycle de rafraîchissement.

Données préliminaires pour une maison solaire à Riyad

A. A. M. Sayigh et E. M. A. El-Salam

Collège d'ingénierie, Riyad (Arabie saoudite)

L'une des principales applications de l'énergie solaire est dans le logement. Le chauffage et le rafraîchissement des locaux et l'utilisation des appareils ménagers représentent plus de 20 % de la consommation d'énergie en Europe, au Japon et aux Etats-Unis¹ et près de 50 % dans les pays en développement. C'est dans les pays en développement que le besoin de maisons solaires se fait le plus sentir, essentiellement afin d'économiser de l'énergie à des fins plus vitales.

L'Arabie saoudite étant le pays du monde où l'énergie solaire est le plus constamment et le plus abondamment disponible², la conception et la construction de maisons solaires dans ce pays permettraient d'économiser de l'énergie sur le plan national et signifieraient que l'on peut construire des maisons dans des régions écartées du pays où les formes classiques d'énergie sont inexistantes ou ne sont pas économiques. On a donc fait une étude pour déterminer les meilleurs moyens de construire des maisons solaires dans la région de Riyad. Cette étude traite des matériaux de construction, des appareils de climatisation, de la production d'électricité et des coûts. Ses conclusions sont discutées ci-après.

Riyad est située pratiquement au centre du pays, par 24° 42' de latitude nord et 46° 43' de longitude est. Elle est à une altitude d'environ 600 m et a une population d'environ 750 000 habitants. Les précipitations annuelles sont faibles (environ 50 mm) et l'humidité relative moyenne est de 30 %. La figure 1 montre les températures maximale et minimale moyennes et l'insolation totale à Riyad³, ainsi que les

¹C. A. Berg, "A technical basis for energy conservation", *American Society of Mechanical Engineers, Quarterly Transactions*, vol. 98, n° 5 (mai 1974), p. 30-42.

²A. A. M. Sayigh, "Saudi Arabia and its energy resources", Communication présentée à la Conférence internationale sur l'énergie solaire, COMPLES, University of Petroleum and Minerals, Dhahran, 1-5 novembre 1975; "The Energy prospects in the Arab World", Communication présentée à la Conférence internationale sur l'ingénierie mécanique, University of Engineering and Technology, Lahore, Pakistan, 6-11 octobre 1975.

³J. A. Sabbagh, A. A. M. Sayigh et E. M. A. El-Salam, "Estimation of the total solar radiation from meteorological data", Communication présentée à la Conférence de l'ISES, Los Angeles, 28 juillet-1er août 1975.

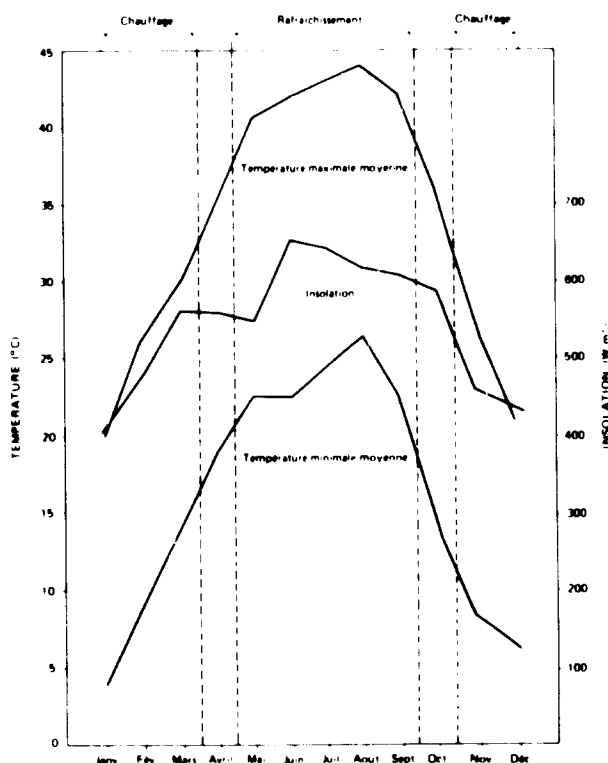


Figure 1. Epoque de chauffage et de rafraîchissement des locaux à Riyad

mois pendant lesquels le chauffage ou le rafraîchissement des locaux sont nécessaires. En été, la consommation d'électricité augmente à cause du besoin de réfrigération; en hiver, c'est la consommation de gaz qui augmente à cause du chauffage.

Matériaux de construction

Plusieurs matériaux de construction locaux ont été essayés pour déterminer leur résistance et leur convenance pour une maison solaire : briques d'argile avec et sans paille, briques d'argile cuites à 1 000 °C

TABLEAU 1. PROPRIÉTÉS DE BRIQUES FAITES EN ARGILE DE NASIRIA (ÉCHANTILLON A)

| Numéro | Type ^a | Poids (kg) | Dimensions (cm) | Surface transversale (cm ²) | Résistance à l'écrasement (kg) | Résistance à la compression (kg/cm ²) | Teneur en eau (% en poids) |
|--------|----------------------|------------|-----------------|---|--------------------------------|---|----------------------------|
| 1 | Cube sans paille | 5,119 | 14,5 x 14,3 | 217,35 | 3 700 | 17,84 | 2,85 |
| 2 | Cube avec paille | 4,503 | 14,8 x 14,0 | 207,2 | 970 | 4,44 | 2,61 |
| 3 | Cylindre avec paille | 6,672 | 15,0 diam. | 176,63 | 570 | 3,22 | 3,34 |
| 4 | Cylindre avec paille | 6,519 | 15,0 diam. | 176,63 | 1 480 | 8,37 | 3,4 |
| 5 | Cylindre sans paille | 7,895 | 14,5 diam. | 165,05 | 700 | 4,24 | 5,47 |

^a Les proportions de mélange, d'après une vieille formule utilisée autrefois pour la constructions d'habitations à Riyad, étaient (% en poids) a) avec paille : argile, 73,4; eau, 25,5; paille, 1,1; b) sans paille : argile, 77,5; eau, 22,5.

TABLEAU 2. PROPRIÉTÉS DE BRIQUES FAITES EN ARGILE DE MANFOHA (ÉCHANTILLON B)

| Numéro | Type | Poids (kg) | Dimensions (cm) | Surface transversale (cm ²) | Résistance à l'écrasement (kg) | Résistance à la compression (kg/cm ²) | Teneur en eau (% en poids) |
|--------|----------------------|------------|-----------------|---|--------------------------------|---|----------------------------|
| 1 | Cube sans paille | 4,465 | 13,8 x 13,6 | 187,68 | 4 920 | 27,03 | 2,82 |
| 2 | Cube avec paille | 4,261 | 14,2 x 14,00 | 198,8 | 1 820 | 9,154 | 2,77 |
| 3 | Cylindre sans paille | 6,976 | 13,9 diam. | 151,67 | 2 570 | 16,94 | 2,81 |
| 4 | Cylindre avec paille | 6,315 | 14,5 diam. | 165,05 | 770 | 4,66 | 2,9 |
| 5 | Cylindre avec paille | 6,155 | 14,5 diam. | 165,05 | 630 | 3,82 | 2,9 |

TABLEAU 3. PROPRIÉTÉS DE L'ÉCHANTILLON C (ARGILE CUITE À 1 000 °C) ET DE L'ÉCHANTILLON D (BLOC DE CIMENT CREUX)

| Echantillon | Type | Poids (kg) | Dimensions (cm) | Surface transversale (cm ²) | Résistance à l'écrasement (kg) | Résistance à la compression (kg/cm ²) | Teneur en eau (% en poids) |
|-------------|------|------------|-----------------|---|--------------------------------|---|----------------------------|
| C | Cube | 0,372 | 6 x 5,8 x 5,9 | 34,8 | 4 200 | 120 | 0,0 |
| D | Bloc | 23,25 | 40 x 20 x 20 | 800 | 18 160 | 22,7 | 0,0 |

et blocs de ciment partiellement creux. Les tableaux 1 à 3 montrent les propriétés de ces divers matériaux.

Plusieurs échantillons de matériaux de construction ont été exposés toute une journée au rayonnement solaire; les températures ont été enregistrées comme indiqué par la figure 2. Le tableau 4 donne les résultats d'expériences sur les pouvoirs d'émission et d'absorption de ces matériaux.

Pour connaître les effets de la pluie et de l'érosion sur les matériaux de construction, on a fait couler de l'eau continuellement pendant 24 heures sur tous les échantillons. Ils ont également été soumis

TABLEAU 4. POUVOIRS D'ÉMISSION ET D'ABSORPTION DE DIVERS MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION

| Matériau | Emission | Absorption |
|---------------------------|----------|------------|
| Briques cuites à 1 000 °C | 0,75 | 0,75 |
| Briques d'argile | 0,67 | 0,65 |
| Blocs de ciment | 0,90 | 0,90 |
| Tuiles de toit | 0,9 | 0,9 |

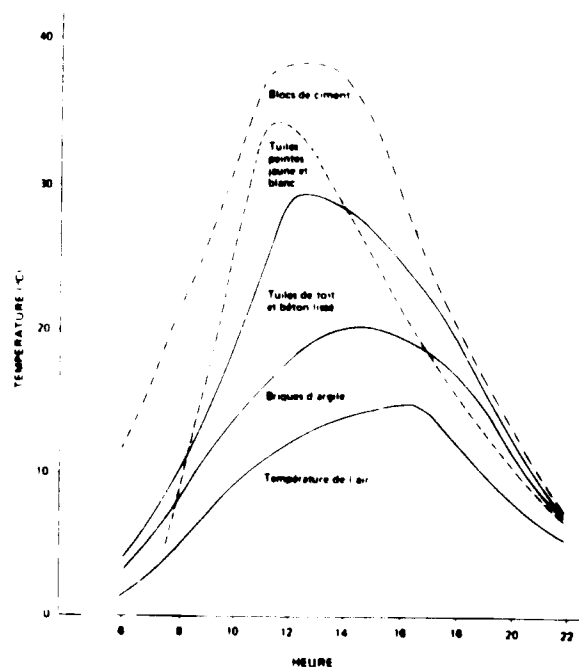


Figure 2. Températures superficielles de divers matériaux de construction

pendant 24 heures à l'effet de sable sec projeté par une machine à une vitesse modérée (30 km/h). Les résultats de ces essais sont donnés au tableau 5.

TABLAU 5 EFFETS DE LA PLUIE ET DE L'ÉROSION SUR DES MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION

| Echantillon | Quantité de pluie absorbée | Erosion |
|-------------|-----------------------------|---------|
| A | | |
| Avec paille | Moyenne | Faible |
| Sans paille | Importante (désintégration) | Faible |
| B | | |
| Avec paille | Moyenne | Faible |
| Sans paille | Importante | Faible |
| C | Nulle | Nulle |
| D | Très faible | Nulle |

Appareils de climatisation

De toutes les applications que l'énergie solaire peut recevoir dans les pays tropicaux, le chauffage et la réfrigération sont les plus faisables. En été, le rayonnement solaire est intense et peut être utilisé pour la réfrigération; en hiver, une batterie de capteurs plans peut fournir plus de chaleur qu'il n'en faut réellement.

Réfrigération

Plusieurs systèmes de réfrigération ont été essayés. Une machine frigorifique à absorption au bromure de lithium, de 3 tonnes, a été utilisée par Ward et Löf⁴ dans leur ensemble résidentiel. Cette machine a été modifiée pour utiliser l'eau chaude, au lieu de gaz naturel, comme source de chaleur pour le bouilleur. Une machine à absorption à solution aqueuse d'ammoniac a été utilisée pour la réfrigération dans un projet en Californie⁵. Il existe de nombreuses monographies décrivant d'autres projets⁶.

Le refroidissement nocturne a été étudié en mesurant la température de diverses surfaces pendant la nuit (voir les figures 3 et 4). Jones⁷ suggère que,

⁴D. S. Ward et G. O. G. Löf, "Design and construction of a residential solar heating and cooling system", *Solar Energy*, vol. 17, n° 1 (1975), p. 13-20.

⁵University of California, Lawrence Berkeley Laboratory, *Control System for Combined Solar Heating and Cooling Systems*, Progress Report No. 1, janvier 1975.

⁶Par exemple, R. L. Oonk, W. A. Beckman et J. A. Duffie, "Modeling of the CSU heating/cooling system", *Solar Energy*, vol. 17, n° 1 (1975), p. 21-28; G. O. G. Löf et R. A. Tybout, "The design and cost of optimized systems of residential heating and cooling by solar energy", *Solar Energy*, vol. 16, n° 1 (1974), p. 9-18.

⁷W. P. Jones, *Air conditioning Engineering*, 2e éd., Arnold, 1973.

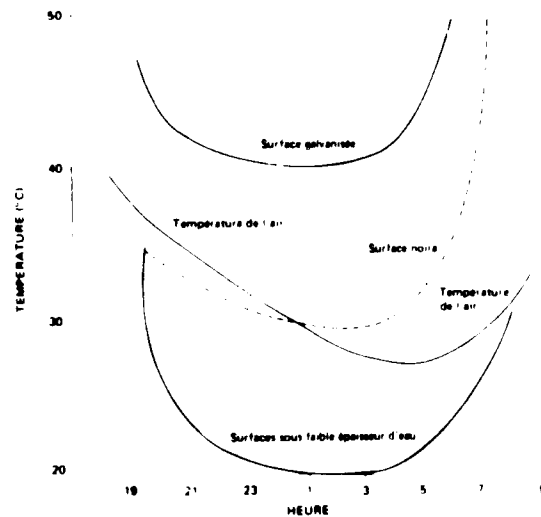


Figure 3. Températures de diverses surfaces dans la nuit du 18 juin 1975

pour être confortable, la température à l'intérieur devrait être inférieure de 4-11 °C à la température extérieure, avec une humidité relative d'environ 50 %. Le meilleur moyen d'obtenir un bon rafraîchissement nocturne consiste à utiliser des surfaces recouvertes d'une mince épaisseur (2-5 cm) d'eau, comme indiqué par la figure 3. Une température inférieure en moyenne de 10 °C à la température ambiante a été ainsi enregistrée pendant sept heures durant la nuit. Bahadori⁸ a indiqué qu'en faisant circuler l'air extérieur à Shiraz pendant deux heures de nuit (de 2 h à 4 h) à une vitesse moyenne de 9,1 m/mn à travers un empilement de pierres ayant un volume de 39,4 m³, la température des pierres pouvait tomber à la température minimale moyenne de l'air, qui était d'environ 17,8 °C. A Riyad, en utilisant la température minimale dans un bassin contenant de l'eau, soit 20 °C pendant l'été, et avec un débit de 10 m/mn, un empilement de pierres de 160 m³ peut être refroidi à cette température pendant la nuit. Si la chaleur est emmagasinée partiellement dans l'eau et partiellement dans la pierre et si le réservoir d'eau a une capacité de 30 m³, il faut 66,4 m³ de pierres.

La maison proposée a une surface au sol de 100 m² et une hauteur de 3 m. Elle comprend deux chambres, une salle de bains, une cuisine, un grenier et une cave de 3 m de profondeur sous toute la maison.

Si l'on prend en considération les conditions ambiantes, le type de construction, les portes et fenêtres, l'éclairage et l'aménagement de la maison, le nombre d'occupants et les exigences de ventilation, on constate que le rafraîchissement de cette maison

⁸M. N. Bahadori, "A feasibility study of solar heating in Iran", *Solar Energy*, vol. 15, n° 1 (mai 1973).

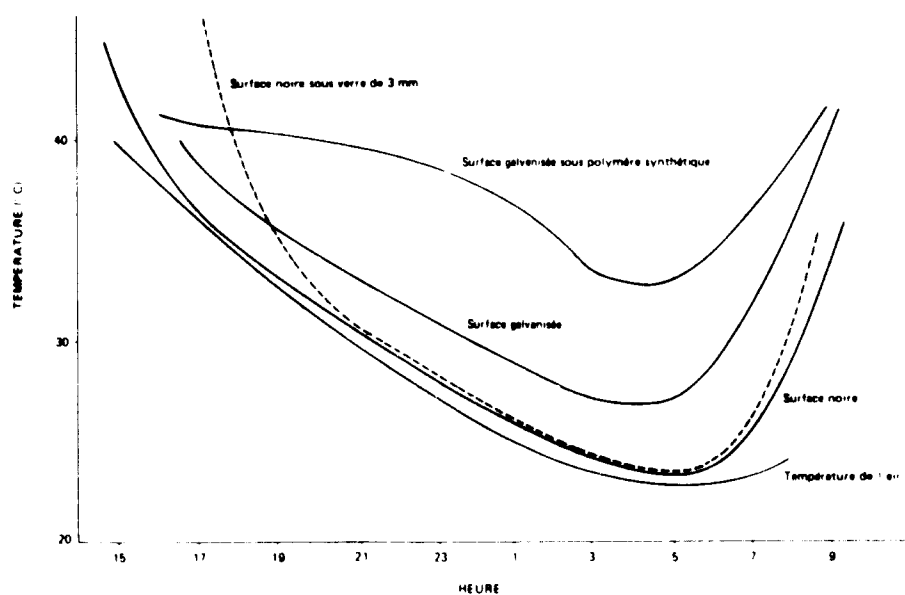


Figure 4. Températures de diverses surfaces dans la nuit de 2 septembre 1975

exige 3 tonnes de réfrigération (10,56 kW). Dans la région de Riyad, ce chiffre représente une charge de pointe d'environ 40 W/m^3 . Après 10 heures de fonctionnement, l'énergie totale dissipée s'élève à $3,3 \times 10^8 \text{ J}$, à un taux moyen de 9 kW. Ces données permettent de calculer que la température dans la maison sera de $21,56^\circ\text{C}$, soit une augmentation de $1,56^\circ\text{C}$, ce qui est tolérable.

La figure 5 schématise l'installation de rafraîchissement nocturne.

Chauffage

Un bon matériau de stockage : *a)* a un pouvoir calorifique élevé; *b)* est hautement cinétique, c'est-à-dire que la chaleur peut en être extraite rapidement; *c)* ne gèle pas; *d)* ne provoque pas la corrosion de son conteneur.

La chaleur peut être stockée sous les formes suivantes :

a) Chaleur sensible dans un liquide ou un solide. Exemples : l'eau à condition que la température soit maintenue entre 0 et 100°C ; la roche, qui est peu coûteuse, mais dont la chaleur spécifique n'est que le quart de celle de l'eau, ce qui signifie qu'il faut une masse de roches quatre fois plus grande pour la même capacité de stockage; la paraffine C_{15} , dont le point de fusion est de $5-10^\circ\text{C}$ et le pouvoir calorifique est 28 fois supérieur à celui du même volume d'eau;

b) Chaleur latente de fusion, par exemple celle d'une solution peu coûteuse de sel dans l'eau. Un gros inconvénient est la stratification lors de la fusion et du gel;

c) Chaleur de transition en phase solide, par exemple dans l'oxyde de vanadium ou le sulfure de fer. Dans ce dernier cas, la transition a lieu à 138°C , la capacité de stockage est de 230 kJ/l ;

d) Chaleur d'une réaction réversible, par exemple dans le système à acide sulfurique dans deux vases, l'un à faible concentration et l'autre à forte concentration. On utilise les réactions réversibles entre l'acide et l'eau pour stocker et récupérer la chaleur.

La figure 6 donne un schéma de chauffage solaire utilisant l'eau et la roche pour le stockage de la chaleur sensible et une batterie de piles solaires pour produire de l'électricité.

Production d'électricité

Compte tenu de tous les besoins de la maison : éclairage, appareils ménagers, pompes et ventilateurs, la puissance électrique nécessaire a été évaluée à 1 kW. Le système de production de courant électrique (batterie de capteurs, accumulateur, régulation et alternateur) a été conçu pour obtenir cette puissance. On a retenu les facteurs suivants :

| | |
|--|-------|
| Ensoleillement moyen (heures par jour) | 10 |
| Rapport d'ensoleillement = (fraction du temps d'ensoleillement) \times (facteur d'angle d'incidence) | 0,2 |
| Rendement de l'accumulateur | 0,834 |
| Rendement de l'alternateur | 0,65 |
| Facteur de pertes | 0,9 |

Quatre batteries de piles solaires aux silicones de 24 V, ayant chacune une puissance de 89 W, ont été montées en parallèle. Chaque batterie a une surface d'environ 3 m^2 ; elles sont montées sur le toit de la

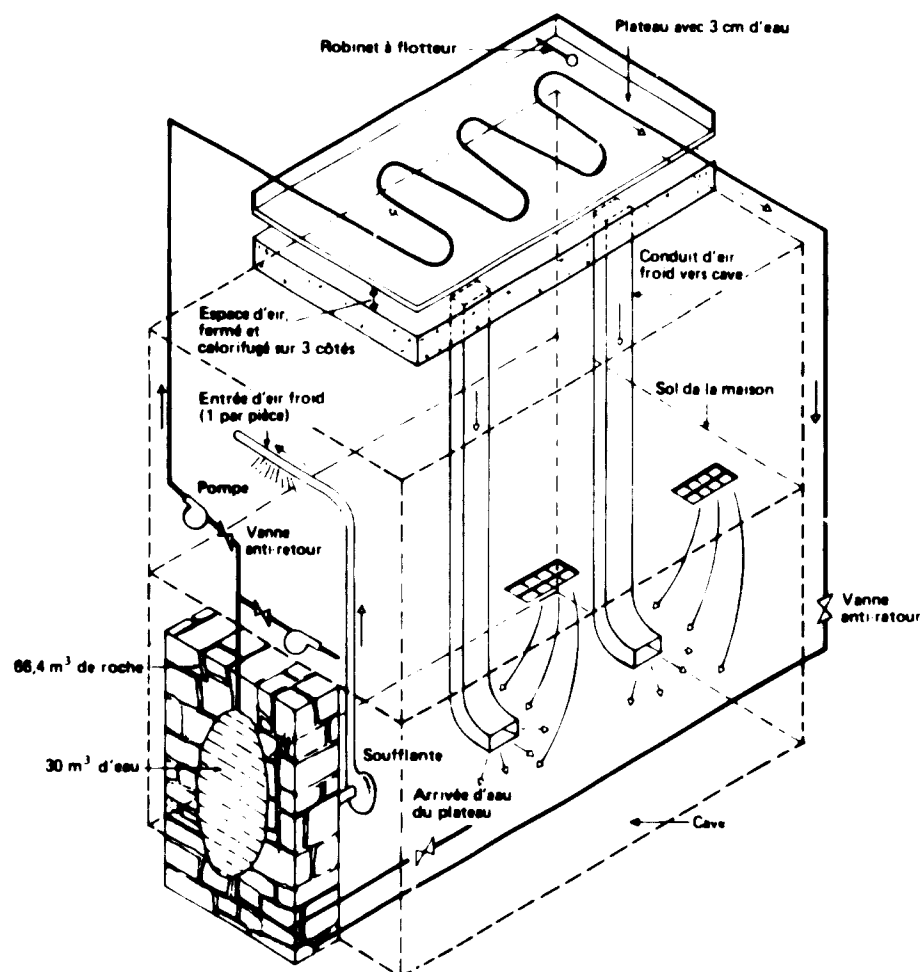


Figure 5. Installation de rafraîchissement nocturne

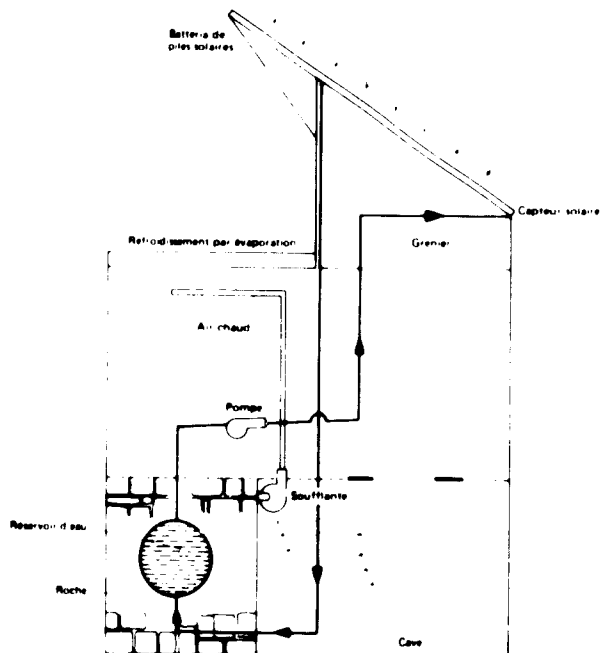


Figure 6. Installation de chauffage solaire

maison, face au sud, avec un angle de 35° sur l'horizontale. L'accumulateur, de 24 V, est au plomb-acide et a une capacité de 12 kWh. L'alternateur fournit du courant monophasé de 50 Hz, sous 110-120 V; sa puissance est de 500 VA.

Cette installation est schématisée dans la figure 7. Quand le soleil brille, le courant produit passe à travers la diode pour charger l'accumulateur et actionner l'alternateur. La diode de blockage empêche le courant de l'accumulateur de retourner vers les piles solaires et d'y être consommé lorsqu'elles ne reçoivent pas de rayonnement solaire, la nuit ou par temps couvert.

Analyse des coûts

Une maison solaire coûte encore plus cher qu'une maison ordinaire, surtout à cause du coût élevé de l'énergie électrique nécessaire dans une maison solaire. Le coût d'une maison solaire est ventilé ci-dessous (en milliers de rials saoudiens)⁹ :

⁹ 1 dollar = 3,5 rials saoudiens

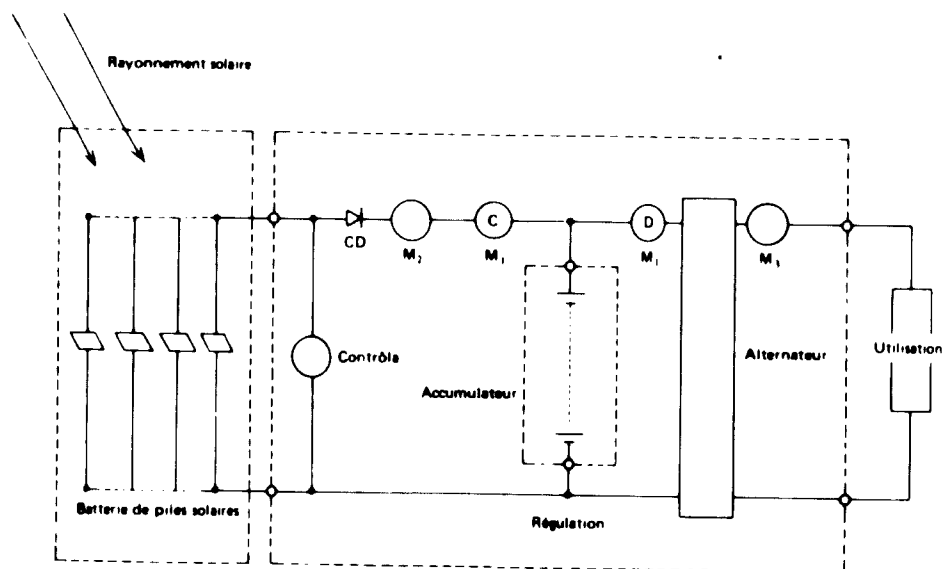


Figure 7. Schéma de la production d'électricité : CD est une diode de blocage anti-retour; M_2 , M_1 et M_1 sont des voltmètres

| | |
|---|-----|
| Matériaux de construction et main-d'œuvre | 50 |
| Chauffage et rafraîchissement (la nuit) | 20 |
| Stockage et divers | 10 |
| Production de courant électrique | 140 |
| Coût total (non compris le terrain) | 220 |

Une maison ordinaire coûterait environ 100 000 rials. Le coût de l'appareillage pour le chauffage et le rafraîchissement est le même, qu'il soit solaire ou classique. Cette conclusion est corroborée par d'autres chercheurs¹⁰.

Conclusions

Une analyse de tous les paramètres de construction d'une maison solaire en Arabie saoudite montre qu'une telle maison est non seulement faisable, mais même pratique. Des divers matériaux de construction analysés dans les tableaux 1 à 5, la meilleure combinaison est l'échantillon C. Les murs devraient avoir 40 cm d'épaisseur, avec deux rangées de briques de 10 cm d'épaisseur, séparées par un espace de 20 cm rempli de mousse synthétique. Le système de réfrigération peut être soit le système de rafraîchisse-

ment nocturne de la figure 5, soit un climatiseur solaire à absorption au bromure de lithium/eau¹¹. Que l'on utilise l'un ou l'autre système, la quantité d'eau évaporée chaque jour doit être évaluée à cause de la pénurie d'eau à Riyad. En juin, l'un des mois les plus chauds à Riyad, l'évaporation moyenne en bac est de 300 mm¹², soit une moyenne de 1 cm par jour. La surface du bac est de 50 m². Par conséquent, la quantité d'eau perdue chaque jour par évaporation sera de 0,5 m³. Pour le chauffage, on suggérera plusieurs capteurs plans couvrant une surface de 80 m² avec des surfaces sélectives. On a calculé que la quantité d'énergie solaire utilisable pour chauffer la maison en janvier est de 59 x 10⁵ kJ par jour. Cela permet d'élever la température dans la maison de 5 °C dans la journée. Les piles solaires peuvent également être utilisées pour le chauffage, donnant un gain supplémentaire d'énergie de 8 x 10⁵ kJ par jour. L'analyse des coûts montre que l'élément principal est le prix des piles solaires. Si l'on n'en tient pas compte, une maison solaire et une maison classique coûtent à peu près le même prix. Le recours au chauffage et au rafraîchissement solaires entraînerait une économie d'environ 14 rials par jour.

¹¹ J. A. Duffie et W. A. Beckman, *Solar Energy Thermal Processes*, 1re éd. (New York, Wiley Interscience, 1974).

¹² Raikes and Partners, "Hydrological service for the period 1 August 1968 to 31 August 1970", Rapport établi pour le Ministère de l'agriculture et des eaux, Arabie saoudite.

¹⁰ R. K. Swartman, V. Ha et C. Swaminathan, "Comparison of ammonia-water and ammonia-sodium thiocyanate in a solar refrigeration system", Coopération méditerranéenne pour l'énergie solaire (COMPLES), premier semestre 1974.

Réfrigération solaire dans les pays en développement

A. Eggers-Lura

International Solar Power Co. Ltd., Gentofte (Danemark)

Les techniques de réfrigération solaire pouvant être appliquées économiquement dans les pays en développement doivent répondre aux conditions suivantes :

a) Le matériel doit être simple et peu coûteux, de façon qu'il puisse être fabriqué dans les pays en développement avec les matériaux et la main-d'œuvre disponibles dans ces pays :

b) Le matériel doit être acceptable du point de vue social et conforme aux habitudes de vie et de travail de la population.

c) Aucune autre source d'énergie, ni aucun autre matériel ne doivent être nécessaires.

La plupart des recherches fondamentales sur la réfrigération solaire ont été menées au cours des années 50 et exposées à la Conférence des Nations Unies sur les nouvelles sources d'énergie, tenue à Rome en 1961. Ensuite, les recherches ont été pratiquement arrêtées et n'ont été vraiment reprises que depuis la "crise de l'énergie". Cependant, les travaux déjà effectués ou en cours permettent de déterminer facilement quelles sont les techniques actuellement connues qui conviennent aux pays en développement ou peuvent y être appliquées de manière économique.

Pour le moment, les pays en développement n'ont guère le choix qu'entre deux méthodes de réfrigération : par évaporation ou par absorption intermittente. Tous les autres procédés sont trop compliqués ou trop coûteux pour être pris en considération. La réfrigération par absorption continue exige des températures trop élevées, c'est-à-dire l'utilisation de capteurs solaires avec effet de concentration, qui sont trop coûteux à fabriquer et trop compliqués à utiliser.

Réfrigération par évaporation

La réfrigération de denrées alimentaires par évaporation n'exige en principe qu'un récipient entouré d'une pièce de tissu dont la partie inférieure

est plongée dans un plateau contenant de l'eau. Le tissu absorbe de l'eau et, par capillarité, est imprégné en grande partie ou en totalité. Si le climat est sec et si le récipient est tenu dans un endroit aéré et ombragé, les denrées alimentaires seront rafraîchies, par évaporation de l'eau, à une température bien inférieure à la température ambiante.

Trois modèles simples d'appareils qui peuvent être construits à bas prix et même fabriqués en série avec des matériaux disponibles dans la plupart des pays en développement sont décrits ci-après. Pour vulgariser ces appareils dans les communautés rurales des pays en développement, il faut avant tout enseigner aux habitants comment les construire et comment les utiliser.

Paniers

Un panier avec couvercle est tressé en bambou ou autre fibre tendre. Les dimensions dépendent des besoins de la famille. Il sera placé sur un plateau carré ou rond, en terre ou en métal. On peut utiliser, par exemple, le bas d'une pipe d'essence. De toute façon, le plateau doit être plus large que le panier et avoir 25-30 cm de haut. L'ensemble est placé dans un endroit frais et ombragé de la cuisine, c'est-à-dire en un point bien aéré et éloigné de toute source de chaleur. On dispose dans le plateau des briques ou des pierres plates sur lesquelles le panier reposera en équilibre stable.

De la toile d'emballage ou tout autre tissu approprié est cousue autour du col du panier. Le tissu doit pendre librement autour du panier et plonger dans le plateau. On recouvre de la même manière le couvercle du panier. Ensuite, le panier est placé sur les briques ou les pierres plates; on y introduit les denrées à rafraîchir et on met le couvercle. Le plateau est rempli d'eau; le tissu recouvrant le couvercle du panier est humidifié la première fois que l'on s'en sert, puis de temps à autre par la suite.

Le panier lui-même ne doit pas tremper dans l'eau; seul le tissu doit être plongé dans l'eau. Par

capillarité, l'eau humidifie tout le tissu. A mesure que l'eau s'évapore, les denrées contenues dans le panier sont rafraîchies. Un avantage supplémentaire de cet appareil est qu'il tient les aliments à l'abri des insectes volants, ainsi que des insectes rampants qui ne peuvent pas traverser l'eau.

Coffres

Selon la même technique, on peut fabriquer des coffres ayant une plus grande contenance que des paniers. Avec des clous ou des vis et des planches, on fabrique un coffre que l'on dispose dans un plateau contenant de l'eau. On peut également mettre un plateau d'eau sur le couvercle du coffre. Une ouverture à charnières offrira un accès facile aux denrées alimentaires, placées dans le coffre sur un treillage métallique. Tout le coffre est revêtu de toile d'emballage ou autre tissu approprié, dont une partie est plongée dans les plateaux remplis d'eau.

Jarres

On peut également utiliser des jarres ou des pots en terre cuite, procédé connu depuis des siècles en Asie pour rafraîchir l'eau, notamment l'eau potable. On en trouve dans les villages de Birmanie, de Chine, du Kampuchea démocratique, d'Indonésie, de Malaisie, des Philippines, de Thaïlande et du Viet Nam. Jusqu'à la Seconde Guerre mondiale, de petits pots en terre cuite étaient très utilisés en Europe pour rafraîchir le beurre et le fromage.

Réfrigération par absorption intermittente

Alors que la réfrigération par évaporation ne convient qu'à l'usage domestique, la réfrigération par absorption intermittente peut être utilisée aussi bien dans les foyers que sur une base communale. Ce procédé présente l'avantage que les cycles de chauffage et d'absorption suivent le cycle solaire.

Un appareil de réfrigération par absorption intermittente est plus complexe et plus coûteux qu'un appareil de réfrigération par évaporation. Par conséquent, il faut déterminer si le matériel de réfrigération dans les villages ruraux sera utilisé sur une base individuelle ou sur une base communale.

Pour commencer, il est sans doute préférable de s'intéresser au matériel et aux installations pouvant être utilisés sur une base communautaire, car il sera plus facile d'éduquer quelques personnes ayant l'esprit technique à faire fonctionner une installation communale, qu'un grand nombre de familles à faire fonctionner la leur. Si l'installation produit des blocs de glace et si chaque foyer possède une petite glacière, un member de la famille peut aller chaque jour chercher un bloc de glace à l'installation

communale et le mettre dans sa glacière. Il serait certainement possible de trouver des entrepreneurs locaux, par exemple des commerçants, qui pourraient organiser la production, la vente et la distribution de la glace, peut-être avec une aide quelconque du gouvernement.

Certes, il est possible de construire de petits réfrigérateurs à absorption intermittente, simples et peu coûteux, mais ils seraient sans doute trop chers à l'heure actuelle pour les familles dans la plupart des régions.

Quelles que soient leurs dimensions, les réfrigérateurs à absorption intermittente peuvent fonctionner avec des capteurs plans, peut-être avec l'addition d'un léger effet de concentration à l'aide de miroirs métalliques plans.

Réfrigérateurs individuels

Pour les réfrigérateurs à absorption individuels, le type à envisager serait le "ballon glacé", inventé en 1920, qui utilise l'eau comme absorbant et l'ammoniac comme réfrigérant et qui peut utiliser le kérosène, la paraffine, le gaz ou même le bois de chauffage pour le bouilleur. Les "ballons glacés" ont été très largement utilisés au Canada et aux Etats-Unis, ainsi qu'en Europe, entre la Première et la Seconde Guerre mondiale. Ils ont peu à peu disparu après la mise sur le marché des réfrigérateurs électriques à compression. Il n'existe plus aujourd'hui que quelques réfrigérateurs du type "ballon glacé". Il y en a six aux Etats-Unis, mais deux seulement en ordre de marche. Une société des Etats-Unis a repris la production d'un réfrigérateur de ce type.

Le réfrigérateur "ballon glacé" était simple et peu coûteux. Il consistait en un bouilleur-absorbeur relié par une tuyauterie à un condenseur-évaporateur. Le bouilleur-absorbeur contenait un mélange d'eau et d'ammoniac. Il était chauffé d'une manière quelconque et, en même temps, le condenseur-évaporateur était plongé dans de l'eau froide. Lorsque tout l'ammoniac s'était dégagé de la solution, ce qui demandait 1-2 heures, le cycle était inversé. Le condenseur-évaporateur était placé dans un caisson calorifugé, le bouilleur-absorbeur était refroidi par l'air; pendant les 24-36 heures suivantes, l'ammoniac repassait du condenseur-évaporateur dans le bouilleur-absorbeur, ce qui provoquait une baisse de température dans le caisson calorifugé. Il n'y avait qu'un seul inconvénient. Pendant la vaporisation de l'ammoniac, une certaine quantité de vapeur d'eau était entraînée vers le condenseur-évaporateur, ce qui réduisait le rendement du processus.

Chung et Duffie suggèrent de modifier légèrement le "ballon glacé" afin qu'il puisse fonctionner à l'énergie solaire; des expériences préliminaires ont montré que cela était possible.

En 1957, le groupe du Wisconsin (Duffie, Löf, Williams et Chung) a décrit les expériences qu'il avait

faites avec un réfrigérateur du type "ballon glacé". Le bouilleur était chauffé pendant environ 2 heures dans le foyer d'un petit réflecteur parabolique, après quoi l'appareil était transféré dans un "caisson de réfrigération", qui restait froid pendant environ 24 heures. Apparemment, ces expériences n'ont pas été poursuivies.

Il devrait être relativement facile, en se procurant l'un des "ballons glacés" en existence et en étudiant la documentation disponible, d'entreprendre la fabrication d'un réfrigérateur du même type, simple et peu coûteux, fonctionnant à l'énergie solaire, qui pourrait être utilisé dans les foyers dans les pays en développement. Le marché pour de tels réfrigérateurs serait immense. Il faudrait probablement les construire de sorte qu'un combustible fossile puisse remplacer l'énergie solaire le cas échéant. Pour le chauffage solaire, il faudrait utiliser des capteurs plans avec léger effet de concentration, ou bien des capteurs cylindro-paraboliques en plaçant le bouilleur dans l'axe focal.

Installations frigorifiques communales

Une installation frigorifique communale peut être, soit un entrepôt frigorifique dans lequel les habitants du village entreposent leurs denrées alimentaires sur des rayons, chaque famille se voyant allouer une petite proportion du volume total, soit une installation produisant des blocs de glace pour les glacières familiales. Une installation communale devrait pouvoir produire en moyenne 500 kg de glace par jour. Une telle installation a été conçue par l'auteur. Elle utilise le chlorure de calcium/ammoniac comme mélange absorbant/réfrigérant, mais on peut envisager de nombreuses autres solutions.

Un petit prototype est actuellement fabriqué au Danemark et sera envoyé plus tard au Soudan pour des essais dans les conditions climatiques tropicales. Pour tenir compte des périodes de temps nuageux, l'installation a été conçue pour produire 720 kg de glace par jour de temps clair. Le temps d'ébullition a été fixé à 5 heures autour de midi et le temps d'absorption qui est également le temps de réfrigération à 12 heures pendant la nuit.

La figure 1 donne un aperçu de l'installation proposée. Les capteurs solaires abritent un condenseur à eau stagnante et une machine à faire la glace. La figure 2 est une coupe exposée de l'ensemble capteurs solaires, absorbeur et bouilleur, qui est réalisé en tubes d'acier séparés par des ailettes également en acier. A l'exception du vitrage, tous les éléments des capteurs sont enduits d'un revêtement sélectif noir.

L'isolation au-dessous de l'absorbeur est montée de sorte qu'elle puisse être retirée pendant la période d'absorption. Ceci est nécessaire parce que le revêtement sélectif des capteurs et le vitrage ne permettent pas un refroidissement suffisant par rayonnement pendant la nuit.

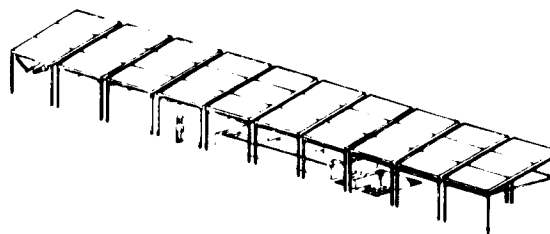


Figure 1. Vue générale d'une installation frigorifique solaire

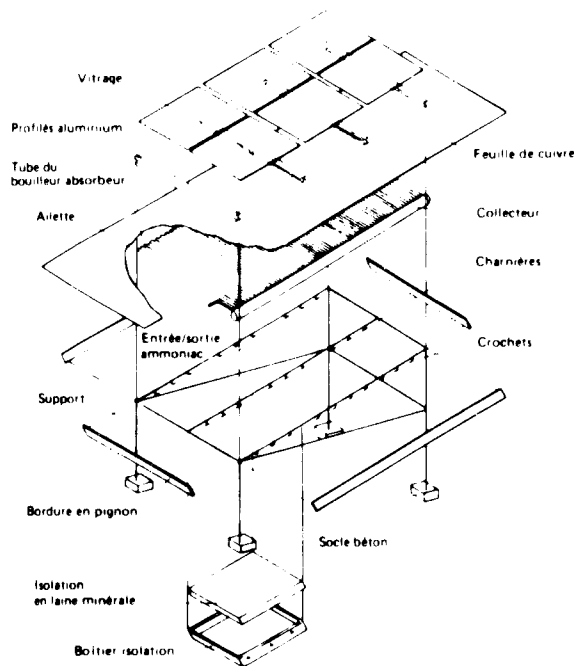


Figure 2. Coupe exposée d'une section de l'ensemble capteur, bouilleur, absorbeur

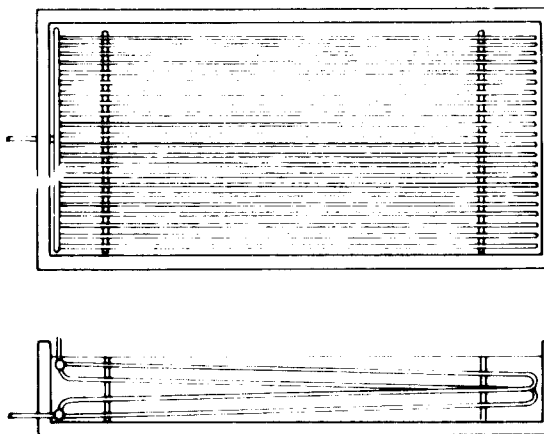


Figure 3. Condenseur à eau stagnante

S'il n'est pas possible d'assurer la circulation de l'eau (sauf par convection naturelle), un condenseur à eau stagnante est la meilleure solution (figure 3). Des études de simulation ont montré que l'on peut obtenir une température de condensation moyenne de 40 °C, même avec un petit bac.

Les principales dimensions de l'installation frigorifique sont les suivantes :

Capteurs

Surface totale prévue : 156 m²
 (10 sections de 3 m x 5,19 m)
 Diamètres des tubes : 33,7 mm
 (extérieur), 28,5 mm (intérieur)
 Nombre de tubes par section : 66

Condenseur

Bac d'eau : 6 m x 2,8 m x 0,8 m
 Surface totale d'échange de chaleur : 18 m²
 Diamètres des tubes : 21,4 mm (extérieur),
 16,1 mm (intérieur)
 Longueur totale des tubes : 270 m

Machine à glace

Bassin de saumure : 1,7 m x 1,5 m x 0,85 m
 Surface totale d'échange de chaleur : 16,5 m²
 Nombre de casiers à glace : 60
 Dimensions des blocs de glace : 120 mm x 180 mm x
 600 mm
 Poids du bloc de glace : 12 kg

La machine à glace (figure 4) fonctionne sans circulation forcée de la saumure; il s'ensuit que l'évaporateur doit avoir une grande surface. La meilleure solution semble être un évaporateur à plaques, celles-ci étant disposées entre les rangées de casiers à glace. Les blocs de glace sont relativement petits, afin que la congélation puisse être terminée en 12 heures avec une température d'évaporation d'environ 11 °C.

Les conditions typiques de fonctionnement de l'installation sont les suivantes :

| | |
|--|----------------------|
| Rayonnement direct | 890 W/m ² |
| Rayonnement diffus | 150 W/m ² |
| Température ambiante pendant l'ébullition | 31 °C |
| Rendement des capteurs | 0,55-0,45 |
| Température de condensation | 40 °C |
| Température d'évaporation | 10 °C |
| Température d'absorption finale (absorbant liquide) | 40 °C |
| Durée de la période d'ébullition | 5 h |
| Durée de la période d'absorption | 12 h |
| Masse spécifique estimée du bouilleur (masse du bouilleur/masse du réfrigérant dégagé) | 10 |

En se fondant sur le prototype, on a évalué comme suit le coût de l'installation (coût au Danemark en dollars) :

| | |
|----------------------------------|--------|
| Capteurs, bouilleur et absorbeur | 21 000 |
| Condenseur | 500 |
| Machine à glace | 2 500 |
| Plombierie et installation | 2 000 |
| Total | 26 000 |

Dans un pays en développement, l'installation pourrait probablement être construite pour environ 16 000 dollars.

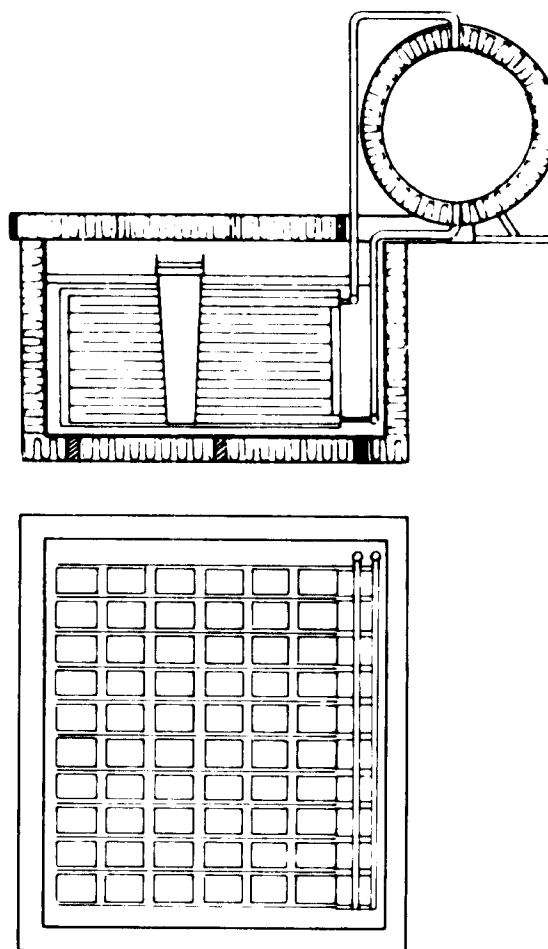


Figure 4. Machine à glace

En prenant pour hypothèses une production annuelle de glace d'environ 180 000 kg, un taux d'intérêt annuel de 6% et un amortissement en 12 ans, la glace pourrait être produite au prix de 0,02 dollar/kg. Ce prix ne semble pas déraisonnable si l'on en juge par les chiffres donnés dans la documentation pertinente.

On pourrait envisager plusieurs combinaisons absorbant/réfrigérant, liquides ou solides, mais les meilleures semblent être les suivantes :

Bromure de lithium/eau (LiBr/H₂O)
 Eau/ammoniac (H₂O/NH₃)
 Thiocyanate de sodium/ammoniac (NaSCN/NH₃)
 Nitrate de lithium/ammoniac (LiNO₃/NH₃)
 Chlorure de calcium/ammoniac (CaCl₂/NH₃)
 Chlorure de strontium/ammoniac (SrCl₂/NH₃)

Dans cinq des six cas ci-dessus, le réfrigérant est l'ammoniac; les quatre premiers absorbants sont

liquides, alors que les deux derniers sont solides. On peut utiliser d'autres réfrigérants, par exemple l'alcool ou le méthylamine: Niebergall a fourni des données très détaillées sur la plupart des combinaisons absorbant/réfrigérant qui pourraient être envisagées.

Résultats des recherches

Les observations ci-après sont fondées sur les travaux de l'auteur et d'autres chercheurs au Danemark.

Les absorbants liquides présentent l'avantage que la concentration du réfrigérant dans l'absorbant peut être ajustée à volonté pour tenir compte des températures plus basses que l'on obtient avec l'énergie solaire. En revanche, il est difficile d'assurer une bonne circulation de mélanges liquides sans utiliser de pompes; en outre, on court le risque qu'une partie de l'absorbant liquide se vaporise en même temps que le réfrigérant pendant le cycle d'ébullition. On peut remédier à cela, soit par un meilleur choix du mélange absorbant/réfrigérant, soit en installant une colonne de fractionnement, qui est cependant coûteuse. (Le fractionnement est impératif lorsqu'on utilise le mélange eau/ammoniac.)

Les absorbants solides présentent l'avantage qu'ils ne peuvent pas s'évaporer; toutefois, du fait de leur densité, on rencontre quelques difficultés pendant le cycle de régénération; en outre, il s'est révélé difficile de maintenir la porosité de couches d'absorbant solide dans le bouilleur-absorbeur et de prévenir l'encrassement des tuyauteries.

Les températures d'ébullition nécessaires avec des absorbants solides sont à la limite du possible avec des capteurs plans, c'est-à-dire 100-120 °C, selon l'absorbant/réfrigérant utilisé. Cependant, les problèmes techniques ainsi posés pourraient probablement être résolus avec la technologie actuelle, par exemple avec des revêtements sélectifs et des miroirs métalliques à léger effet de concentration. Les véritables problèmes sont d'ordre économique, plutôt que d'ordre technique.

Pour le processus de condensation, il faut des températures d'environ 40 °C. Il peut être difficile d'obtenir une température aussi basse dans certaines régions tropicales. On a suggéré l'utilisation de condenseurs à eau stagnante, dans lesquels le refroidissement par évaporation permet de maintenir la température de condensation au niveau voulu.

Des expériences ont montré qu'un mélange de 85 % de chlorure de calcium et 15 % de ciment Portland donne un granulé absorbant qui a une résistance mécanique satisfaisante et une porosité suffisante pour permettre une répartition uniforme lorsqu'on remplit le bouilleur-absorbeur. Après 200 cycles avec ce granulé, on n'a noté aucune diminution du pouvoir d'absorption. L'addition de ciment ne diminue pas le rendement par comparaison avec le chlorure de calcium pur. On a obtenu un granulé

similaire avec le chlorure de strontium, mais il ne présente aucun avantage sur le chlorure de calcium.

Des expériences de simulation ont été faites à Copenhague avec une installation destinée à Khartoum (Soudan). Le meilleur rendement a été obtenu lorsque la température d'ébullition était maintenue à environ 70 % de la température maximale que l'on pouvait obtenir par beau temps. Dans ces conditions, la température maximale des capteurs était de 110-115 °C. Ces expériences ont également montré que le diamètre optimal des tubes du bouilleur était d'environ 40 mm et leur écartement d'environ 100 mm.

La chaleur rayonnée dans l'environnement pendant la nuit est insuffisante pour assurer une entière réabsorption de l'ammoniac. Un refroidissement supplémentaire, par exemple en laissant un certain espace entre le capteur et son isolation, serait sans doute insuffisant, tout en augmentant les déperditions de chaleur pendant le cycle d'ébullition. La meilleure solution semble consister en une isolation que l'on peut enlever à la tombée de la nuit.

Une installation pilote pour la production d'eau potable réfrigérée est en fabrication à l'Université technique de Copenhague. La surface des capteurs est de 4 m²; on a calculé que la production sera d'environ 7 500 kJ par jour. Cette installation pourra être essayée ultérieurement à l'Institut de l'énergie solaire et de la recherche écologique de l'Université de Khartoum. Tant les expériences que les calculs révisés touchant la conception de cette installation pilote confirment qu'on peut produire de la glace avec une machine frigorifique à absorption intermittente au chlorure de calcium/ammoniac. La production journalière sera sans doute de 4 kg/m² de capteur.

Une machine frigorifique à absorption intermittente peut être très simple, et aucune technique de pointe n'est nécessaire pour la réaliser.

Le chlorure de calcium/ammoniac semble être l'absorbant/réfrigérant qui présente le plus d'avantages.

Chaînes frigorifiques

Dans beaucoup de pays en développement, des "chaînes frigorifiques" sont nécessaires pour assurer le stockage, le transport et la commercialisation de certaines denrées périssables. Au Mexique, par exemple, de telles chaînes sont nécessaires pour les fruits, car les installations existantes sont à peine suffisantes pour stocker 10 % de la production.

Depuis 1971, le Centre de recherches pratiques de l'Université de Mexico s'occupe de la création d'une chaîne frigorifique pour la commercialisation de denrées périssables. Sur la base des études faites à ce jour, on a conclu qu'il fallait s'efforcer de créer dans les régions rurales du Mexique :

a) De grands entrepôts frigorifiques régionaux (capacité 5 000-10 000 tonnes), où les produits

peuvent être traités et stockés avant leur distribution dans des centres urbains ou leur exportation.

b) De petits entrepôts frigorifiques polyvalents (capacité 20-200 m³) pour les communautés rurales.

Le Conseil national de la science et de la technologie a approuvé le développement de petits entrepôts frigorifiques.

Des machines frigorifiques solaires à absorbant solide peuvent se révéler utiles pour les chaînes frigorifiques au Mexique et dans d'autres pays en développement.

BIBLIOGRAPHIE

- A case for a solar ice maker. *Solar energy* (Elmsford, N.Y.) 7:1:1-2, 1963.
- Chinappa, J. C. V. Experimental study of the intermittent vapour absorption refrigeration cycle employing the refrigerant-absorbent systems of water ammonia lithium nitrate. *Solar energy* (Elmsford, N.Y.) 5:1:1-18, 1961.
- Performance of an intermittent refrigerator operated by a flat-plate collector. *Solar energy* (Elmsford, N.Y.) 6:4:143-150, 1962.
- Chung, R. et J. A. Duffie. Cooling with solar energy. Actes de la Conférence des Nations Unies sur les nouvelles sources d'énergie, Rome, 21-31 août 1961. *Energie solaire* : III, v. 6, p. 20 (S/82).
Numéro de vente : 63.1.40.
- Factors affecting the use of solar energy for cooling. Par K. H. Khalil *et al.* Actes de la Conférence internationale sur l'héliotechnique et le développement, Dhahran, 1975. (V. 2, p. 125-132.)
- Niebergall, W. Arbeitsstoffpaare für Absorptionskälteanlagen und Absorptionkühlschränke. Mühlhausen, République fédérale d'Allemagne, Verlag für Fachliteratur, 1954.
En allemand.
- Possibilities for solar ice-makers. Par F. Ba Hli *et al.* Proceedings of the International Solar Energy Society Conference, Melbourne, 1970. (6/59)
- Potential use of solar-powered refrigeration by an intermittent solid absorption system. Par A. Eggers-Lura *et al.* Actes de la Conférence internationale sur l'héliotechnique et le développement, Dhahran, 1975. (V. 2, p. 83-104.)
- Stubkier, H. B. et B. Bechtoft Nielson. Machines frigorifiques solaires. Thèse de doctorat. Université technique du Danemark, Laboratoire du froid, Copenhague, 1974.
En danois.
- Survey of solar-powered refrigeration. Par R. K. Swartman *et al.* *American Society of Mechanical Engineers. Quarterly transactions.* (New York) 73-WA/Sol-6, 1973.
- Swartman, R. K. Survey of absorption refrigeration systems. Actes de la Conférence internationale sur l'héliotechnique et le développement, Dhahran, 1975. (V. 2, p. 71-82.)
- Trombe, F. et M. Foëx. Bilan économique de la production de glace avec une machine à absorption utilisant le soleil comme source de chaleur. Actes de la Conférence des Nations Unies sur les nouvelles sources d'énergie, Rome, 21-31 août 1961. *Energie solaire* : III, v. 6, p. 56 (S/109).
Numéro de vente : 63.1.40.

Distillation solaire : état des connaissances

B. W. Tleimat

Laboratoire de conversion de l'eau de mer, Richmond, Californie (Etats-Unis d'Amérique)

Historique

L'utilisation moderne de l'énergie solaire pour la distillation des eaux salées a commencé en 1872, avec l'installation dans le nord du Chili d'un grand distillateur solaire du type bassin, qui a satisfait les besoins d'une communauté minière pendant de nombreuses années. Le distillateur initial¹ consistait en canaux parallèles de 1,14 m de large et 61 m de long, avec une surface totale de 4 700 m². Le bassin était en bois noirci avec de la teinture et de l'alun pour absorber la lumière solaire. D'autres moyens d'obtenir de l'eau potable ayant été mis en œuvre, les seuls restes de ce distillateur en 1965 étaient une partie des fondations et de nombreux morceaux de vitrage.

La figure 1 est une vue schématique d'un distillateur solaire. C'est un bassin contenant de l'eau salée, avec un fond noir pour absorber la lumière solaire et un vitrage transparent étanche. Le vitrage est incliné au-dessus d'un collecteur. Le rayonnement solaire traverse le vitrage et est absorbé par l'eau et le revêtement du bassin. La température augmente, d'où évaporation d'une partie de l'eau et humidité accrue de l'air près de la surface de l'eau, ce qui provoque des courants de convection dans le distillateur : l'air

humide et chaud monte vers le vitrage, où une partie de la vapeur d'eau se condense, ruisselle et tombe dans le collecteur sous forme d'eau douce. Afin de prévenir la précipitation de sels dans le bassin, il faut ajouter de l'eau salée continuellement ou par intermittence. Le taux d'addition d'eau salée doit être de deux fois supérieur au taux de production d'eau douce.

L'intérêt pour la distillation solaire a repris durant la Seconde Guerre mondiale, avec la mise au point de petits distillateurs en polymères synthétiques pour les canots de sauvetage. Ces petits distillateurs consistaient en un conteneur gonflable, en matériau transparent, avec un tampon de feutre à la partie inférieure et une bouteille pour recueillir l'eau distillée. En utilisation, le conteneur était gonflé, le tampon était saturé d'eau de mer et l'ensemble flottait le long du canot de sauvetage. Le rayonnement solaire traversait le matériau transparent et était absorbé par le tampon; il y avait formation de vapeur d'eau, qui se condensait ensuite sur la surface interne du conteneur et était recueillie dans la bouteille.

Au cours des années qui ont suivi la Seconde Guerre mondiale, une sécheresse persistante dans de nombreuses régions du monde a mis en relief les problèmes d'approvisionnement en eau. Le recours au dessalement pour obtenir de l'eau potable a paru

¹ Josiah Harding, "Apparatus for solar distillation", *Proceedings of Institution of Civil Engineers*, n° 73 (1883), p. 284-288.

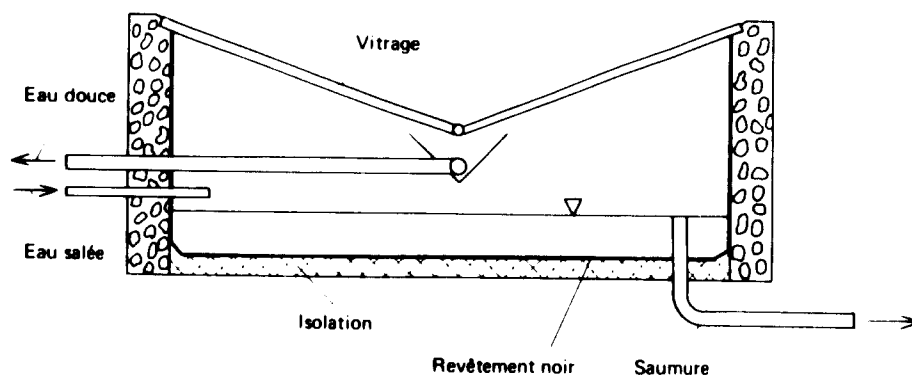


Figure 1. Distillateur solaire : coupe transversale simplifiée

constituer un moyen de lutte contre les effets de la sécheresse. Partout dans le monde, on a lancé des programmes pour l'amélioration des méthodes de dessalement des eaux saumâtres. La distillation solaire a été l'une des nombreuses méthodes envisagées. Cependant, les recherches sur le dessalement en utilisant l'électricité et les combustibles fossiles ont semblé devoir aboutir plus rapidement que la distillation solaire à des applications commerciales, de ce fait, les recherches sur la distillation solaire n'ont reçu qu'une proportion relativement faible des ressources financières disponibles.

Le Laboratoire de conversion de l'eau de mer de l'Université de Californie a entrepris ses recherches sur les méthodes de dessalement en 1951. Très vite, il a conclu qu'il fallait prêter une attention soutenue aux procédés faisant appel à des énergies nouvelles, cette conclusion était fondée sur le calcul de l'énergie requise pour dessaler l'eau de mer par les méthodes que l'on connaissait alors. Par exemple, pour distiller l'eau de mer en quantité suffisante pour satisfaire entièrement les besoins d'une ville comme Los Angeles, toute la production de pétrole de la Californie du Sud n'aurait pas suffi pour fournir l'énergie nécessaire à un distillateur du type alors en service. En conséquence, l'Université a construit une station expérimentale de distillation solaire à son Centre d'ingénierie de Richmond, en Californie, et a poursuivi activement ses recherches pendant les dix années suivantes. Diverses configurations de distillateurs solaires simples ont été construites et essayées en vue de réduire les coûts de construction et d'améliorer le rendement. A la même époque, le Gouvernement des Etats-Unis, par l'intermédiaire du Bureau des eaux salines, a également lancé un programme de distillation solaire et a financé la construction et l'essai de divers distillateurs au Centre d'essais de Daytona Beach, en Floride.

Les chercheurs de l'Université de Californie et d'autres centres de recherche ont finalement conclu que les distillateurs du type bassin, quelle qu'en soit la forme, ne pouvaient pas concurrencer les autres types de distillateurs pour la production de grandes quantités d'eau. Depuis 1961, les travaux sur la distillation solaire à l'Université de Californie ont été orientés vers la mise au point et l'amélioration de petits distillateurs pour fournir l'eau potable à de petites communautés. Un aperçu des travaux menés à l'Université de Californie a été présenté par Howe et Tleimat².

Les travaux de mise au point et de construction de grands distillateurs ont été arrêtés dans la plupart des régions du monde, mais la mise au point de distillateurs solaires de taille moyenne a continué en Australie, sous les auspices de l'Organisation de la recherche scientifique et industrielle du Common-

wealth. L'analyse la plus récente des travaux sur la distillation solaire a été faite par Talbert et autres³.

Le coût de l'eau produite par des installations de dessalement est la somme des coûts de l'énergie, du capital investi et de la main-d'œuvre. L'énergie solaire étant gratuite, le coût de l'eau produite par des distillateurs solaires simples, du type bassin, est fonction du coût initial du distillateur. Les efforts pour réduire le coût de l'eau douce ont donc visé à diminuer les dépenses d'investissement, sans diminuer pour autant le rendement. Ils s'agissait essentiellement d'étudier les différentes configurations géométriques possibles. La figure 2 montre certaines des configurations essayées à l'Université de Californie. Du point de vue du rapport qualité-prix, la conception la plus intéressante est celle de la figure 1. Un distillateur de ce modèle a été installé dans plusieurs îles du Pacifique Sud⁴. Le bassin à couverture vitrée a une surface de 5 m². Ce modèle a également été réalisé en conception modulaire, avec des modules additionnels de 2,4 m² chacun, permettant d'augmenter la taille et la production.

La figure 3 présente des coupes transversales de quelques grands distillateurs solaires construits dans le monde. Dans le modèle A, les poitrails en béton sont façonnés pour servir de supports du vitrage et de collecteurs de l'eau douce. Un revêtement noir repose sur le fond isolé du bassin, épouse la forme des collecteurs et est collé sur les bords du vitrage. L'arête constituée par les deux côtés du vitrage est formée avec du caoutchouc aux silicones qui, après séchage, fait office de charnière. Ce modèle fonctionne bien et a été utilisé dans plusieurs installations en Australie.

Le modèle B est semblable à celui d'un grand distillateur dans l'île grecque de Patmos. Le vitrage repose sur des supports en aluminium, qui servent aussi de collecteurs. Le modèle C a été utilisé par l'Institut de recherche Brace, de l'Université McGill, pour le distillateur de La Gonave, à Haïti. Le modèle D est semblable à celui du distillateur de Las Marinas, en Espagne. C'est un "bassin profond", conçu et essayé à Daytona Beach, en Floride. Le principe en est que cette construction n'implique pas un nivelage parfait du sol et prévient la formation de points secs lors de l'évaporation. En outre, étant donné le grand volume d'eau dans le bassin, l'évaporation continue pendant la nuit grâce à la chaleur emmagasinée dans l'eau salée. Toutefois, après de nombreuses expériences et comparaisons avec des distillateurs à bassin peu profond, on a dû conclure que le rendement était meilleur lorsque la hauteur d'eau était aussi faible que possible.

Parmi les autres distillateurs solaires qui ont été essayés dans diverses stations, il faut mentionner les

³ S. G. Talbert, J. A. Fibling et G. O. G. Lof, *Manual on Solar Distillation of Saline Water*, Research and Development Report No. 546 (Washington, United States Department of the Interior, Office of Saline Water, 1970)

⁴ I. D. Howe et B. W. Tleimat, "Solar distillers for use on coral islands", *Desalination*, n° 2 (1967), p. 109-115.

² I. D. Howe et B. W. Tleimat, "Twenty years of work on solar distillation at the University of California", *Solar Energy*, n° 16 (1974), p. 97-105

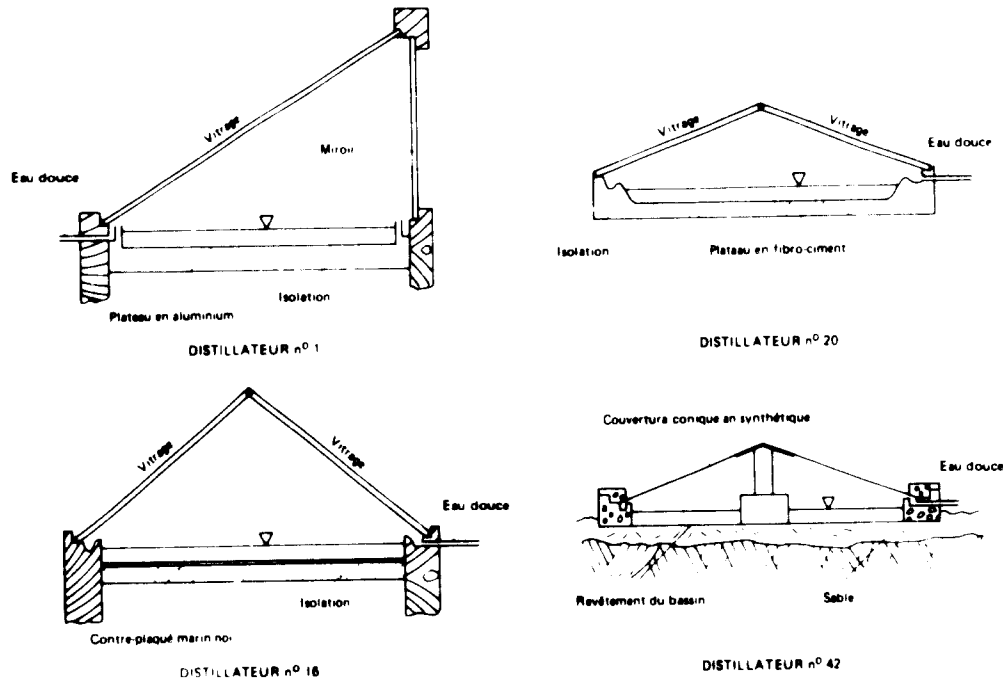


Figure 2. Coupes transversales de quelques distillateurs solaires de l'université de Californie, à Richmond

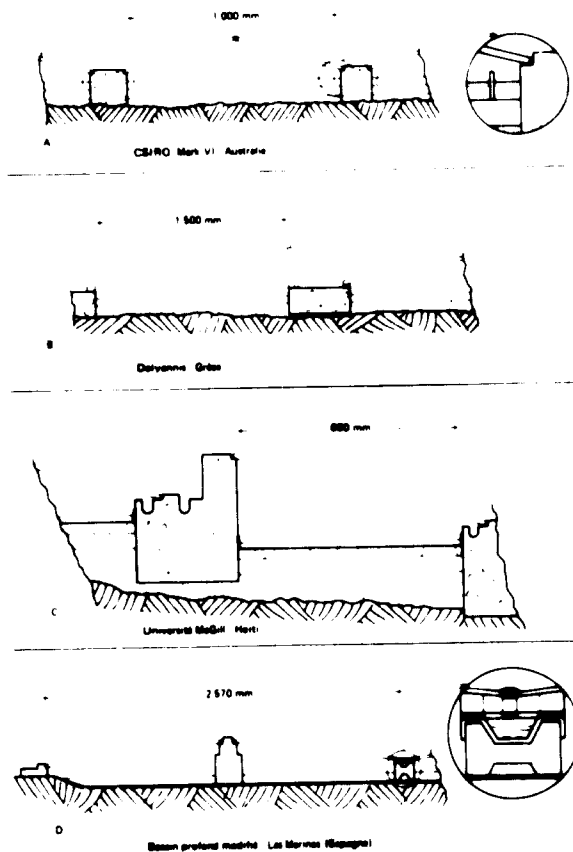


Figure 3. Coupes transversales simplifiées de quelques grands distillateurs

modèles en escalier et par capillarité (voir figure 4). Dans le premier, le bassin est divisé en bandes parallèles étroites qui se succèdent comme les marches d'un escalier. Du fait de cette disposition, la surface de l'eau est beaucoup plus proche de la surface vitrée. Ce modèle a un rendement plus élevé que le bassin ordinaire; toutefois, l'augmentation du coût de construction est hors de proportion avec l'augmentation du rendement. Dans le second, un tissu approprié est posé sur un plan incliné, parallèle au vitrage; l'eau salée est versée le long du bord supérieur du plan incliné et ruisselle à travers le tissu absorbant, qu'elle maintient toujours humide. Du fait de sa faible capacité thermique, ce modèle peut avoir un rendement élevé; cependant, le coût de la construction et la difficulté de maintenir le tissu humide et propre font obstacle à son utilisation à grande échelle.

Les distillateurs solaires les plus récents sont installés à Tecamachalco (Mexique), sous les auspices de la Commission pour l'utilisation des eaux saumâtres. Il s'agit de trois distillateurs produisant 1-1,5 m³/j. Chacun comporte plusieurs petits éléments posés sur le sol et reliés par une tuyauterie en PVC. Ils sont semblables aux distillateurs à plateaux en fibro-ciment construits par Gomella; ils se composent essentiellement d'un plateau en fibres de verre, de 0,93 m x 1,063 m, avec un fond peint en noir et un vitrage incliné de 30° sur l'horizontale. Leur coût moyen au Mexique est d'environ 25 dollars; compte tenu des dépenses d'investissement et des frais d'exploitation, l'eau douce revient à 3-4 dollars/m³.

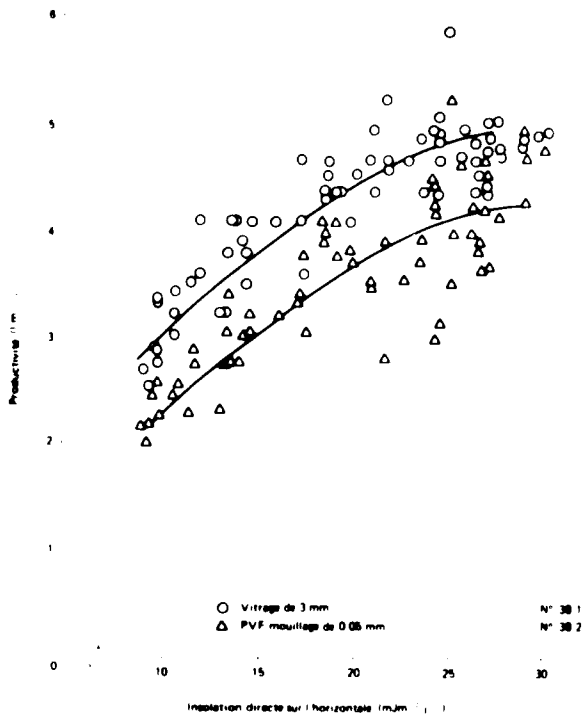


Figure 6. Productivités comparées des distillateurs 38-1 et 38-2 de l'Université de Californie

La figure 6 montre la productivité des distillateurs n^{os} 38-1 et 38-2. Tous deux étaient du type en escalier; ils étaient identiques, sauf pour la couverture: le 38-1 avait un vitrage renforcé de 3 mm, tandis que le 38-2 avait une feuille de PVF traité mécaniquement de 0,05 mm. Ils étaient installés l'un près de l'autre et ont été essayés dans les mêmes conditions pendant deux ans. Il ressort clairement de la figure 6 que la productivité moyenne du second était inférieure d'environ 20 % à celle du premier.

Etant donné que l'étanchéité à la vapeur d'eau affecte sensiblement la performance des distillateurs solaires, le scellement de la couverture transparente en vue de prévenir les déperditions de vapeur d'eau est très important. Le caoutchouc aux silicones a été le matériau le plus efficace et le plus durable utilisé à l'Université de Californie. Les autres matériaux, tels que le mastic ordinaire, le goudron et les rubans adhésifs, se sont détériorés avec le temps et ont été le siège de fissures par lesquelles s'échappaient la vapeur d'eau et l'eau condensée.

Les matériaux de revêtement du bassin doivent être étanches à l'eau et capables d'absorber le rayonnement solaire. De plus, comme le bassin peut devenir sec, son revêtement doit pouvoir supporter des températures relativement élevées sans être endommagé. A ce jour, le matériau le plus satisfaisant est le butylcaoutchouc. On a essayé d'autres matériaux, notamment le polyéthylène et des tapis

d'asphalte semblables à ceux que l'on utilise pour le revêtement de certains réservoirs et pour les toits en terrasse. Les tapis d'asphalte ont donné satisfaction pour les bassins profonds, mais sont trop rigides pour les bassins peu profonds à longs canaux étroits; de son côté, le polyéthylène s'altère rapidement lorsqu'il est exposé au rayonnement ultraviolet.

Les collecteurs et les tuyauteries doivent être en matériaux inaltérables par l'eau distillée. Les polymères synthétiques peuvent être utilisés à cette fin. L'acier se corrompt très rapidement; des feuilles d'acier galvanisé ont été jugées satisfaisantes, mais accusaient une corrosion aux joints et aux courbures. Après galvanisation, l'aluminium peut être utilisé avec succès. Les collecteurs en acier inoxydable ont donné pleine satisfaction; leur corrosion a été faible ou nulle.

L'utilisation de distillateurs solaires d'un modèle simple a été limitée à la production de quantités relativement faibles d'eau. Ceci s'explique par les grandes surfaces nécessaires, qui signifient des investissements et des frais d'entretien si élevés qu'ils ne peuvent pas concurrencer les autres modes de dessalement. Dans ces distillateurs, l'énergie solaire n'est utilisée qu'une seule fois dans le processus, contrairement à la distillation "en cascades" où l'énergie est utilisée plusieurs fois. Plusieurs chercheurs ont poussé leurs travaux visant à utiliser l'énergie solaire plus efficacement⁵. La figure 7 donne une représentation schématique d'un distillateur "en cascades" étudié par l'un d'entre eux (Dunkle). Il consiste en une série de plaques verticales dans un

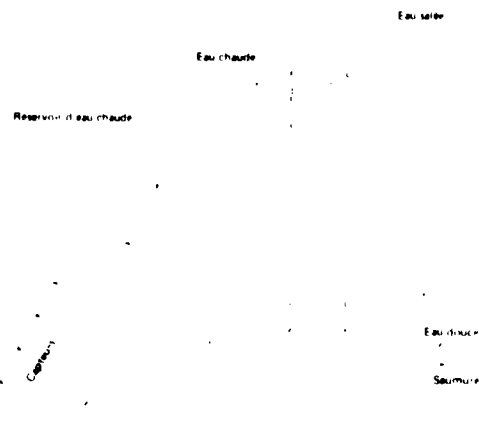


Figure 7. Distillateur solaire "en cascades"

⁵R. V. Dunkle, "Solar water distillation: the roof type still and a multiple effect diffusion still", *American Society of Mechanical Engineers. Quarterly Transactions*, 1961, p. 895-902; M. K. Selcuk, "Design and performance evaluation of a multiple-effect tilted solar distillation unit", *Solar Energy* n^o 8 (1964), p. 23-30; Maria Telkes, *Research on Methods for Solar Distillation*, Research and Development Report No. 13 (Washington, United States Department of the Interior, Office of Saline Water, 1956).

caisson, la première étant chauffée par l'eau sortant d'un chauffe-eau solaire et la dernière étant refroidie par de l'eau salée. L'eau circulant dans des tubes soudés à ces deux plaques. De l'eau salée, chauffée par la vapeur qui se condense sur le côté gauche et la dernière plaque, passe dans une gouttière d'où elle ruisselle sur le côté droit des trois premières plaques. La vapeur produite sur le côté droit de la première plaque se condense sur le côté gauche de la deuxième, etc., jusqu'à la dernière plaque. De la sorte, la chaleur solaire délivrée à la première plaque par l'eau sortant du chauffe-eau solaire passe sur la deuxième plaque, puis sur la troisième et enfin sur la quatrième où elle préchauffe l'eau salée. La vapeur qui se condense sur les côtés gauche des deuxième, troisième et quatrième plaques donne de l'eau douce. Le nombre de plaques (cascades) dépend de la différence de température entre l'eau sortant du chauffe-eau solaire et l'eau salée introduite dans le distillateur. On voit qu'un tel distillateur utilise l'énergie solaire indirectement. Si la paroi gauche du caisson était en matériau transparent et la première plaque peinte en noir, avec suppression des tubes qui y sont soudés, le distillateur utiliserait l'énergie solaire directement. Ce dispositif a l'avantage de rester productif lorsque le soleil ne brille pas, à condition que le chauffe-eau solaire continue de débiter. Malheureusement, la productivité accrue de tels distillateurs ne compense pas l'augmentation du coût de construction. Le coût de l'eau obtenue avec un distillateur du type bassin est inférieur à celui de l'eau produite par un distillateur "en cascades", ceci semble expliquer le manque d'intérêt pour ces derniers.

On a proposé et essayé de nombreuses méthodes d'utilisation de l'énergie solaire pour fournir la vapeur nécessaire à des distillateurs classiques "en cascades" ou "à plateaux de fractionnement"⁶. Des capteurs solaires étaient utilisés pour capter l'énergie solaire en vue de la production de vapeur. Cette vapeur servait à chauffer la première plaque d'un distillateur en cascades ou l'eau salée d'un distillateur à plateaux. De tous ces projets, seul celui de Baum a été construit et testé : un capteur cylindro-parabolique fournissait de la vapeur à haute température à un distillateur à trois cascades; malheureusement, étant donné le faible coefficient de transfert de chaleur dans le distillateur, on ne pouvait utiliser que trois cascades et le coût de

⁶V. A. Baum, "Solar distillers", Communication présentée à la Conférence des Nations Unies sur les nouvelles sources d'énergie, Rome 1961 (35/S/119). D. B. Brice, "Saline water conversion by flash evaporation utilizing solar energy", *Advance in Chemistry Series*, n° 38 (1963), p. 99-116. J. A. Fibling, R. E. Thomas et B. A. Landry, *An investigation of Multiple-Effect Evaporation of Saline Waters by steam from Solar Radiation*, Research and Development Report No. 2 (Washington, United States Department of the Interior, Office of Saline Water, 1953). H. Weihe, "Fresh water from sea water, distilling by solar energy", *Solar Energy*, n° 13 (1972), p. 439-444. B. W. Tleimat et I. D. Howe, "Solar-assisted distillation of sea water", Actes de la Conférence internationale sur l'héliotechnique et le développement, Dhahran, 2-6 novembre 1975

la vapeur produite par le bouilleur solaire était trop élevée pour une exploitation économique.

La performance d'un distillateur en cascades est définie comme la quantité d'eau douce obtenue par unité de chaleur libérée par la vapeur qui se condense sur la première plaque (cascade) et est appelée le taux de production (TDP). Le TDP augmente avec le nombre de cascades ainsi qu'avec la température de la vapeur. Pour une température constante de la vapeur et une température constante de l'eau de refroidissement, le TDP est fonction uniquement du nombre de cascades, en conséquence, l'augmentation du nombre de cascades diminue la quantité de chaleur nécessaire pour produire une quantité unitaire d'eau, c'est-à-dire qu'elle permet de diminuer la surface des capteurs. Toutefois, l'augmentation du nombre de cascades augmente le coût de l'évaporateur, les deux facteurs augmentation du coût et diminution de la surface des capteurs, doivent être mis en regard dans l'analyse avantages-prix.

A titre d'illustration, la figure 8 montre les circuits d'un dispositif proposé par Tleimat et Howe⁷. Dans ce dispositif, des capteurs plans sont utilisés pour la production de vapeur (bouilleur solaire) et des évaporateurs à disques rotatifs sont utilisés pour la production d'eau douce. L'eau provenant du chauffe-eau solaire est prélevée dans l'un des réservoirs de stockage et envoyée dans le vase de

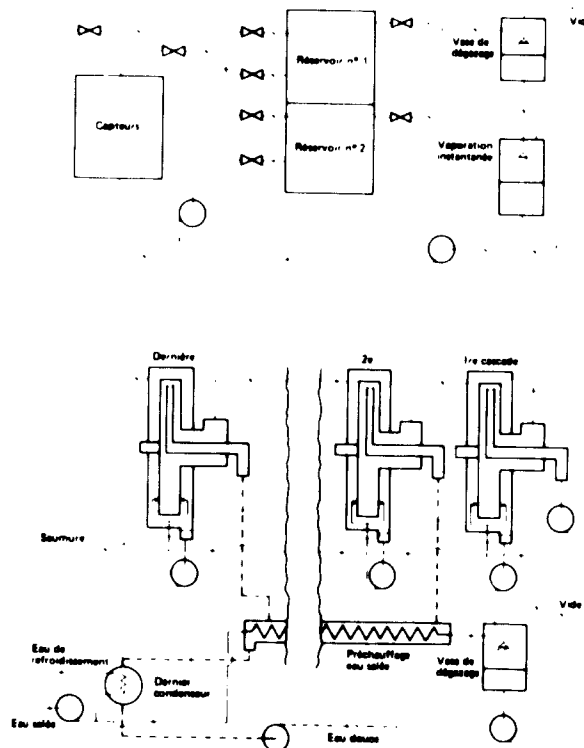


Figure 8. Distillateur "en cascades" à chauffage solaire

⁷Op. cit., p. 439.

dégazage afin d'éliminer les gaz non condensables. De là, l'eau passe dans la chambre de vaporisation instantanée, où une petite partie est vaporisée; le reste est chauffé de nouveau dans les capteurs pendant les heures d'ensoleillement et stocké dans le deuxième réservoir, ou bien est envoyé directement au deuxième réservoir pendant la nuit. Le condensé de la première cascade est renvoyé dans le bouilleur solaire.

La caractéristique propre à ce dispositif est l'utilisation de l'évaporateur de Tleimat, à disques rotatifs en contact avec une pellicule d'eau, qui est un évaporateur à performance très élevée mis au point au Laboratoire de conversion de l'eau de mer de l'Université de Californie, à Berkeley. On a obtenu expérimentalement des coefficients de transfert de chaleur de $2.5 \text{ W cm}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. Ces valeurs sont presque dix fois plus élevées que les valeurs obtenues

dans les distillateurs à plateaux actuellement utilisés pour le dessalement de l'eau de mer. Du fait de ces coefficients très élevés de transfert de chaleur, on peut utiliser un grand nombre de "cascades", ce qui signifie une petite surface de capteurs. Avec les données relatives à l'évaporateur de Tleimat, Tleimat et Howe ont été en mesure de montrer que, pour des températures de $60 \text{ }^\circ\text{C}$ à la sortie du bouilleur solaire et de $20 \text{ }^\circ\text{C}$ à l'admission d'eau salée de refroidissement, il est possible d'avoir 15 "cascades", avec un TDP de 12,8. En outre, du fait que la vapeur à la sortie du bouilleur solaire est demandée à $60 \text{ }^\circ\text{C}$, les capteurs fonctionnent à une température relativement basse, c'est-à-dire avec un rendement élevé. Un tel dispositif pourrait être utilisé pour obtenir une productivité bien supérieure à celle des distillateurs du type bassin.

Distillation solaire de l'eau

Carlo Mustacchi et Vincenzo Cena

Rome (Italie)

La distillation de l'eau est l'utilisation la plus ancienne de l'énergie solaire. Des distillateurs solaires ont été construits il y a 20 siècles. Cependant, sauf dans des milieux particuliers (par exemple des îles) et à des fins particulières (par exemple l'équipement de canots de sauvetage), ce n'est qu'au cours des 20 dernières années qu'il y a eu un renouveau d'intérêt dans ce domaine, à la suite de la croissance démographique dans les régions arides et de l'élévation des niveaux de vie.

Deux démarches très différentes sont possibles : une technique primitive consistant à capter l'énergie solaire et à l'utiliser dans le même appareil, pour évaporer l'eau, avec de faibles rendements et de faibles coûts d'investissement; une technique avancée consistant à réaliser les deux processus indépendamment avec des appareils spécialisés et optimisés en vue d'obtenir de hauts rendements.

Distillateurs solaires

La construction du distillateur solaire le plus primitif exige une feuille de polymère synthétique souple (polyéthylène) d'environ 1 m^2 , un petit récipient, une pierre et une bêche. Cette dernière sert à creuser un trou de forme conique dans le sol. Ce trou est recouvert avec la feuille de synthétique, qui est maintenue en place en empilant sur ses bords la terre retirée du trou. Le récipient est placé au centre du trou pour recueillir l'eau ruisselant de la feuille, au centre de laquelle on a placé la pierre. Aucun apport d'eau n'est nécessaire. La capillarité et les gradients de température et d'humidité du sol sont suffisants pour alimenter ce distillateur. En prenant quelques précautions, telles que couvrir le fond du trou de boue noirâtre bien tassée pour augmenter le pouvoir d'absorption et la capillarité, on obtient des rendements quotidiens de plus de 1 l/m^2 dans des endroits déserts à 500 km de la mer, où l'humidité quotidienne est de l'ordre de 10-15 %. Le coût total (matériaux et main-d'œuvre) d'un tel distillateur est de l'ordre de 1 dollar/ m^2 . Ce faible coût ne justifie pas la construction de grands distillateurs qui exigeraient trop de main-d'œuvre pour la surveillance et l'exploitation (vidage des récipients à l'aube).

L'étape suivante consiste à poser dans le trou un revêtement imperméable noir (goudron, butyl-caoutchouc, polyéthylène) et à sceller les parois à la couverture transparente. L'augmentation du pouvoir d'absorption exige d'alimenter le distillateur en eau (plantes du désert, eau saumâtre, eau de mer, etc.). La géométrie de la cavité semble n'avoir qu'un effet minime sur le rendement quotidien (1.5 l/m^2). L'intérêt que présente la collecte des eaux de pluie conduit à réaliser des constructions à couverture symétrique ou asymétrique. Le bassin peut être fait en terre battue, béton, maçonnerie, amiante-ciment, bois ou polymère synthétique. La couverture est généralement en verre, ou en PVF, polyester ou autre synthétique. L'armature de la couverture peut être dans le même matériau que le bassin en métal (aluminium ou acier galvanisé ou peint). Dans la plupart des distillateurs expérimentaux, les joints d'étanchéité sont en caoutchouc aux silicones, mais des rapports récents sur la bonne durée de vie des asphaltes ou des mélanges d'asphalte et de polyester donnent à penser qu'on peut également utiliser ces produits, notamment si on y ajoute les pigments appropriés pour prévenir toute nouvelle polymérisation ainsi que des fissurations. L'isolation thermique du fond et des parois du distillateur semble moins importante que la préparation du sol pour assurer un bon drainage et prévenir la croissance de végétation qui pourrait endommager le distillateur.

Les comparaisons des prix de revient de différents modèles doivent être fondées sur les coûts locaux des matériaux et de la main-d'œuvre. Les prix varient de 8 à 20 dollars/ m^2 ; très souvent, un investissement plus élevé est largement compensé par de moindres frais d'intervention, d'entretien et d'exploitation. En fait, de grandes installations ($20\text{-}50 \text{ m}^3/\text{j}$) doivent être équipées de systèmes automatiques de remplissage et de vidage, même si ces opérations ne sont effectuées en général qu'une fois par semaine. Les seuls travaux à effectuer sont pratiquement l'entretien de l'installation et le renouvellement des joints d'étanchéité tous les trois ou quatre ans.

L'observation montre que toutes les pertes - par convection, dans le sol et par fuite de vapeur - sont du même ordre de grandeur, soit 4-6 %. On ne voit

guère d'intérêt à chercher une amélioration de la géométrie ou du comportement thermique. L'amélioration du rendement doit plutôt être cherchée dans d'autres directions, par exemple : alimentation du distillateur avec l'eau de refroidissement du condenseur d'une centrale électrique, refroidissement de la couverture du distillateur par préchauffage de l'eau d'alimentation, utilisation de surfaces de condensation (autres que la couverture transparente) ayant un meilleur pouvoir de rayonnement et de convection.

Pour ce qui est des matériaux de construction autres que les joints d'étanchéité, il n'est guère possible de faire de grands progrès techniques. Cependant, on pourrait obtenir davantage de données sur la fiabilité des matériaux selon le mode d'entretien pendant de longues périodes. D'une manière générale, il semble qu'il faille compter sur un prix d'environ 2 dollars/m³ d'eau douce obtenue avec de grands distillateurs (2-50 m³/j).

Il convient de souligner que les distillateurs du type bassin ne constituent pas une bonne solution pour des communautés de plus de 10 000 habitants n'ayant pas d'autre source d'eau douce. Le manque d'une bonne économie d'échelle conduit à des investissements excessifs et la surface de captage est si importante que la tuyauterie et la plomberie deviennent des problèmes majeurs.

Capteurs solaires

Le captage du rayonnement solaire et la transformation de son énergie pour séparer l'eau des sels qui y sont dissous impliquent l'utilisation de capteurs plans associés à une installation classique de dessalement, à plateaux de fractionnement, en cascades ou par compression de vapeur.

Les capteurs plans sont les mêmes que ceux que l'on trouve actuellement sur le marché pour le chauffage de l'eau. Il n'est pas nécessaire de chercher à augmenter la température de fonctionnement, étant donné que 90 °C est actuellement la température maximale de fonctionnement des distillateurs. Au-dessus de cette limite, l'eau de mer est hautement corrosive pour la plupart des matériaux de construction et il se produit une précipitation de sels de calcium, à moins que l'on ne fasse des additions coûteuses de produits chimiques (acide sulfurique, polyphosphates). Même au-dessous de 90 °C, les capteurs doivent être en nickel-cuivre ou en alliage d'aluminium. Cependant, il est souvent préférable de faire circuler de l'eau douce, en circuit fermé, dans un capteur ordinaire en acier et d'ajouter un échangeur de chaleur pour transférer l'énergie thermique à l'eau salée du distillateur.

Pour cet usage, les meilleurs capteurs sont réalisés en montant une double tôle d'acier ondulée dans un boîtier rectangulaire en fibres de verre, acier galvanisé et béton. La surface métallique de captage est recouverte d'une peinture noire mate ou d'un

revêtement sélectif (oxyde de cuivre). Le boîtier est couvert avec une ou deux plaques de verre ordinaire, à quelques centimètres au-dessus de la surface métallique. Au-dessous de cette dernière, on met une isolation thermique (laine minérale, polyuréthane ou polystyrène). Dans l'une de nos expériences, un capteur typique a pour dimensions 1 m x 2 m x 15 cm, avec un boîtier en résine vitreuse de 1 mm, une isolation en mousse d'uréthane de 5 cm, un double vitrage et des joints d'étanchéité aux silicones. Un tel capteur coûte 30-40 dollars/m² en production artisanale; à Rome, il délivre plus de 2,9 x 10⁶ kJ/m² par an. Sous un climat plus sec, entre 10 et 20° de latitude, il peut délivrer environ 7 x 10⁶ kJ/m² par an.

Tous les matériaux de construction (mais non le capteur fini) ont une durée de vie prouvée de 20-25 ans. On espère que la production en série de ces capteurs ferait tomber leur coût à 25-30 dollars/m², alors que le prix de vente de la plupart des capteurs en Europe et aux États-Unis est actuellement de 70-100 dollars/m².

Aucune main-d'oeuvre qualifiée n'est nécessaire pour assembler les capteurs, fabriquer les boîtiers et poser le vitrage.

Les principes de fonctionnement des principaux distillateurs qui peuvent être associés à des capteurs solaires sont décrits ci-dessous.

Méthode des plateaux de fractionnement

Dans cette méthode (figure 1), l'eau de mer est préchauffée par échange de chaleur avec la vapeur d'eau douce en condensation, puis elle reçoit l'apport de l'énergie solaire et est portée à une température de 70-90 °C. On diminue progressivement sa pression dans une série de vases traversés par les serpentins du préchauffage. L'eau douce condensée ruisselle des serpentins; on la recueille et on la fait passer d'un vase à l'autre pour récupérer sa chaleur sensible. La pression la plus élevée et la pression la plus faible sont maintenues, respectivement, à environ 0,8 bar et 0,05-0,07 bar; le nombre de plateaux est tel que la différence totale de température (entre les capteurs solaires et l'eau de mer froide) est fractionnée en baisses d'environ 2 °C par plateau. Les installations commerciales actuelles comprennent de 10 à 30 plateaux. Théoriquement, la chaleur latente d'évaporation est réutilisée dans chaque plateau pour évaporer la même quantité d'eau à une pression plus faible; par conséquent, avec 30 plateaux, le rendement maximal par unité de surface de capteur devrait, théoriquement, être supérieur à 120 l/m² par jour; en pratique, il y a quelques pertes, dues aux baisses de pression, aux petites dimensions des surfaces de transfert de chaleur et à l'augmentation ébullioscopique, de sorte que les rendements réels sont de l'ordre de 60-100 l/m².

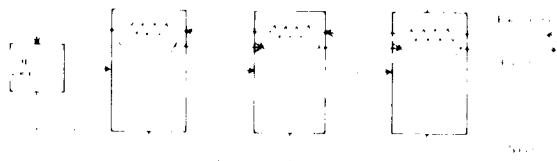


Figure 1. Plateaux de fractionnement

Plusieurs évaluations paramétriques d'installations à plateaux ont été effectuées et les résultats ont été mis en corrélation par l'équation suivante :

$$C = 256\,000 + 853 \sqrt{PN} + 4,5(10\,764) NA + 0,45 P + 20,0 P^{0,8} + 562 P^{0,6} + 12\,900 P^{0,3}$$

où

- P = production d'eau douce (lb/h)
- N = nombre de plateaux
- A = surface de transfert de chaleur par plateau (m^2)
- C = coût (dollars)

En estimant à 200 dollars/j le coût de la main-d'œuvre et le coût des produits chimiques, l'amortissement de C et des capteurs (coûtant 50-70 dollars/ m^2) entraîne une diminution du prix unitaire de l'eau douce de 2 à 1 dollar/ m^3 dans la gamme de 50-500 m^3/h . Ces évaluations, fondées sur les techniques actuelles, sont jugées prudentes. On ne cherche pas à stocker l'énergie solaire pour l'utiliser pendant la nuit; une chaudière à combustible fossile est prévue pour faire fonctionner l'installation en l'absence d'ensoleillement.

Voici les spécifications de deux installations à plateaux optimisées :

| | | |
|---|------------------|------------------|
| Production théorique (lb/h) | 10^5 | 10^6 |
| (kg/h) | 45×10^4 | 45×10^5 |
| Température de l'eau de mer ($^{\circ}F$) | 77 | 77 |
| ($^{\circ}C$) | 25 | 25 |
| Température de la saumure évacuée ($^{\circ}F$) | 82 | 82 |
| ($^{\circ}C$) | 27,8 | 27,8 |
| Baisse de température par plateau ($^{\circ}F$) | 4 | 4 |
| ($^{\circ}C$) | 2,2 | 2,2 |
| Température maximale des capteurs ($^{\circ}F$) | 180 | 200 |
| ($^{\circ}C$) | 82 | 93 |
| Nombre de plateaux | 24 | 29 |
| Évacuation de saumure (10^3 lb/h) | 780 | 6 300 |
| Recyclage de saumure (10^3 lb/h) | 75 | 590 |
| Débit dans les capteurs (10^3 lb/h) | 950 | 7 900 |
| Surface totale de transfert de chaleur (10^3 ft 2) | 60 | 560 |
| (10^3 m 2) | 5,5 | 52 |
| Investissement initial (10^6 dollars) | 3,48 | 16,3 |
| Surface des capteurs (10^3 m 2) | 6,1 | 66 |
| Coût de l'eau douce (dollar/ m^3) | 1,98 | 0,94 |
| Production quotidienne d'eau douce par mètre carré de capteur (l/m 2) | 74 | 68,5 |

Méthode des cascades

Dans cette méthode (figure 2), on utilise également une série de vases avec diminutions de la pression et de la température. Le premier vase est relié directement aux capteurs solaires, tandis que le dernier est maintenu à une température voisine de celle de l'eau de mer. La vapeur produite dans un vase passe dans un serpentin pour chauffer le liquide contenu dans le vase suivant. De la sorte, la chaleur latente est récupérée et transférée de vase en vase. La différence de température entre deux vases est de l'ordre de 10-15 $^{\circ}F$ (5,6-8,3 $^{\circ}C$); par conséquent, on utilise rarement plus de 5-10 vases.

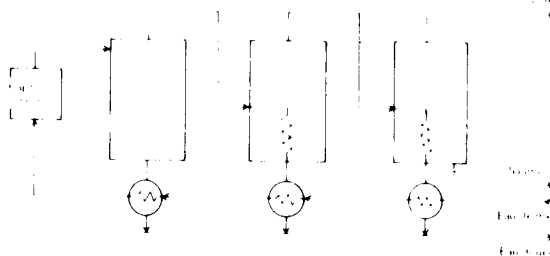


Figure 2. Cascades

Une évaluation paramétrique du coût fondée sur plusieurs ensembles de spécifications détaillées a conduit à l'équation suivante :

$$C = (2 - 1,37 N^{-1}) P + 556 \sqrt{PN} + 4,3 P^{0,8} + 139 P^{0,6} + 7\,120 P^{0,3} + 422\,000$$

Dans cette équation, P et N ont la même signification que dans l'équation précédente. La méthode des cascades semble avoir un léger avantage sur celle des plateaux dans la gamme de 10 à 80 m^3/h , mais elle perd cet avantage pour des capacités plus élevées. Dans la gamme intéressante (environ 50 m^3/h), un modèle typique permettrait de produire de l'eau douce à raison de 1,7-1,8 dollar/ m^3 , y compris l'amortissement, la main-d'œuvre, les capteurs et les produits chimiques.

Autres méthodes

Dans la méthode par compression de vapeur (figure 3), on récupère la chaleur par extraction de la vapeur d'un étage, augmentation de son niveau thermique grâce à un compresseur et utilisation comme vapeur de chauffage pour le même étage ou l'étage suivant. L'analyse des évaluations paramétriques des coûts et des spécifications techniques montre que ce type d'installation n'est pas spécialement satisfaisant, à moins d'être associé au procédé des plateaux. En outre, il semble que l'énergie mécanique nécessaire doive être fournie par un moteur primaire (par exemple un moteur Diesel) et

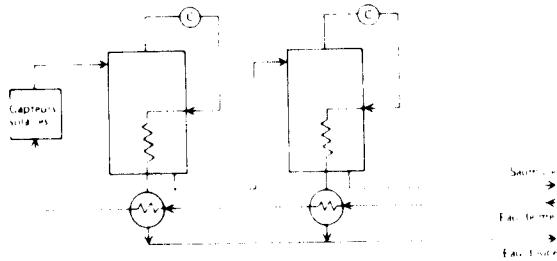


Figure 3. Compression de vapeur

que le refroidissement d'un tel moteur libère plus de chaleur qu'il n'en faut pour tout le processus; il s'ensuit que les capteurs solaires sont inutiles et ne peuvent pas être utilement associés à cette méthode.

Dans la méthode par humidification et déshumidification, on chauffe l'eau de mer dans les capteurs solaires, on sature l'air ambiant dans une tour compacte à contre-courant, puis on récupère l'eau douce en refroidissant l'air humide dans un condenseur où la chaleur est en partie récupérée par préchauffage de l'eau de mer envoyée dans les capteurs. Au stade actuel, ce procédé ne semble pas très prometteur pour fournir uniquement de l'eau douce, mais il peut trouver des applications si l'air humide qui en est un sous-produit est utilisable à d'autres fins (serres, climatisation, etc.).

Limitations et perspectives

À première vue, on peut penser que les distillateurs à bassin soient les seuls qui permettent de tirer pleinement parti de la main-d'œuvre et des matériaux locaux dans les pays en développement. Cependant, la technique soi-disant avancée appliquée pour la construction d'un distillateur à plateaux, par exemple, peut être transférée facilement et est déjà connue dans certains régions arides, car il s'agit en fait de la même technique que pour la construction ou la réparation d'une installation classique de traitement de produits chimiques. Il faudrait évidemment acheter un certain nombre de matériaux spéciaux (par exemple des alliages nickel-cuivre) et sans doute les appareils de vide, mais les équipes de soudeurs et d'assembleurs qui assurent normalement l'entretien d'une raffinerie de pétrole possèdent toutes les qualifications nécessaires pour fabriquer les quelques vases sous pression et échangeurs de chaleur qui constituent un distillateur à plateaux.

Il faut également souligner que plusieurs pays arides (par exemple Bahreïn, Koweït, Qatar et Arabie saoudite) ont déjà construit ou construisent actuellement de grandes installations de dessalement utilisant des combustibles fossiles. Voici une proposition constructive : associer une batterie de capteurs plans à ces installations pour économiser du combustible, sans interrompre leur fonctionnement ou modifier leur conception. Avec un investissement limité, on

pourrait économiser, ou plutôt "geler", la moitié du combustible nécessaire et l'utiliser pour l'achat de capteurs qui, après une période d'environ 10 ans, fourniraient une énergie pratiquement gratuite.

Cela permettrait de surmonter l'une des principales difficultés que posent les installations solaires de dessalement : les fluctuations de l'apport d'énergie thermique. Les grandes installations de dessalement sont conçues de telle sorte que les baisses de pression entre les vases successifs sont déterminées par le niveau de liquide dans chaque vase; toute augmentation ou diminution de l'apport de chaleur entraîne une variation des débits et déséquilibre le fonctionnement de l'ensemble. Par conséquent, à moins de concevoir de nouveaux modèles d'installations solaires de dessalement, il faut prendre des mesures pour que les fluctuations de température à la source restent comprises entre 2 et 5 °C. Cela peut être réalisé de l'une des manières suivantes :

- a) Chaudière d'appoint à combustible fossile;
- b) Fermeture de l'installation pendant la nuit;
- c) Réservoir de stockage de l'énergie thermique.

La solution *a* est celle qui a été envisagée dans les évaluations ci-dessus; elle correspond à la proposition d'ajouter des capteurs solaires aux installations actuelles de dessalement. La solution *b* commence à devenir possible; en effet, les modèles les plus récents d'installations de dessalement impliquent des temps de démarrage d'environ 15 minutes, ce qui signifie une perte de chaleur très limitée. La solution *c* exige encore des travaux de R-A afin de la rendre économiquement possible, mais c'est évidemment la plus prometteuse.

Une analyse récente des principales méthodes de stockage des énormes quantités d'énergie thermique nécessaires au fonctionnement d'une grande installation de dessalement pendant la nuit a conduit aux conclusions suivantes. Il faut écarter l'idée de stocker de l'eau chaude, car cela augmenterait d'environ 2 dollars/m³ (amortissement des réservoirs) le coût de l'eau douce, c'est-à-dire qu'il ferait plus que doubler. Le stockage chimique, fréquemment préconisé dans de nombreuses propositions, n'est pas encore satisfaisant. Par exemple, la libération d'ammoniac d'un absorbant tel que le chlorure de calcium pendant le jour et sa réabsorption pendant la nuit en vue d'utiliser la chaleur de la réaction exigent la compression et la liquéfaction de l'ammoniac, c'est-à-dire une consommation de chaleur presque aussi importante que la quantité stockée. Une autre possibilité est le stockage de chaleur par fusion d'un composé et récupération de la chaleur latente de fusion lorsque le composé se solidifie pendant la nuit. Les quatre études qui ont été faites donnent à penser que cette solution est réalisable avec de la paraffine (point de fusion 70-80 °C) conservée dans des sacs en polyéthylène dans les réservoirs d'eau tiède. On éco-

nomiserait ainsi 50-80 % du volume des réservoirs pour le stockage de la même quantité d'énergie thermique. Les travaux continuent dans cette voie.

Tendances futures

Plusieurs projections des tendances du marché mondial des combustibles fossiles et des combustibles nucléaires montrent que le coût de l'énergie augmentera d'environ 50 % tous les 10 ans. A l'heure actuelle, dans une grande installation (50-500 m³/h) produisant de l'eau douce à 1-2 dollars/m³, le coût du combustible représente 0,75 dollar/m³. Dans 20 ans, le coût du combustible sera passé à environ 1,7 dollar/m³, tandis que les capteurs solaires seront entièrement amortis et que le coût de l'énergie sera donc nul. L'économie totale serait donc de cet ordre de grandeur. Cependant, la difficulté pour la plupart des pays en développement est d'obtenir suffisamment de capitaux pour l'achat et l'installation de capteurs. Il ne faut pas oublier que, dans la gamme mentionnée, les capteurs représentent 5-25 % de l'investissement total. Il faut donc se poser la question suivante: peut-on accepter cet investissement supplémentaire aujourd'hui en vue de réduire de moitié environ le coût de l'eau douce dans 15 ou 20 ans? Si l'on ne peut pas obtenir tous les capitaux nécessaires au départ, l'utilisation croissante de distillateurs solaires constitue une bonne solution. Leur caractère modulaire permet d'installer un petit nombre d'unités chaque année ou chaque fois que l'on peut acheter les quelques matériaux nécessaires (essentiellement du vitrage).

Cette solution semble être la meilleure, tout au moins lorsque la population concernée est inférieure à 5 000-6 000 personnes, ce qui est le cas de la plupart des villages dans les régions arides du monde.

BIBLIOGRAPHIE

- Bahadori, M. N. et F. E. Eldin. Improvement of solar stills by the surface treatment of the glass. *Solar energy* (Elmsford, N.Y.) 14:339, 1973.
- Baum, V. A. Solar distillers. Communication présentée à la Conférence des Nations Unies sur les nouvelles sources d'énergie, Rome, 21-31 août 1961. *Energie solaire*, III, v. 6, p. 178 (S/119). Numéro de vente : 63.1.40.
- Bloemer, J. W. Experimental investigation of the effect of several factors on solar still performance. Ohio State University, 1963. Thèse de doctorat.
- _____ Factors affecting solar-still performance. *Journal of heat transfer* (New York) 65, novembre 1965.
- Brice, D. B. Saline Water conversion by flash evaporation utilizing solar energy. *American Chemical Society*, Washington, D.C. 1960. (Advances in Chemistry Series 38.)
- _____ Sunshine fuel combine for desalination. *Chemical and engineering news* (Washington, D.C.) 40:72, 1962.
- Cooper, P. I. Digital simulation of transient solar still processes. *Solar energy* (Elmsford, N.Y.) 12:3:313-331, mai 1969.
- _____ Some factors affecting the absorption of solar radiation in solar stills. *Solar energy* (Elmsford, N.Y.) 13:373, 1972.
- _____ The absorption of radiation in solar stills. *Solar energy* (Elmsford, N.Y.) 12:333, 1969.
- _____ The maximum efficiency of single-effect stills. *Solar energy* (Elmsford, N.Y.) 15:205, 1973.
- Delyannis, A. Water from the sun. *New Scientist* (Londres) 34:388, mai 1967.
- Delyannis, A. et E. Delyannis. Sea water distillation through solar radiation. *Chemie-Ingenieur-Technik* (Weinheim, République fédérale d'Allemagne) 41:90, février 1969. Texte en allemand, résumés en anglais et en allemand.
- _____ The Gwadar, Pakistan, solar distillation plant. Paper prepared for the Solar Energy Society Meeting, Palo Alto, Californie, octobre 1968.
- _____ Operation of solar stills. Communication présentée à la Réunion d'experts (Nations Unies) sur la distillation solaire, octobre 1968.
- Delyannis, A. et E. Piperoglou. Solar distillation development in Greece. *Sun at work*, 12:1:14, 1967.
- Dunkle, R. V. A simple solar water heater and still. Paper presented at joint AIRAH-SES Meeting, Perth, mai 1971.
- _____ Solar water distillation: the roof-type still and a multiple effect diffusion still. University of Colorado, 1961. (International Heat Transfer Conference, part 5: International Dev. a Heat Transfer, p. 895.)
- Dzhabaliev, P. A. Determination of the aerodynamic coefficients of solar stills in relation to the leakage of steam-air mixture. *Applied Solar energy* (New York) 1:4:31-36, juillet/août 1965.
- _____ Effect of leakage from a solar still on its performance under thermal head. *Applied solar energy* (New York) 1:4:37-42, juillet/août 1965.
- Edlin, F. E. Air supported solar still. E. I. du Pont de Nemours, US patent No. 3,174,915, mars 1965.
- Eibling, J. A., S. G. Talbert et G. O. G. Löf. Solar stills for community use—digest of technology. *Solar energy* (Elmsford, N.Y.) 13:263, 1971.
- Gomkale, S. D. et R. L. Datta. Solar energy applications in India. *Solar energy* (Elmsford, N.Y.) 14:321, 1973.

- Some aspects of solar distillation for water purification. *Solar energy* (Elmsford, N.Y.) 14:387, 1973.
- Hay, H. R. Plastic solar stills: past, present and future. *Solar energy* (Elmsford, N.Y.) 14:393, 1973.
- Khanna, M. L. Solar water distillation in North India. *Journal of scientific and industrial research* (New Delhi) 21A:9:429-433, septembre 1962.
- Solar water distillation in North India. New York, Plenum Press, 1964. Actes du Séminaire international sur l'énergie solaire et l'énergie éolienne, Sounion (Grèce), septembre 1961.
- Lawand, I. A. et R. Alward. Plans for a glass and concrete solar still. *Brace Research Institute Technical Reports* (Macdonald College of McGill University, Ste. Anne de Bellevue, Québec) 58, décembre 1968.
- Löf, G. O. G. Application of theoretical principles in improving the performance of basin-type solar distillers. Communication présentée à la Conférence des Nations Unies sur les nouvelles sources d'énergie, Rome, 21-31 août 1961. *Energie solaire*: III, v.6, p. 266 (S/77). Numéro de vente: 63.140.
- Löf, G. O. G., J. A. Eibling et J. W. Bloemer. Energy balances in solar distillers. *AIChE journal* (New York) 7:4:641-649, décembre 1961.
- Martens, C. P. Theoretical determination of flux entering solar stills. *Solar energy* (Elmsford, N.Y.) 10:2:77-80, avril/juin 1966.
- Morse, R. N. Solar distillation in Australia. *Civil engineering* (New York) 38:39-41, août 1968.
- The theory of solar still operation. Communication présentée à la Réunion d'experts (Nations Unies) sur la distillation solaire, octobre 1968.
- Morse, R. N. et W. R. W. Read. A rational basis for the engineering development of a solar still. *Solar energy* (Elmsford, N.Y.) 12:5, 1968.
- Morse, R. N., W. R. W. Read et R. S. Frayford. Operating experiences with solar stills for water supply in Australia. Paper presented at the Solar Energy Society Annual Meeting, Palo Alto, Californie, octobre 1968.
- Proctor, D. The use of waste heat in a solar heater. *Solar Energy* (Elmsford, N.Y.) 14:433, 1973.
- Satcunanathan, S. et H. P. Hansen. An investigation of some of the parameters involved in solar distillation. *Solar energy* (Elmsford, N.Y.) 14:353, 1973.
- Scope and development of solar stills for water desalination in India. Par S. Y. Ahmed et al. *Desalination* (Amsterdam) 5:1:64-74, 1968.
- Soliman, S. H. Effect of wind on solar distillation. *Solar energy* (Elmsford, N.Y.) 13:403, 1972.
- Szulmayer, W. Solar stills low thermal inertia. *Solar energy* (Elmsford, N.Y.) 14:415, 1973.
- Telkes, Maria. Fresh water from sea water by solar distillation. *Industrial and engineering chemistry* (Washington, D.C.) 45:5:1108, mai 1953.
- Tlemat, B. W. et F. D. Howe. Comparison of plastic and glass condensing covers for solar distillers. Proceedings of the Solar Energy Society Conference, Phoenix, Arizona, mars 1967.
- Weihe, H. Fresh water from sea water: distilling by solar energy. *Solar energy* (Elmsford, N.Y.) 13:439, 1972.

Rapports publiés par l'United States Department of the Interior, Bureau des eaux salines, Washington, D.C.

- No. 13 Research on methods for solar distillation (by M. Telkes). Décembre 1965.
- No. 50 Study and evaluation of solar sea-water stills. Septembre 1961.
- No. 60 Development of an improved solar still (by W. N. Grune et al.). Mars 1965.
- No. 147 Second two years' progress on study and field evaluation of solar-water stills (by the Battelle Memorial Institute). Juillet 1965.
- No. 190 Final three years' progress on study and field evaluation of solar sea-water stills (by the Battelle Memorial Institute). Mai 1966.
- No. 233 Conceptual design study of a 50 million gallon per day msf desalination plant and test module. Novembre 1966.
- No. 251 Parametric cost studies of the multistage flash process. Mars 1967.
- No. 276 Preliminary design of a diesel-powered vapour-compression plant for evaporation of sea-water. Août 1967.
- No. 355 Analysis and optimization of a multi-effect multi-stage flash distillation system. Mai 1968.
- No. 438 Sea water corrosion control by environment modification. Avril 1969.
- No. 479 Test facility and vertical-tube-evaporator test-bed plant, Freeport, Texas. Annual report. Septembre 1969. (FY 1968)
- No. 490 Multistage flash distillation. Desalting state-of-the-art, 1968. Octobre 1969.
- No. 492 Pilot plant tests and design study of a 2.5 MGD horizontal-tube multiple-effect plant. Octobre 1969.
- No. 546 Manual on solar distillation of saline water. Avril 1970.
- No. 635 Seawater desalting with chemical recovery. Janvier 1971.
- No. 638 Economic analysis of the membrane water desalting processes. Décembre 1970.
- No. 641 Study of unconventional methods for brine concentration. Avril 1971.

Perspectives des séchoirs agricoles solaires dans les régions en développement

T. A. Lawand

Institut de recherche Brace, Collège Macdonald de l'Université McGill, Québec (Canada)

Introduction

Dès l'aube de la civilisation, l'énergie solaire a été utilisée pour sécher et conserver les surplus agricoles. Les méthodes sont simples et souvent primitives, mais raisonnablement efficaces. Essentiellement, les récoltes sont répandues sur le sol ou sur des plates-formes, souvent sans aucun traitement préalable, et sont brassées régulièrement jusqu'à ce qu'elles soient suffisamment séchées pour pouvoir être stockées pour consommation ultérieure. Cela demande beaucoup de travail manuel, mais peu de capitaux pour l'achat de matériel.

On sèche ainsi des produits très divers : fruits, légumes, céréales, grains, peaux, cuirs, viandes, poissons et tabac. Il n'existe probablement aucune évaluation précise des vastes quantités de produits séchés de la sorte. Le séchage au soleil est une technique très répandue, utilisée dans presque tous les pays du monde et sous pratiquement toutes les latitudes.

Etant donné que le séchage au soleil est pratiqué dans beaucoup de pays en développement, persuader les populations locales de consommer des denrées déshydratées ne pose aucun problème social important. En revanche, cette méthode de séchage pose divers problèmes techniques :

- a) Elle est intermittente, du fait des nuages et de la pluie;
- b) Les produits sont exposés aux poussières et à la pollution atmosphérique;
- c) Les produits ne sont pas à l'abri des prédateurs (hommes ou animaux);
- d) Les produits peuvent être infestés par les insectes.

Dans les segments les plus avancés de la société, aussi bien dans les régions en développement que dans les régions industrialisées, le séchage artificiel a souvent supplanté le séchage traditionnel au soleil en vue d'assurer un meilleur contrôle de la qualité, de réduire les dommages et de minimiser les pertes dues aux divers agents mentionnés ci-dessus.

Le coût élevé de la main-d'œuvre dans la plupart des régions industrialisées et, jusqu'à une date récente, le faible coût des combustibles fossiles ont incité à mettre au point divers procédés de séchage artificiel en grandes quantités. Le coût de la déshydratation était ajouté au prix de vente des produits traités. L'augmentation du coût des combustibles fossiles et la perspective d'un approvisionnement de plus en plus difficile ont stimulé un regain d'intérêt pour les séchoirs agricoles solaires.

On évalue à 255×10^6 tonnes la quantité de produits agricoles déshydratés en 1968 grâce à l'énergie solaire. En 1968, l'Australie a exporté plus de 72×10^4 tonnes de produits séchés au soleil, représentant une valeur de plus de 27 millions de dollars. Au cours des 30 dernières années, on a porté une attention croissante à la mise au point de séchoirs solaires fondés sur des principes connus d'héliotechnique, en vue de surmonter certains des principaux inconvénients du séchage traditionnel au soleil.

Dans l'évaluation des techniques qui pourraient convenir aux régions en développement, il convient de faire la distinction entre grandes et petites opérations. Par petites opérations, on entend celles auxquelles se livrent les fermiers, pêcheurs et éleveurs qui n'ont que des surplus modestes. L'objectif est la déshydratation de ces surplus pour les consommer ultérieurement ou les vendre sur le marché local voisin. Parfois, les petits surplus de certains produits tels que les arachides ou le riz sont livrés à des installations centrales pour traitement, déshydratation et commercialisation. Ces systèmes sont généralement bien établis et exigent un certain degré d'organisation de l'industrie. Cependant, de telles installations de manipulation n'existent pas toujours. Par conséquent, dans le choix de la technique appropriée, il faut faire une distinction selon qu'une localité voisine possède ou non une infrastructure commerciale.

Les grandes opérations exigent toujours une source extérieure d'énergie. Lorsque l'énergie électrique est disponible, fiable et à un prix abordable, il est logique de l'utiliser pour actionner les ventilateurs,

soufflantes et autres dispositifs nécessaires pour augmenter le rendement et la performance des séchoirs. Il existe des séchoirs portatifs, motorisés, dans lesquels des capteurs solaires sont associés à des ventilateurs électriques (on peut également utiliser des moteurs à essence ou des moteurs Diesel); ces séchoirs sont amenés directement sur les lieux de production pour le séchage *in situ*. Traditionnellement, cette méthode était utilisée avec des combustibles fossiles, le plus souvent du butane ou du propane, comme source d'énergie. Comme le coût de ces combustibles augmente, on cherche à mettre au point des installations du même type fonctionnant essentiellement à l'énergie solaire. En fait, des combustibles fossiles sont parfois utilisés en association avec des capteurs solaires en vue de maintenir des conditions optimales de fonctionnement.

L'autre grand procédé de déshydratation appliqué dans les secteurs industrialisés des pays développés et des pays en développement consiste à utiliser la surface de toiture de certains bâtiments pour l'installation de capteurs solaires et d'équiper ces bâtiments avec les soufflantes, canalisations et autres éléments nécessaires. Aux Etats-Unis, l'Université polytechnique de Californie et Thompson Ramo Wooldridge Systems ont entrepris un projet, financé par le gouvernement, visant à remplacer le gaz naturel par l'énergie solaire dans la déshydratation. Le seul Etat de Californie produit annuellement pour plus de 450 millions de dollars de fruits et légumes. Le séchage solaire deviendra certainement de plus en plus rentable avec l'escalade du prix des combustibles fossiles.

Une autre méthode qui retient de plus en plus l'attention, aussi bien dans les pays développés que dans les régions en développement, est l'utilisation de serres pour déshydrater les surplus agricoles. Cette combinaison (culture en serre et séchage) présente de nombreux avantages et doit être étudiée pour chaque cas d'espèce. Enfin, une méthode plus ancienne, mais certainement aussi valable que les autres, consiste à utiliser la chaleur que l'on peut récupérer sous les toits des bâtiments. Cette méthode, qui est l'une des plus anciennes pour le séchage solaire des produits agricoles, s'est révélée très satisfaisante dans de nombreux cas.

Principes fondamentaux du séchage solaire

Les deux phases essentielles du processus sont le chauffage solaire du fluide de travail (en général l'air) et le séchage lui-même, au cours duquel le fluide chaud extrait l'humidité des produits à sécher.

La première phase peut être réalisée de deux manières : 1) indirectement, avec des capteurs solaires séparés, utilisant la convection naturelle ou forcée pour réchauffer l'air ambiant et réduire son humidité relative; 2) directement, par chauffage *in situ* de l'air qui déshydrate directement les produits.

Une discussion de la théorie de séchage sortirait du cadre de cet article, mais on peut exposer quelques principes applicables au séchage direct par rayonnement, compte tenu du fait que l'on a examiné ailleurs les principes du séchage dans des enclos opaques au moyen d'air chaud, que l'énergie nécessaire à son chauffage soit d'origine solaire ou autre.

La première condition est un transfert de chaleur à la surface du produit humide par l'un des moyens suivants : conduction des surfaces chaudes en contact avec le produit; conduction et convection de l'air adjacent porté à une température bien supérieure à celle du produit à sécher; rayonnement des surfaces chaudes environnantes ou du soleil. L'absorption de chaleur par le produit fournit l'énergie nécessaire à la vaporisation de l'eau qu'il contient, environ 2,5 kJ (590 cal) par gramme d'eau évaporée. L'eau commence à se vaporiser à la surface du produit humide lorsque l'énergie absorbée a suffisamment augmenté la température pour que la pression de la vapeur d'eau soit supérieure à la pression partielle dans l'air environnant. L'état d'équilibre est atteint lorsque la chaleur requise pour la vaporisation devient égale au taux d'absorption de chaleur par l'environnement.

Pour remplacer l'humidité extraite à la surface, il faut qu'il y ait diffusion d'eau du centre vers la surface du produit. Ce processus peut être rapide ou lent, selon la nature du produit et sa teneur en eau à tout moment. Cela peut donc limiter la vitesse du processus de séchage; mais si la vitesse de diffusion de l'humidité est rapide, le facteur limitatif peut être le taux d'absorption de chaleur à la surface ou le taux de vaporisation. Dans quelques produits très poreux, la vaporisation peut avoir lieu même au-dessous de la surface apparente du produit, la vapeur se diffusant alors à travers les pores du produit.

Dans le séchage direct par rayonnement, une partie du rayonnement peut pénétrer à l'intérieur du produit et y être absorbée dans la partie solide. Dans de telles conditions, il y a production de chaleur à l'intérieur du produit et à sa surface, et le transfert de chaleur dans la partie solide est facilité.

Pour des raisons économiques, on cherche normalement à obtenir une vitesse maximale de séchage. Cependant, il faut tenir compte de la qualité du produit final; dans beaucoup de cas, cela signifie qu'il faut éviter des températures excessives. En outre, étant donné que le séchage s'effectue en surface, il ne faut pas sécher trop rapidement des produits dans lesquels il peut y avoir formation d'une croûte dure et relativement imperméable au transfert de liquide et de vapeur. Les taux de transfert de chaleur et de vaporisation doivent être étroitement contrôlés, soit en limitant l'apport de chaleur, soit en réglant l'humidité de l'air ambiant.

Il y a séchage adiabatique d'un produit lorsqu'on permet simplement la circulation d'air sec, sans apport direct ou indirect de chaleur. Le chaleur nécessaire à la vaporisation de l'humidité est fournie

par l'air, ce qui réduit sa température tout en augmentant son humidité absolue et son humidité relative. Etant donné que la capacité thermique de l'air est faible en comparaison de la chaleur latente de vaporisation de l'eau, il faut utiliser de grandes quantités d'air relativement sec dans ce type de séchage. L'air sortant du séchoir est presque saturé d'eau à la température de la boue mouillée. Les solides humides au contact de cet air sont à peu près à la même température.

La généralisation ci-dessus doit être quelque peu modifiée si les produits en séchage sont solubles, même faiblement, dans l'eau présente. Les fruits et certains autres produits agricoles contiennent des sels et des sucres qui provoquent un abaissement de la pression de vapeur. Pour qu'il y ait vaporisation, il faut donc que les températures superficielles de ces produits soient supérieures à la température de la boue mouillée pour l'air ambiant. Cela signifie que le séchage adiabatique de ces produits exige de l'air à une humidité relative plus faible que dans le cas de produits n'ayant pas de parties solubles dans la phase aqueuse.

Une propriété importante des produits séchés par rayonnement direct est leur pouvoir d'absorption du rayonnement. Heureusement, la plupart des solides ont des pouvoirs d'absorption relativement élevés, mais ils peuvent changer au cours du séchage, leur surface devenant moins ou parfois plus "noire" pendant le processus. En outre, il peut se produire des modifications de l'opacité de la surface de produits qui sont partiellement transparents pour certaines longueurs d'onde représentées dans le spectre de la source de rayonnement.

La conductibilité thermique du produit est également une propriété importante, notamment s'il est séché en couches suffisamment épaisses pour exiger la conduction de chaleur de particule à particule. Si la conductibilité thermique est faible, la circulation d'air chaud à travers et entre les particules de solide humide permettra un meilleur transfert de chaleur que le rayonnement direct à la surface d'une couche épaisse de particules.

Dans les grandes opérations de déshydratation, la convection forcée en général grâce à une source d'énergie extérieure et non renouvelable augmente la diffusion de l'humidité et, convenablement appliquée, augmente la vitesse de déshydratation tout en améliorant la qualité du produit.

Les séchoirs agricoles solaires généralement utilisés dans les pays en développement pour les petites opérations de séchage sont brièvement décrits ci-après.

Classement des séchoirs

Les séchoirs solaires sont classés selon le mode de chauffage, c'est-à-dire la manière dont on utilise la chaleur produite par le rayonnement solaire. On a

ainsi créé quelques grandes catégories, qui sont définies ci-après. En général, un séchoir est classé selon son mode principal de fonctionnement. Certains séchoirs à chauffage direct ou à chauffage combiné comportent également des ventilateurs de circulation et ne sont donc pas, à proprement parler, des systèmes entièrement passifs. On appelle systèmes passifs les séchoirs qui utilisent uniquement l'énergie solaire ou l'énergie éolienne.

Séchoirs naturels. Ces séchoirs utilisent l'action naturelle du rayonnement solaire ambiant, ainsi que celle de la température, de l'humidité et du mouvement de l'air.

Séchoirs solaires à chauffage direct. Dans ces appareils, les produits à sécher sont placés dans une chambre ayant une couverture ou des parois transparentes. La chaleur est produite par absorption du rayonnement solaire qui frappe les produits eux-mêmes, ainsi que les surfaces internes de la chambre. Cette chaleur provoque la vaporisation de l'humidité des produits. En outre, elle dilate l'air contenu dans la chambre, et le courant d'air ainsi produit sert à évacuer cette humidité.

Séchoirs solaires à chauffage combiné (direct et indirect). Dans ces séchoirs, l'action combinée du rayonnement solaire frappant directement les produits et de l'air préchauffé dans un chauffe-air solaire fournit la chaleur nécessaire au séchage.

Séchoirs solaires à chauffage indirect. Dans ces séchoirs, le rayonnement solaire ne frappe pas directement les produits. L'air est chauffé dans des capteurs, puis envoyé dans la chambre de séchage pour déshydrater les produits.

Séchoirs solaires à bois. Ces séchoirs ont été classés dans une catégorie spéciale, car ils constituent une application importante de cette technologie. Dans la plupart des cas, on a recours à la ventilation forcée, car une circulation contrôlée de l'air permet de régler la vitesse de séchage afin d'éviter la cémentation du bois.

Autres définitions

Un séchoir coffre est un séchoir dans lequel les produits sont placés dans une chambre fermée.

Un séchoir à claies est un séchoir dans lequel les produits sont disposés sur des grillages ou des plateaux en treillis.

Un séchoir hybride est un séchoir dans lequel on utilise une source supplémentaire d'énergie (fuel ou électricité) pour obtenir davantage de chaleur ou pour assurer la ventilation.

Les caractéristiques de un ou deux séchoirs solaires appartenant à chacune des catégories définies ci-dessus sont décrites ci-après.

Caractéristiques de divers séchoirs

Séchage du raisin sur claies (Australie)¹

En Australie, le raisin est séché sur claies au soleil depuis assez longtemps. En 1972, environ 100 000 t de raisin frais ont été séchées sur claies en 8-14 jours.

Les claies de séchage sont constituées de 8-12 rangées de grillage galvanisé. Ce grillage est renforcé de chaque côté par du fil de clôture. Ses extrémités reposent sur deux piliers scellés dans le sol et étayés pour supporter la charge. On estime qu'un séchoir de 50 m contient assez de rayonnages pour sécher la récolte de 3 acres (1,2 ha) de vignes.

Les claies peuvent être recouvertes d'un toit pour protéger les raisins contre la pluie ou un soleil excessif, ce qui donne un produit de meilleure qualité. La toiture est faite en tôles ondulées fixées dans le sens de la largeur. Le toit débord de chaque côté pour empêcher l'eau de pluie de ruisseler sur les claies. Le toit n'est pas en pente, de sorte que le vent entraîne l'eau de pluie loin des fruits, quelle que soit sa direction. Pour certains cépages, le séchage à l'ombre donne une qualité supérieure; pour les ombrager, on pend des rideaux en toile d'emballage de chaque côté des claies. (Certains tissus doivent être évités en climat humide, car une humidité excessive favorise la moisissure).

Séchoir naturel vertical (Colombie)²

En Colombie, on a essayé un séchoir vertical conçu pour sécher le manioc en grains. Il consiste en deux grillages fixés sur deux panneaux en bois, fichés dans le sol et servant en même temps de supports et de parois terminales. Des ouvertures dans le haut et le bas permettent de charger et de décharger facilement le séchoir. Dans le prototype expérimental, la distance entre les parois était variable, afin de pouvoir charger différents volumes de manioc sur la surface exposée. L'ensemble est recouvert d'un toit en bois pour protéger le manioc contre la pluie et pour permettre au séchage de continuer pendant la nuit. Cette méthode de séchage donne un manioc de très bonne qualité, facile à manipuler et à stocker.

Séchoir coffre solaire (République arabe syrienne)³

Un séchoir coffre conçu pour utiliser directement le rayonnement solaire a été utilisé en République arabe syrienne pour sécher une grande variété de produits agricoles. Il est facile à construire avec pratiquement n'importe quel matériau disponible

¹ Chercheur principal: J. V. Possingham, Division de la recherche horticole du CSIRO, Adélaïde (Australie).

² Chercheur principal: Gonzola Roa, Département d'ingénierie agricole, Université del Valle, Cali (Colombie).

³ Chercheur principal: T. A. Lawand, Institut de recherche Brace, Collège Macdonald de l'Université McGill, Ste Anne de Bellevue, Québec (Canada).

localement et simple à exploiter, entretenir et régler. Essayé et utilisé dans de nombreux pays à climats différents, ce séchoir s'est révélé très efficace.

C'est essentiellement une chambre chaude dans laquelle on peut déshydrater de petites quantités de fruits, légumes ou autres produits. Le fond et les parois sont calorifugés, la couverture consiste en une double épaisseur de matière transparente. Le rayonnement solaire traverse cette couverture et est absorbé sur les surfaces intérieures noires. Du fait de l'isolation thermique, la température interne augmente. Des événements ménagés sur le fond et à la partie supérieure des parois latérales et arrière permettent une bonne ventilation. A mesure que la température augmente, la convection naturelle assure l'évacuation de l'air chaud par les événements supérieurs et l'entrée d'air frais par les événements dans le fond. Il y a donc un courant d'air constant sur les produits en séchage, qui sont placés sur des claies.

Séchoir inclinable (Côte d'Ivoire)⁴

Le séchoir inclinable a été mis au point en Côte d'Ivoire pour le séchage des grains de café et de cacao. Il a été amélioré ultérieurement, à la suite de travaux financés par le Gouvernement du Ghana et la FAO. Ce séchoir très simple convient parfaitement à de petites opérations et son exploitation est très facile. On envisage son utilisation dans les régions tropicales. La possibilité d'incliner le séchoir de part et d'autre de son plan vertical permet aux produits de recevoir plus de rayonnement solaire direct pendant la journée, d'où un meilleur rendement et un séchage plus uniforme.

Le séchoir consiste essentiellement en un plateau rectangulaire à cadre en bois, divisé dans le sens de la longueur en canaux parallèles d'égale largeur. Des traverses assurent une bonne rigidité. Le fond du plateau, sur lequel reposent les produits, est en bambou tressé. La couverture est une feuille de PVC transparent qui assure une bonne protection contre le rayonnement ultraviolet, ce qui diminue la photodégradation des produits. Toutes les parties internes du séchoir sont revêtues de peinture noire mate.

Le plateau est accroché à un portique orienté nord-sud, dont la hauteur est égale au quart de la longueur du plateau. Le plateau peut donc être incliné vers l'est le matin et vers l'ouest l'après-midi.

La surface utile du séchoir est limitée par deux traverses fixées à 20 cm de chaque extrémité et par deux autres traverses, distantes de 30 cm, de part et d'autre du centre du plateau. Les trois rectangles noirs ainsi délimités sont toujours laissés vides de produits; leur objet est de convertir en chaleur le rayonnement solaire. L'air chaud circule par convection naturelle du bas vers le haut du plateau, grâce à des ouvertures ménagées à chaque extrémité. Par

⁴ Chercheurs principaux: M. Richard et M. Vincent, Institut français du café et du cacao, Paris (France).

Séchoir à chauffage solaire auxiliaire (Etats-Unis)⁸

Une chambre de séchage classique peut être transformée en séchoir solaire à chauffage indirect en utilisant la structure initiale. On peut réaliser ainsi d'importantes économies de combustible.

Le séchoir est orienté est-ouest, le côté sud du toit étant utilisé comme capteur solaire (figure 3). Le capteur est incliné d'environ 30° sur l'horizontale et est conçu pour produire une augmentation optimale de température de $5-12^\circ\text{C}$ par rapport à la température ambiante. On dispose de 1 m^2 de capteur pour 2 m^3 de grain. Ce rapport assure un rythme de séchage acceptable pour le maïs décortiqué. La surface du toit est peinte en noir pour absorber l'énergie solaire. Une feuille de matière transparente est tendue à 8 cm au-dessus du toit. L'air, attiré par un ventilateur, pénètre le long de l'arête entre le toit et la feuille transparente, descend le long du côté sud du toit, puis le long de la paroi sud jusqu'à la canalisation d'air extérieure; le ventilateur propulse l'air chaud dans la canalisation d'air intérieure, puis à travers le grain qui repose sur un treillage. La chambre

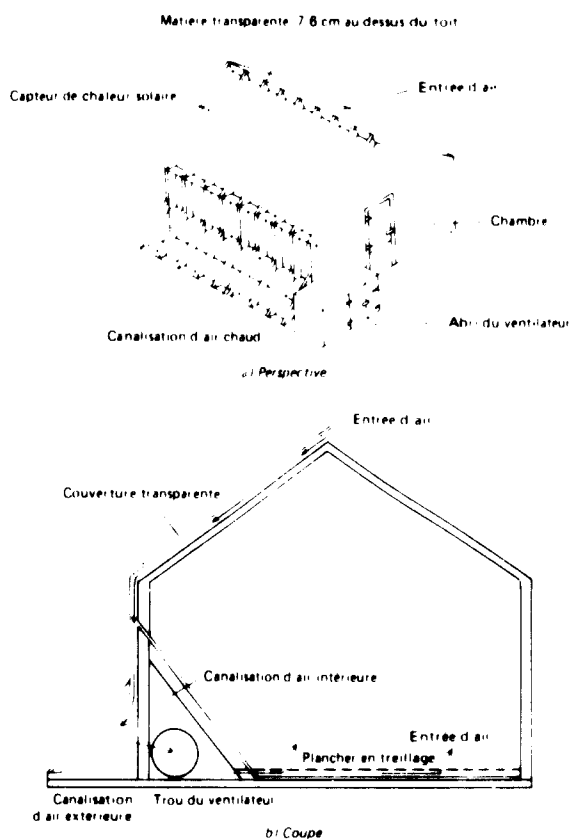


Figure 3. Séchoir à chauffage solaire auxiliaire

⁸ Chercheur principal: W. H. Peterson, Université d'Etat du Dakota du Sud, Département de l'ingénierie agricole, Brookings, South Dakota (Etats-Unis).

est conçue pour sécher en une fois un volume de maïs décortiqué la remplissant jusqu'à la moitié de sa hauteur ($1,22\text{ m}$). Le ventilateur doit être capable de délivrer 2 m^3 d'air par minute pour chaque mètre cube de maïs à sécher, en supposant que le séchoir est plein.

Grand séchoir agricole solaire (La Barbade)⁹

Le grand séchoir agricole de La Barbade a été conçu pour sécher des aliments pour animaux, essentiellement du maïs. Il fonctionne en deux phases, séchant $0,9\text{ m}^3$ (770 kg) de maïs fraîchement décortiqué par jour. Dans la première phase, on utilise un chariot de séchage, à chauffage solaire, dans lequel l'humidité du maïs fraîchement fauché est abaissée de 30% à 18% le premier jour. Le maïs est ensuite transféré dans un séchoir solaire, d'une capacité de 18 m^3 , où l'humidité est progressivement réduite jusqu'à la teneur d'équilibre de 13% . On a prêté une attention particulière à la circulation de l'air, afin que la baisse de pression soit minimale dans tous les éléments des chauffe-air et des chambres de séchage.

Dans le séchoir mobile, un ventilateur centrifuge insuffle de l'air, à travers un diffuseur, dans le capteur solaire de 29 m de long. Ce capteur comporte trois éléments: au-dessus, une couverture transparente; au milieu, une résille noire; au-dessous, une isolation en sandwich entre une feuille noire et une feuille d'aluminium. Ces trois épaisseurs, scellées dans le sens de la longueur, reposent sur des brides de fixation tous les mètres. La résille centrale est soutenue par un grillage rigide tendu entre des poteaux sur le terrain. L'air insufflé longitudinalement dans ce capteur est chauffé directement par l'énergie solaire. Une extrémité du capteur est reliée au chariot mobile de séchage. Ce dernier est calorifugé pour réduire les pertes de chaleur et équipé de diffuseurs au-dessous de la plate-forme perforée de séchage. Le chariot a un toit en pente constitué par une double épaisseur de polymère synthétique.

Lorsque l'humidité a été ramenée au pourcentage voulu, le maïs est transféré par une soufflante dans le séchoir-silo, où l'humidité est progressivement amenée à 13% . Ce séchoir fait partie d'un bâtiment de ferme, l'une des pièces ayant été convertie en chambre de séchage, avec une soufflante et un plancher perforé. Le toit sert de capteur solaire pour le chauffage de l'air.

Four solaire pour le séchage du bois (Inde)¹⁰

On a conçu un séchoir solaire du bois afin d'accélérer la vitesse de séchage par comparaison à la

⁹ Chercheur principal: T. A. Lawand, Institut de recherche Brace, Collège Macdonald de l'Université McGill, Ste Anne de Bellevue, Québec (Canada).

¹⁰ Chercheurs principaux: S. N. Sharma et Prem Nath, Service du conditionnement du bois, Institut de la recherche forestière, Dehra Dun, U. P. (Inde).

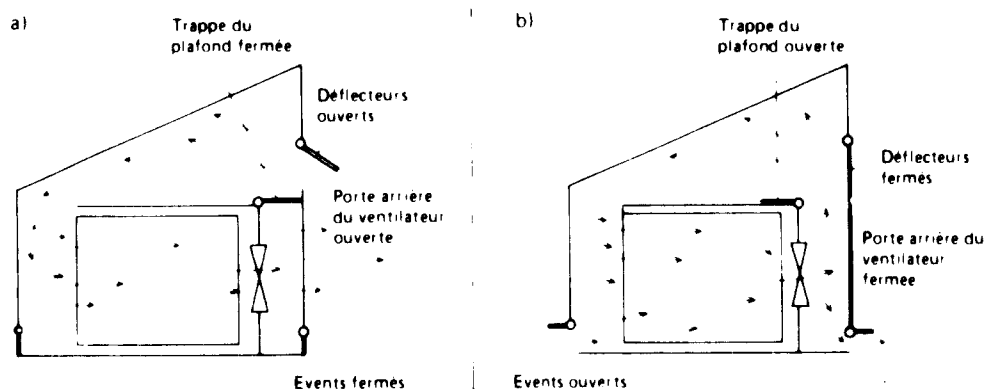


Figure 4. Four solaire pour le séchage du bois : a) avec un seul passage de l'air ; b) avec circulation continue et ventilation partielle

méthode classique de séchage à l'air. Ce séchoir utilise de grandes quantités d'air chaud (jusqu'à 60 °C) et permet un séchage rapide sans dégradation exagérée (fissures, gauchissement).

Le four est orienté est-ouest, la paroi nord étant plus haute que l'autre. A l'exception de la paroi nord, qui est en contreplaqué, les autres côtés et le toit sont constitués de deux épaisseurs de polyéthylène transparent, séparées par un espace d'air. Le toit fait face au sud et est incliné de 0,9 fois la latitude sur l'horizontale (27°). Le four peut contenir environ 3,5 m³ de planches de 25 mm. A l'intérieur du four, un plafond est aménagé au-dessus des piles de bois. Du côté nord, une cloison s'étend sur toute la longueur du four, du plancher au plafond; dans sa partie centrale, une ouverture a été aménagée pour recevoir le ventilateur. Toutes les surfaces intérieures (piliers, plafond, cloisons, paroi nord, sol en béton) sont peintes en noir pour une absorption maximale de chaleur. Le ventilateur est actionné par un moteur électrique réversible de 0,75 kW; des déflecteurs et des chicanes en contreplaqué permettent d'utiliser le séchoir avec un seul passage de l'air ou en circulation continue (voir figure 4).

BIBLIOGRAPHIE

- Akyurt, M. et M. K. Selcuk. A solar dryer supplemented with auxiliary heating systems for continuous operation. *Solar energy* (Elmsford, N.Y.) 6:4, 1962.
- Akyurt, M., M. K. Selcuk et S. Akyurt. A continuous solar dryer. Communication présentée à la Conférence de la coopération méditerranéenne pour l'énergie solaire, Athènes, octobre 1971. 4 pages.
- A pass solar air heater. Par A. S. Satcunanathan et al. *Solar Energy* (Elmsford, N.Y.) 15:1, 1973.
- Bevill, V. D. et H. Brandt. A solar energy collector for heating air. *Solar energy* (Elmsford, N.Y.) 12:19-29, 1968.
- Buchberg, H., D. K. Edwards et O. Lalude. Performance characteristics of rectangular honeycomb solar-thermal converters. *Solar energy* (Elmsford, N.Y.) 13:95, 1971.
- Buelow, F. H. Drying crops with solar heated air. Communication présentée à la Conférence des Nations Unies sur les nouvelles sources d'énergie. Rome, 21-31 août 1961. *Energie solaire* : II, v.5, p. 267 (S/17).
Numéro de vente : 63.1.39.
- Close, D. J. Solar air heaters for low and moderate temperature applications. *Solar energy* (Elmsford, N.Y.) 7:3, 1963.
- Côte d'Ivoire. Ministère du plan. Institut des produits agricoles tropicaux. Séchoir inclinable perfectionné par l'ITIPAT. Abidjan, 1966. 20 pages.
- Davis C. et R. I. Lipper. Solar energy for crop drying. Communication présentée à la Conférence des Nations Unies sur les nouvelles sources d'énergie. Rome, 21-31 août 1961. *Energie solaire* : II, v.5, p. 273 (S/53).
Numéro de vente : 63.1.39.
- Dried Fruits Processing Committee. Grape drying in Australia. Melbourne, 1973 (CSIRO, ISBN-0-643-00054-4).
- Gosh, B. N. A new glass roof dryer for cocoa beans and other crops. Actes du Congrès international : Le soleil au service de l'Homme, Paris, 2-6 juillet 1973, p. 17.
- Green, L. Solar heat for drying shelled corn. *Electricity on the farm magazine* (New York) 47:4:14-15, avril 1974.
- Gueneau, P. Une expérience de séchage solaire du bois. *Bois et forêts des tropiques* (Nogent-sur-Marne, France) 131:69:78, 1970.
- Gupta, C. L. Draft for action plan for solar drying. Pondicherry, India, Auroville Centre for Environmental Studies, 1973. (Occasional Paper No. 5.)

- Gupta, C. L. et H. P. Garg. Performance studies of solar air heaters. *Solar energy* (Elmsford, N.Y.) 11:25, 1967.
- Jordon, R. C. Low temperature applications of solar energy. New York, American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, 1967.
- Khan, E. U. The utilization of solar energy. *Solar energy* (Elmsford, N.Y.) 8:1 17-22, 1964.
- Khanna, M. L. et N. M. Singh. Industrial solar drying. *Solar energy* (Elmsford, N.Y.) 11:2, 1967.
- Lalude, O. et H. Buchberg. Design and application of honeycomb porous-bed solar-air heaters. *Solar energy* (Elmsford, N.Y.) 13:2, 1971.
- Lawand, T. A. A description of two simple solar agricultural dryers. *Coopération méditerranéenne pour l'énergie solaire*, décembre 1965. (Bulletin No. 9.)
- . A solar-cabinet dryer. *Solar energy* (Elmsford, N.Y.) 10:4:158-164, octobre 1966.
- Löf, G. O. G. Solar energy for the drying of solids. *Solar energy* (Elmsford, N.Y.) 6:4, 1962.
- Lukes, T. Research on the application of solar energy to the food drying industry. San Luis Obispo, Calif., California Polytechnic State University, octobre 1974 (NSF/RANN/SE/GI 42944/PR/74/3).
- Maldonado, E. D. et E. C. Peck. Drying lumber by solar radiation in Puerto Rico. *Forest products journal* (Madison, Wisc.), octobre 1962, 487-488.
- McLean, K. Principles of sun drying with special references to a see-saw dryer. Rome, Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, 1972. 40 p. (Rapport AGS, SF/GHA7).
- Peterson, W. H. Harness the sun to dry grain. *World farming* (Kansas City, Mo.) 1968, 36-37.
- . Solar heat for drying shelled corn. *ASAE transactions* (St. Joseph, Mich.) 73:302, 1973.
- Phillips, A. L. A solar energy method for reducing coffee drying costs. *Journal of agriculture* (University of Puerto Rico) 17:4:226-235, octobre 1963.
- . Drying Coffee with solar heated air. *Solar energy* (Elmsford, N.Y.) 9:4:213-216, 1965.
- . Evaluation of a "mylar" plastic film as a surface for a solar heat collector. *Journal of agriculture* (University of Puerto Rico) 49:4:484-486, octobre 1965.
- . Further observations on the use of solar energy for reducing coffee drying costs. *Journal of agriculture* (University of Puerto Rico) 49:272, avril 1965.
- Read, W. R., A. Choda et P. I. Cooper. A solar timber kiln. *Solar energy* (Elmsford, N.Y.) 15:4, 1974.
- Roa, G. Natural drying of cassava. Ph. D. Thesis. East Lansing, Michigan State University, Agricultural Engineering Department.
- Roa, G. et H. J. Cock. Natural drying of cassava. *Proceedings of the Third Symposium of Tropical Root Crops*. Ibadan, Nigéria, décembre 1973.
- Santa Barbara, Calif. Community Environmental Council. How to build a solar herb dryer. Par I. F. Thomas et M. Zilles. 10 pages.
- Selcuk, M. K., O. Ersay et M. Akyurt. Development, theoretical analysis and performance evaluation of shelf type solar dryers. *Solar energy* (Elmsford, N.Y.) 2:81-88, 1974.
- Shove, G. Low temperature drying of shelled corn. *Electricity on the farm magazine* (New York) 47:4:16-17, avril 1974.
- Solar Energy Products Co. Soloron air heater. Avon Lake, Ohio, 1974. (Brochure distributed at the International Solar Energy Society Meeting, 1974.)
- Un nouveau type de séchoir expérimenté en Côte d'Ivoire. *Café, cacao, thé* (Paris) 13:1:57-64, 1969.
- Whillier, A. Black painted solar air heaters of conventional design. *Solar energy* (Elmsford, N.Y.) 8:1, 1963-64.
- Wilson, B. W. The role of solar energy in the drying of vine fruit. Communication présentée à la Conférence des Nations Unies sur les nouvelles sources d'énergie, Rome, 21-31 août 1961. *Energie solaire* : 11, v.5, p. 296 (S/4) Numéro de vente : 63.1.39.
- Publications de l'Institut de recherche Brace, Collège Macdonald de l'Université McGill, Ste Anne de Bellevue, Québec (Canada)*
- A survey of solar agricultural dryers. Décembre 1975. 151 pages.
- Goldstein, O. Production drawing for solar cabinet dryer. Juin 1973.
- Lawand, T. A. Description and construction cost analysis of a solar agricultural maize drying system in Barbados. Décembre 1966, 65 pages.
- . How to make a solar cabinet dryer for agricultural produce. Mars 1966. 9 pages.
- . Solar driers for farm produce. Progress report. Avril 1963. 59 pages.
- . The drying of maize in a solar cabinet dryer. Janvier 1966. 8 pages.
- . The evaluation of solar agricultural dryers for the processing of surplus crops. Proposal No. 3. Avril 1969. 3 pages.
- . The operations of a large-scale solar agricultural dryer. Février 1967. 11 pages.
- Nahlawi, N. The drying of yams with solar energy. Juillet 1966. 16 pages.
- Nevot, M. A. Proyecto de un colector solar para desecar cereales. Août 1966. 53 pages.
- Ward, G. T. Suggestions for corn harvesting, drying and storage trials in Barbados. Septembre 1965.

Perspectives de la cuisson solaire dans les régions en développement

T. A. Lawand

Institut de recherche Brace, Collège Macdonald de l'Université McGill, Québec (Canada)

Divers combustibles classiques ont été utilisés pour la cuisson dans les régions en développement. On peut citer les suivantes :

| | Valeur calorifique approchée | |
|---------------------------|------------------------------|-----------|
| | (MJ/kg) | (Mcal/kg) |
| Excréments animaux séchés | 9 | 22 |
| Bois de chauffage | 20 | 48 |
| Charbon de bois | 33 | 80 |
| Coke | 30 | 72 |
| Kérosène, fuel | 42 | 10 |

Chacun de ces combustibles est plus ou moins efficace pour la cuisson. En Inde, on a estimé que l'efficacité des excréments animaux séchés comme combustible de cuisson est très faible, environ 1,4 MJ/kg (0,34 Mcal/kg). Tous les combustibles ne sont pas aussi peu efficaces. Au Sénégal, par exemple, on a estimé que 1 kg de butane avait la même efficacité que 24 kg de charbon de bois.

Il faut également tenir compte d'un autre facteur. La méthode traditionnelle de cuisson des aliments qui consiste à les porter à ébullition dans une marmite sur un feu ouvert, un réchaud à gaz ou une plaque électrique est elle-même très peu efficace.

Du fait de leur forte teneur en eau, la plupart des denrées alimentaires ont une chaleur spécifique élevée, voisine de celle de l'eau [4 kJ/(kg K)]. La température de cuisson (ébullition) sera atteinte d'autant plus rapidement que l'apport de calories sera élevé. Ainsi, sauf lorsque la vaporisation de l'eau est nécessaire au processus de cuisson, par exemple dans la cuisson de pain, la vitesse de cuisson est pratiquement indépendante de l'intensité du chauffage, à condition que celle-ci soit suffisante pour compenser les pertes thermiques. En d'autres termes, si l'on fait cuire une même quantité d'aliment sur des appareils de puissances différentes, le temps de cuisson proprement dite sera pratiquement le même et seul le temps nécessaire pour atteindre la température voulue sera plus ou moins long. Ainsi, dans le cas d'aliments qui doivent être cuits pendant plusieurs heures, des appareils de forte puissance

peuvent demander à peu près le même temps que des appareils de faible puissance.

La plus importante des pertes de chaleur dans la cuisson est généralement la chaleur consommée pour vaporiser l'eau présente dans les aliments ou ajoutée pour les besoins de la cuisson, près de 2,5 MJ/kg. Viennent ensuite les pertes par convection des récipients et des parois des fours. Elles peuvent être réduites en couvrant les récipients et en calorifugeant les parois des fours. En supposant que la perte horaire par convection (à l'extérieur), à la température d'ébullition de l'eau, soit d'environ 6,8 MJ par mètre carré de récipient et qu'il faille 0,1 m² de récipient par kilogramme de contenu, l'apport d'énergie pour une heure de cuisson avec vaporisation d'un quart de l'eau présente dans les aliments serait distribué à peu près comme suit (en pourcentage) :

| | |
|---|----|
| Chauffage à la température d'ébullition | 20 |
| Pertes par convection du récipient | 45 |
| Vaporisation de l'eau | 35 |

Des conditions différentes de celles indiquées ci-dessus entraîneraient une modification de ces pourcentages, mais les chiffres montreraient toujours que la plus grande partie de la chaleur fournie pour une cuisson de longue durée est dissipée.

Il faut réexaminer toute la question du transfert d'énergie de la source de chaleur au récipient de cuisson, en vue d'améliorer l'efficacité de l'opération. Jusqu'à la température d'ébullition, le coefficient de transfert de chaleur dans le récipient est faible, parce que le liquide est relativement stagnant. Il arrive souvent que les aliments brûlent, d'où la nécessité de les remuer, non seulement pour augmenter le transfert de chaleur, mais aussi pour éviter une concentration localisée de la chaleur. Le mécanisme de transfert de chaleur dans le récipient et même la forme de ce dernier ont une grande influence sur la conception des appareils de cuisson solaire. Dans la mise au point des techniques de cuisson solaire, il ne faudrait pas maintenir les inefficacités classiques des systèmes actuels, notamment dans les pays en développement où la cuisson peut représenter jusqu'à 80 % de toute l'énergie consommée.

Du point de vue des dimensions et de la capacité, les appareils solaires doivent être semblables aux appareils classiques. Dans ces derniers, le taux d'apport d'énergie est élevé, en dépit de leur inefficacité. Les appareils au gaz ou à l'électricité ont des feux ou des plaques pouvant fournir environ 1 kW et porter 2 litres d'eau à ébullition en 10 minutes environ. Les fours automatiques ont une puissance à peu près double. Par conséquent, un appareil de cuisson solaire devrait pouvoir délivrer une puissance d'environ 1 kW pour être comparable aux appareils actuels. Sinon, il faudrait accepter des temps de cuisson plus longs ou faire cuire de plus petites quantités d'aliments. Pour obtenir des vitesses de cuisson comparables, il faut un capteur solaire d'environ 2 m² (avec un rendement de 50 %).

A ce jour, plusieurs modèles d'appareils solaires ont été mis au point. Un examen rapide de la bibliographie montrera à quel point les chercheurs se sont attachés à cette question dans les régions en développement. Dans les pays développés, à l'exception de chercheurs qui s'occupent de la technologie appropriée, on s'est surtout intéressé à des petits réchauds de camping ou de pique-nique. Quel que soit leur type (réflecteur parabolique repliable ou coffre chauffant), ces appareils sont portatifs et compacts.

Il existe trois modèles d'appareils solaires :

a) Le four solaire, généralement un petit coffre calorifugé avec porte à double vitrage, que l'on oriente manuellement vers le soleil (figure 1). Pour augmenter le rendement, on ajoute souvent des réflecteurs qui permettent d'obtenir des températures plus élevées à l'intérieur du four. L'un des inconvénients inhérents à ce modèle d'appareil est que la cuisson doit être faite en plein air, ce qui est souvent socialement inacceptable, notamment pendant les périodes de grandes chaleurs.

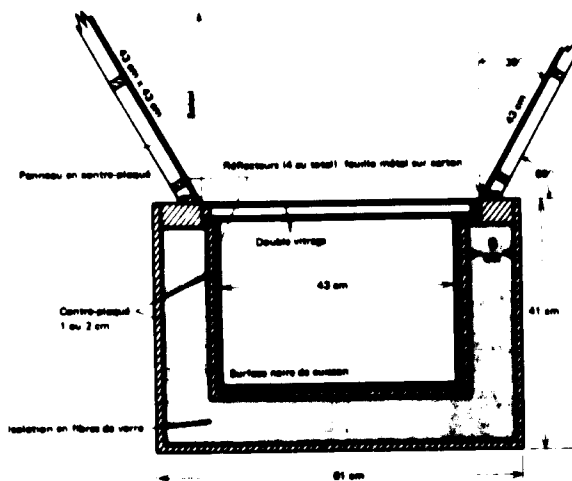


Figure 1. Coffre solaire : un four à bas prix

b) Le réflecteur parabolique, qui concentre le rayonnement solaire au foyer ou près de ce point, où l'on place le récipient de cuisson (figure 2). Ici encore, la cuisson doit être faite à l'extérieur. Les déperditions de chaleur sont plus élevées qu'avec l'appareil précédent, du fait de la convection par le vent. Les réflecteurs ne peuvent concentrer que le rayonnement direct, ce qui signifie que ces appareils ont un moins bon rendement dans les régions où le rayonnement diffus est important.

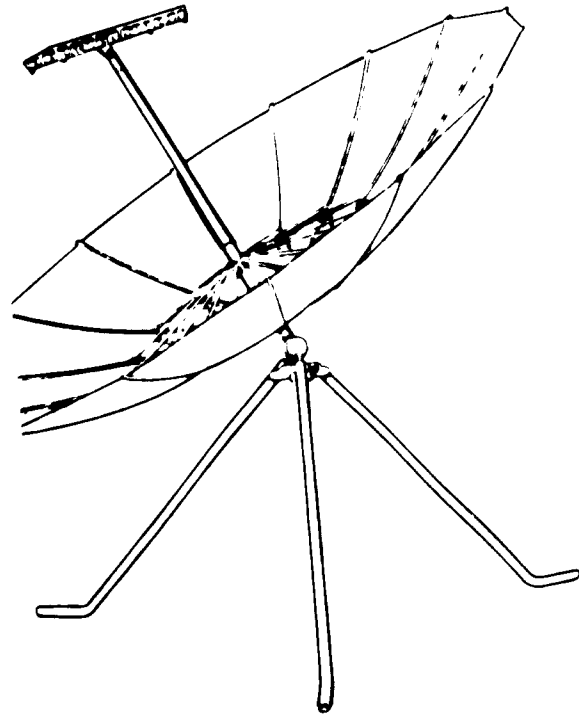


Figure 2. Appareil de cuisson à réflecteur parabolique du type parasol ajustable

c) Le capteur solaire séparé de l'appareil de cuisson proprement dit; le fluide caloporteur (eau ou huile) est chauffé dans un capteur plan ou un capteur avec effet de concentration. La chaleur du fluide caloporteur est utilisée dans l'appareil de cuisson proprement dit, qui est calorifugé et peut être installé à l'intérieur de la maison (voir figure 3).

Ces appareils n'ont pas encore fait l'objet d'essais très poussés. Souvent, le facteur technique limitatif est le transfert de chaleur dans le récipient de cuisson, mais ce facteur est moins important dans les appareils à réflecteur, du fait des températures plus élevées obtenues.

On n'a pas encore fait d'analyse globale des techniques de cuisson solaire. Il serait utile de collationner toutes les données existantes sur les besoins, les sources d'énergie disponibles et autres problèmes connexes afin de pouvoir déterminer le rôle que la cuisson solaire peut jouer pour satisfaire

COÛTS COMPARÉS DE LA CUISSON AVEC DIVERSES SOURCES D'ÉNERGIE AU SÉNÉGAL

| | Butane (réservoirs rechargeables (zones et réchaud) | Electricité (zones urbaines) | Charbon de bois (zones urbaines) | Charbon de bois (zones rurales) | Energie solaire (avec l'appoint d'un réchaud au butane) | |
|---|--|------------------------------------|---|--|---|----------|
| | | | | | Modèle 1 | Modèle 2 |
| Investissement initial (dollars) | 19 | 15 | 10 | 10 | 150 | 200 |
| Durée de vie estimée (ans) | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| Coût annuel de l'investissement ^a (dollars) | 2,64 | 2,09 | 1,39 | 1,39 | 20,86 | 27,81 |
| Coût du combustible (dollar/kg) | 0,44 | 0,32 ^b | 0,10 | 0,06 | 0,44 | 0,44 |
| Consommation annuelle estimée de combustible (kg) | 220 | 2 700 ^c | 1 750 | 1 750 | 44 | 44 |
| Coût annuel du combustible (dollars) | 97,80 | 865 | 175 | 105 | 19,40 | 19,40 |
| Coût annuel de l'entretien | 1,90 | | | | 22,88 | 30,38 |
| Coût annuel total (dollars) | 101 | 867 | 176 | 106 | 66 | 81 |
| Coût annuel total si le prix du combustible double (dollars) | 198 | 1 732 | 351 | 211 | 85 | 100 |
| Coût annuel total si le prix du combustible triple (dollars) | 295 | 2 597 | 526 | 316 | 105 | 119 |

Note: Tous les coûts sont calculés sur la base d'un coût annuel équivalent.

^a En supposant un intérêt de 11 %.

^b En dollar/kWh.

^c En kWh.

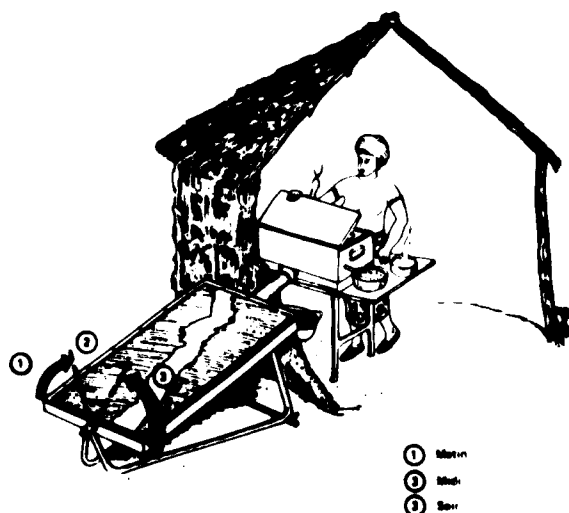


Figure 3. Appareil de cuisson à vapeur

les besoins énergétiques des collectivités qui manquent de combustibles classiques. Il existe un si grand nombre de techniques qu'il faut en faire un recueil qui permettra aux collectivités dans les régions en développement d'en faire usage ou de les adapter à des situations particulières.

Des programmes tels que la conversion de déchets en biogaz, dont on s'occupe activement dans des pays comme l'Inde, devraient être associés à un investissement en technologie de la cuisson solaire, car l'utilisation du biogaz pour la cuisson serait sans doute du gaspillage. Les biogaz seraient mieux employés dans la production d'énergie mécanique ou électrique, ainsi qu'on l'a démontré en Inde. S'ils servent à la cuisson, c'est parce qu'il y a peu d'autres solutions.

Pour terminer, quelques mots sur les aspects économiques : on a montré au Sénégal que la cuisson solaire, avec l'appoint d'un réchaud à bois sans fumée (pour les 10-15 % du temps où les conditions météorologiques ne permettent pas l'utilisation de l'énergie solaire), était beaucoup moins onéreuse que la cuisson au butane ou au charbon de bois. On a établi un tableau comparatif pour le Sénégal, avec deux modèles d'appareil solaire complété par un réchaud au butane. Ce tableau montre qu'un investissement dans des appareils solaires deviendrait payant après quelques années.

BIBLIOGRAPHIE

Abou-Hussein, M. Temperature-decay curves in the box-type solar cooker. Communication présentée à la Conférence des Nations Unies sur les nouvelles sources d'énergie, Rome, 21-31 août 1961. *Energie solaire* : II, v.5, p. 335 (S/75).
Numéro de vente : 63.1.39.

Alward, R., T. A. Lawand et P. Hopley. Description of a large scale solar steam cooker in Haiti. Actes du Congrès international : Le soleil au service de l'Homme, Paris, 2-6 juillet 1973. P. 10.

— Une cuisinière solaire en Haïti. *Architecture concept* (Montréal) 28:312:2, mars 1973.

Aprochamiento de la energía solar en el altiplano Peruano. *Agronomía* (Monterrey, N.L., Mexico) 30:4, 1963.

Beason, R. G. Solar cooking turns practical. *Mechanix illustrated* (New York), juillet 1976.

Duffie, J. A. Reflective solar cooker designs. University of Wisconsin, Engineering Experiment Station. P. 9.

- Duffie, J. A., G. O. G. Löf et B. Beck. Laboratory and field studies of plastic reflector solar cookers. *Solar energy* (Elmsford, N.Y.) 6:94-98, juillet 1962.
- Duffie, J. A., R. P. Lappala et G. O. G. Löf. Plastics for focusing collectors. University of Wisconsin, Engineering Experiment Station. P. 9-31 (Reprint 327).
- . Plastics in solar stoves. *Modern plastics* (New York), novembre 1957.
- Ghai, M. L. Design of reflector-type direct solar cookers. *Journal of scientific and industrial research* (New Delhi) 12A, 4:165-175, 1953.
- . Solar heat for cooking. *Journal of scientific and industrial research* (New Delhi) 12A, 3:117-124, 1953.
- Ghai, M. L. et B. S. Phandher. Manufacture of reflector-type direct solar cooker. *Journal of scientific and industrial research* (New Delhi) 13A, 5:212-216, 1954.
- Ghosh, M. K. Sun cookers for villages. Paper presented for the All India Solar Energy Working Group and Conference, Indian Institute of Technology, Madras, novembre 1973.
- Gupta, J. P. Studies on solar hot box. Paper prepared for the All India Solar Energy Working Group and Conference, Indian Institute of Technology, Madras, novembre 1973.
- Jenness, J. R. Recommendations and suggested techniques for the manufacture of inexpensive solar cookers. *Solar energy* (Elmsford, N.Y.) 4:3, juillet 1960.
- Khan, E. U. The utilization of solar energy. *Solar energy* (Elmsford, N.Y.) 8:1, 1964.
- Khanna, M. L. Solar heating of vegetable oil. *Solar energy* (Elmsford, N.Y.) 6:2, 1962.
- Löf, G. O. G. Recent investigations in the use of solar energy for cooking. *Solar energy* (Elmsford, N.Y.) 7:3, 1963.
- . Use of solar energy for heating purposes: solar cooking. Communication présentée à la Conférence des Nations Unies sur les nouvelles sources d'énergie, Rome, 21-31 août 1961. *Energie solaire*: II, v.5, p. 304 [GR/16(S)]. Numéro de vente: 63.1.39.
- Löf, G. O. G. et D. A. Fester. Design and performance of folding umbrella-type solar cooker. Communication présentée à la Conférence des Nations Unies sur les nouvelles sources d'énergie, Rome, 21-31 août 1961. *Energie solaire*: II, v.5, p. 347(S/100). Numéro de vente: 63.1.39.
- Neubauer, L. et G. Williams. Solar oven economy for farm homes. Paper presented to the annual meeting of the American Society of Agricultural Engineers, University of Nebraska, Lincoln, 1976. 12 p. (76-4021).
- Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, Division de la nutrition. Rapport sur des tests avec le four solaire de Telkes et le réchaud solaire du Wisconsin, pendant la période de juillet à septembre 1959. Communication présentée à la Conférence des Nations Unies sur les nouvelles sources d'énergie, Rome, 21-31 août 1961. *Energie solaire*: II, v.5, p. 353 (S/116). Numéro de vente: 63.1.39.
- Performance of reflector-type direct solar cookers. Par M. L. Ghai et al. *Journal of scientific and industrial research* (New Delhi) 12A, 12:540-551, 1953.
- Prata, Salgado. A cylindro-parabolic solar cooker. Communication présentée à la Conférence des Nations Unies sur les nouvelles sources d'énergie, Rome, 21-31 août 1961. *Energie solaire*: II, v.5, p. 370 (S/110). Numéro de vente: 63.1.39.
- Sakr, I. A. Elliptical paraboloid solar cooker. Communication présentée au Congrès international: Le soleil au service de l'Homme, Paris, 2-6 juillet 1973.
- Stam, H. Cheap but practical solar kitchens. Communication présentée à la Conférence des Nations Unies sur les nouvelles sources d'énergie, Rome, 21-31 août 1961. *Energie solaire*: II, v.5, p. 38 (S/24). Numéro de vente: 63.1.39.
- Swet, C. J. A universal solar kitchen. Baltimore, Johns Hopkins University, Applied Physics Laboratory, juillet 1972, p. 23.
- Tabor, H. Solar cooker for developing countries. Paper prepared at the annual meeting of the Solar Energy Society, Boston, Mass., mars 1966.
- Telkes, M. The solar cooking oven. New York University, College of Engineering, Research Division, janvier 1958.
- Telkes, Maria et S. Andrassy. Practical solar cooking ovens. Communications présentée à la Conférence des Nations Unies sur les nouvelles sources d'énergie, Rome, 21-31 août 1961. *Energie solaire*: II, v.5, p. 394 (S/101). Numéro de vente: 63.1.39.
- University of Florida. Solar cooking turns practical. *Mechanix illustrated* (New York), juillet 1976.
- Vita Union College Campus. Solar cooker construction manual. Schenectady, N.Y., juin 1967.
- Whillier, A. A stove for boiling foods using solar energy. *Sun at Work*, 10:1:9-12, janvier 1965.
- Publications de l'Institut de recherche Brace, Collège Macdonald de l'Université McGill, Ste Anne de Bellevue, Québec (Canada)*
- Alward, R. et O. Goldstein. Assembly drawings for the construction of solar steam cookers: 3 drawings. Février 1972.
- A study of the feasibility of establishing a rural energy centre for demonstration purposes in Senegal. Août 1976. 380 p.

- Cheng, K., H Wong *et* O. Tanaka. Experimental study of a solar steam cooker. Project for the Department of Mechanical Engineering, Course No. 305-463A-464B, mai 1973, 47 p.
- Greenwood, C. Effect of heat input from solar cookers on the ascorbic acid content of peas. Final year project for the Department of Food Science, Course No. 344-490D, Mars 1974, 56 p.
- Pons, M. F. *et* G. T. Ward. La cocina solar construida en Chucuito, Puno (Pérou). Décembre 1963, 22 p.
- Sinson, D. A. Design and performance evaluation of a 6 ft x 4 ft parabolic solar steam generator and its application to pressure cooking. Avril 1964, 67 p.
- Vickery, S. The effect of the sunhroiler on the ascorbic acid content of sweet peas. Final year project for the Department of Food Science, Course No. 377-490D, Mars 1974, 57 p.
- Whillier, A. A stove for boiling of foods using solar energy. Avril 1964, 13 p.
- _____ How to make a solar steam cooker. Rev. Février 1973, 2 p.
- _____ Preliminary report on solar stove for cooking by boiling. Septemhre 1963, 10 p.

Evaluation des applications solaires en vue du transfert de techniques

Jyoti K. Parikh

Institut international d'analyse appliquée des systèmes, Laxenbourg (Autriche)

Introduction

L'intensité du rayonnement solaire étant faible, son utilisation exige de vastes surfaces de terre. Les applications solaires conviennent donc mieux aux zones rurales, qui disposent de plus de terrain que les zones urbaines. Les systèmes centralisés d'énergie classique n'ont pas encore atteint l'importante population rurale de maints pays en développement. Des applications solaires qui contribueraient au développement d'un système énergétique décentralisé pourraient conduire à une amélioration sensible de la productivité économique des zones rurales.

Selon des estimations de l'Organisation des Nations Unies¹, la population rurale du monde s'élevait en 1970 à 2,26 milliards, dont 1,89 milliard

¹ Organisation des Nations Unies, Département des questions économiques et sociales, "Indicateurs démographiques mondiaux", 1975 (S.A.P.W.P. 55)

dans les pays en développement. Le pourcentage de la population des pays en développement vivant dans les zones rurales devrait tomber de 75% en 1970 à 59,2% en 2000. Cependant, le nombre des ruraux sera alors de 2,92 milliards, c'est-à-dire en augmentation sensible sur le nombre actuel. La figure 1 montre les tendances de la croissance démographique dans les régions rurales, selon une projection de l'Organisation des Nations Unies².

Les besoins énergétiques des populations rurales sont extrêmement faibles et largement satisfaits, pour le moment, par des ressources non commerciales disponibles localement telles que le bois de chauffage, les déchets agricoles et les excréments animaux. Néanmoins, les planificateurs de l'énergie dans la plupart des pays en développement s'intéressent essentiellement au développement de vastes systèmes énergétiques répondant aux besoins des zones

Ibid

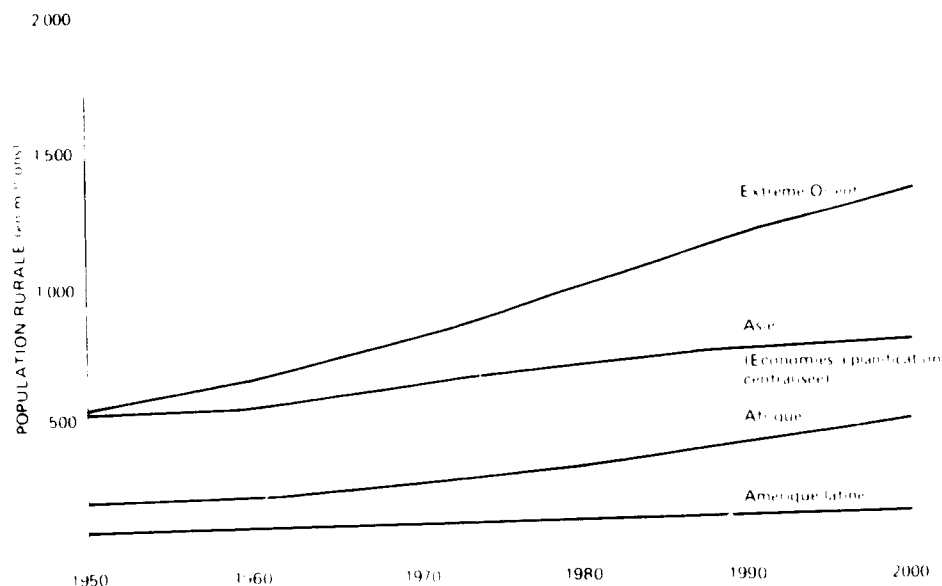


Figure 1. Population rurale (réelle et projetée) des régions en développement

urbaines et de l'industrie. La plupart des pays en développement déploient des efforts pour développer l'électrification des zones rurales, mais les progrès sont lents parce que cela demande d'importants capitaux, notamment quand il s'agit de rattacher au réseau des villages écartés. Le besoin de systèmes énergétiques décentralisés pour les zones rurales est donc évident.

Les chercheurs et les techniciens proposent de temps à autre des solutions pour la décentralisation de l'énergie. Si elles ne sont pas adoptées, ils blâment généralement les difficultés du transfert de techniques, la résistance des intérêts acquis, etc. Certes, ces obstacles ne doivent pas être sous-estimés, mais si l'on considère tous les facteurs en jeu, on constate souvent que les résultats des travaux de R-A de ces techniciens ne peuvent pas être adaptés aux conditions locales. Il est donc essentiel d'évaluer avec le plus grand soin les difficultés du transfert de techniques.

Dans cet article, nous étudierons tout d'abord les questions importantes dans l'évaluation des techniques. Ensuite, nous évaluerons quelques techniques solaires en gardant ces questions présentes à l'esprit. Étant donné que les photopiles sont très coûteuses à l'heure actuelle, nous n'avons envisagé pour cette analyse que des appareils thermiques de faible puissance. En particulier, le pompage solaire est étudié de manière détaillée comme un cas d'espèce.

Les expressions algébriques figurant dans cet article sont applicables dans tout pays; les résultats numériques s'appliquent à l'Inde.

Problèmes du transfert de techniques

Par "transfert de technique", on entend le processus par lequel une invention sort du laboratoire et devient applicable sur le terrain. Il faut bien admettre que les usagers ne peuvent pas exploiter un appareil expérimental. On doit accorder l'importance voulue au perfectionnement d'une invention et au développement des institutions requises, par exemple des établissements s'occupant des problèmes des usagers. Ces problèmes peuvent être classés en deux catégories: les uns sont d'ordre techno-économique, les autres d'ordre social, ces derniers ayant trait à l'environnement dans lequel la technique doit être appliquée. En général, il faut tenir compte des questions ci-après.

Avantages individuels et sociaux

Les avantages, économies, etc., sont souvent calculés au plan national, régional ou local, mais non du point de vue de l'utilisateur individuel. Certes, les avantages nationaux, tels que les économies de devises, la préservation de l'environnement, la santé publique etc., sont importants, mais ils n'ont de sens

que si la nouvelle technique est acceptable pour les usagers. Si ceux-ci ne retirent aucun bénéfice d'une invention que l'on veut promouvoir à des fins nationales ou sociales, il faut leur offrir une compensation pour les inciter à l'utiliser. Cela signifie qu'il faut adopter une politique nationale de subventions, d'exemptions fiscales, de déduction d'impôts, etc., en vue de promouvoir une meilleure technologie.

Ainsi, l'analyse coûts-bénéfices doit être faite en même temps du point de vue des usagers et du point de vue social. On identifie les pertes éventuelles des usagers et on détermine dans quelle mesure la collectivité pourrait subventionner les coûts indirects qu'ils devront supporter si la nouvelle technique est adoptée.

Comparaison des solutions possibles

Les avantages économiques pour l'utilisateur doivent être calculés en tenant compte des meilleures solutions qui lui sont offertes. Par exemple, si on calcule les avantages des biogaz par rapport au pétrole ou même au charbon, ils paraîtront importants; mais il faut les comparer, en fait, à la solution la moins coûteuse possible, c'est-à-dire brûler les excréments animaux et acheter des engrais le cas échéant. Il va de soi qu'il faut peser avec soin les aspects positifs et les aspects négatifs des solutions comparées. Ceci est nécessaire si l'on veut comprendre pourquoi certaines innovations ne sont pas adoptées. Enfin, il faut également tenir compte des améliorations possibles dans chacun des domaines comparés.

Echelle d'application

Certaines techniques peuvent se révéler inappropriées des points de vue de l'économie et de la gestion si l'on ne choisit pas l'échelle convenable. Par exemple, dans certaines situations, un grand nombre de petites pompes solaires peuvent être plus coûteuses qu'une grande station de pompage; mais les petites pompes peuvent être préférables si l'on tient compte des problèmes de gestion associés aux différentes échelles. Si l'on se réfère à la technologie des biogaz, une analyse récente¹ montre qu'une installation communale peut être plus économique et plus socialement acceptable que des installations familiales.

Introduction d'une technique

La manière dont une technique est introduite détermine son succès. Par exemple, elle peut se heurter à la résistance de groupes qui en tirent moins d'avantages ou auxquels elle est préjudiciable. De

¹ J. K. Parikh et K. S. Parikh, "The potential of bio-gas plants and how to realize it", Proceedings of UNTAR Symposium on Microbiol. Energy Conversion, Göttingen (République fédérale d'Allemagne), 1976.

plus, au stade même de la planification, il faudra tenir compte des problèmes de coopération, d'entretien et de réparation.

Compatibilité avec l'environnement

Si une invention exige un changement du mode de vie ou est en conflit avec l'environnement, son adoption posera des difficultés. En pareil cas, il faudra étudier avec soin l'assise d'une technique plus ancienne, ainsi que la question de savoir si la communauté est prête pour le changement.

Acceptation d'une technique

Une invention doit être appropriée à l'utilisation envisagée. Par exemple, comme on le verra plus loin dans cet article, il faut tenir compte de la manière dont les pompes sont actuellement utilisées lorsqu'on met au point une pompe solaire à des fins agricoles. Il est donc nécessaire qu'un gouvernement ayant des ressources limitées évalue avec soin les techniques nouvelles afin de n'encourager que les idées appropriées. Le perfectionnement d'inventions inappropriées peut être un gaspillage de main-d'œuvre scientifique précieuse et de ressources financières limitées, et peut même entraîner une perte de confiance envers les nouvelles techniques en général. Bien que valables, de nombreuses techniques nouvelles ont échoué parce qu'on avait négligé ces simples considérations pratiques.

Dans le contexte des critères susmentionnés, on essaiera donc de faire une analyse des difficultés

du transfert de techniques pour l'une des applications de l'énergie solaire. Cette analyse concerne l'Inde, mais elle est applicable à n'importe quel pays.

Pompes solaires

Le pompage solaire pour l'irrigation serait une application intéressante de l'énergie solaire dans les pays en développement, où 40-50 % du produit national brut sont d'origine agricole, secteur dans lequel l'eau est un apport essentiel. Le tableau 1 contient des données sur les pompes motorisées et leur consommation d'électricité en Inde. Ces pompes représentent environ 9 % de la consommation totale d'électricité en Inde, en dépit du fait qu'à peine 20 % des villages étaient électrifiés en 1967, comme le montre le tableau 2. Le nombre de pompes nécessaires dans 20 ou 30 ans pourrait être supérieur à 10 millions. Le tableau 2 montre également que l'électrification des petits villages d'environ 500 habitants progresse beaucoup plus lentement que celle des grandes villes. Du fait de la lenteur de l'électrification des zones rurales, de l'importance du secteur agricole et des grands besoins futurs de pompes, le pompage solaire pourrait jouer un rôle extrêmement important.

Considérations techno-économiques

Pour que les pompes solaires soient acceptables, il faut qu'elles aient un débit approprié et qu'elles soient moins coûteuses que les solutions existantes ou suffisamment intéressantes pour que les fermiers soient prêts à payer un prix plus élevé.

TABLEAU 1. POMPES ET CONSOMMATION D'ÉLECTRICITÉ EN INDE

Statistiques et projections

| Année ou date | Nombre de pompes en service | Consommation | | | |
|--------------------------------|-----------------------------|-------------------------|---------------------|-----------------|---|
| | | Par pompe (10^4 kWh) | Total (10^9 kWh) | Par pompe (kWh) | Par unité de puissance installée (kWh par kW) |
| 1966/67 | 649 182 | 2 107 | 33,26 | 3 245 | 842 |
| 1967/68 | 847 357 | 2 585 | 36,76 | 3 050 | 814 |
| 1968/69 | 1 088 774 | 3 466 | 41,46 | 3 183 | 834 |
| 1969/70 | 1 342 006 | 3 770 | 45,02 | 2 809 | 738 |
| 1970/71 | 1 642 006 | 4 110 | 48,65 | 2 503 | 657 |
| 31 mars 1974 | 2 444 599 | | | | |
| 31 mars 1979 | 4 022 790 ^a | | | | |
| <i>Projections^b</i> | | | | | |
| 1983 | $6,5 \times 10^6$ | | | | |
| 1990 | $12,0 \times 10^6$ | | | | |
| 2000 | $20,0 \times 10^6$ | | | | |

Sources : Inde, Ministère de l'irrigation et de l'énergie, *Ninth Annual Power Committee Report*, New Delhi, 1972. K. S. Parikh, *Second India Studies - Energy* (New Delhi, McMillan Press, 1976), p. 55.

^a Objectif du plan.

^b Compte tenu de la croissance démographique et du besoin d'augmenter la production agricole dans la limite permise par les nappes d'eau souterraines.

TABLEAU 2 - ELECTRIFICATION DES VILLAGES EN INDE, 1961-1973

| Population (recensement de 1961) | Nombre de villages | Nombre de villages électrifiés au 31 mars | | | | |
|-------------------------------------|-----------------------|---|--------|---------|---------|---------|
| | | 1961 | 1966 | 1971 | 1972 | 1973 |
| < 499 | 351 653 | 3 986 | 10 265 | 31 518 | 39 730 | 46 665 |
| 500-999 | 119 086 | 4 306 | 9 787 | 26 436 | 32 602 | 37 880 |
| 1 000-1 999 | 65 377 | 5 918 | 11 567 | 25 715 | 27 971 | 31 586 |
| 2 000-4 999 | 26 545 | 5 458 | 9 441 | 17 036 | 18 326 | 19 922 |
| 5 000-9 999 | 3 421 | 1 319 | 1 963 | 2 674 | 2 753 | 2 913 |
| > 10 000 | 776 | 560 | 647 | 702 | 712 | 729 |
| Total | 566 878 | 21 547 | 43 670 | 104 081 | 122 094 | 139 695 |

Source : Central Electric Authority, New Delhi, 1974.

Le cadre général d'une telle comparaison techno-économique est donné ci-dessous. Voici les symboles utilisés dans les calculs :

| | |
|--|--------|
| Investissement | K |
| Taux d'intérêt | d |
| Coût actualisé | C |
| Durée de vie de la pompe | l |
| Nombre de pompes requises pendant la période T | n |
| Coût annuel de l'entretien | m |
| Prix du combustible | p |
| Distance | s |
| Temps | t |
| Consommation annuelle de combustible | q |
| Frais annuels d'exploitation ($m+pq$) | O |
| Rendement | η |
| Heures de fonctionnement quotidien | h |
| Puissance installée | c |
| Surface des capteurs solaires | A |
| Insolation quotidienne moyenne par mètre carré | S |
| Travail effectué | W |

Le cas échéant, on identifiera les pompes solaires, électriques et Diesel en ajoutant les indices s , e et d aux symboles pertinents.

Il existe de nombreuses manières de calculer les coûts. Certaines sont indiquées ci-après. Si l'on dispose de courant électrique, les pompes solaires doivent être comparées à des pompes électriques; sinon, elles sont comparées à des pompes Diesel.

Coût annuel moyen d'une installation

On admet que le coût annuel de l'emprunt fait pour financer une installation est égal au produit du montant de l'investissement par la moitié du taux d'intérêt et le taux d'amortissement (ce dernier étant numériquement égal à l'inverse de la durée de vie). Il faut ajouter à ce coût les frais d'exploitation. Si l'on ne tient pas compte de l'inflation, on obtient la relation suivante :

$$K_s \left(\frac{d}{2} + \frac{1}{l_s} \right) + m_s = K_d \left(\frac{d}{2} + \frac{1}{l_d} \right) + q_d p_d(s, t) + m_d \quad (1)$$

Une relation analogue a été établie par Takla⁴. Toutefois, une telle relation ne tient pas compte du

⁴ Voir l'article d'Assad Takla, page 7.

fait que l'une des solutions envisagées ne permet pas une exploitation pendant la nuit. Avant d'étudier cette question, il convient de donner une expression exacte du prix actualisé au lieu de la forme approchée (1).

Coût actualisé pour une période donnée d'utilisation

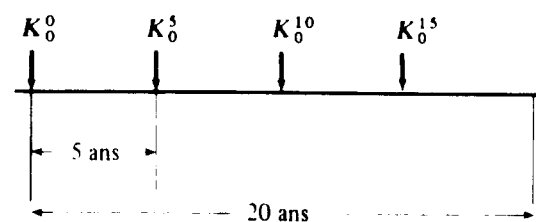
Le coût actualisé de la puissance installée pendant la période initiale, quelle que soit la solution choisie, est donné par la relation suivante :

$$C = K + \sum_{i=1}^l \frac{O_i}{(1+d)^i} \quad (2)$$

Pour comparer un moteur solaire et un moteur Diesel, il faut considérer une même période T , étant donné que leurs durées de vie peuvent être différentes. La période T est choisie de sorte que

$$n_s l_s = n_d l_d = T \quad (3)$$

Par conséquent, si les durées de vie du moteur solaire et du moteur Diesel sont respectivement de 20 ans et 5 ans, il faudra quatre moteurs Diesel pour rendre le même service qu'un moteur solaire, avec un nouvel investissement tous les cinq ans dont le coût devra être actualisé sur la période initiale :



Une formule générale pour calculer le coût actualisé de l'investissement tous les l ans pendant la période $T = nl$ est donnée par la relation suivante :

$$C = \sum_{j=1}^{T/l} \left(K + \sum_{i=1}^l \frac{O_i}{(1+d)^i} \right) \frac{1}{(1+d)^{(j-1)l}} \quad (4)$$

D'un autre côté, sans possibilité de stockage de l'énergie, la pompe solaire ne peut pas fonctionner

pendant le même nombre d'heures chaque jour que la pompe à moteur Diesel. Pour appliquer la relation ci-dessus, il faut donc tenir compte du travail qui peut être accompli chaque jour par chacune des deux pompes. Il faut étudier notamment les deux cas ci-après.

Debit de pompage Dans certaines régions, la vitesse de recharge des puits peut être lente, ce qui signifie que le débit de pompage peut être limité. Nous devons comparer ici deux pompes de même puissance. Comme une pompe solaire ne peut fonctionner qu'environ 6 h/j et qu'une pompe à moteur Diesel peut fonctionner 18-20 h/j, les deux pompes ne peuvent pas être comparées. En fait, une pompe solaire sans stockage approprié de l'énergie ne peut pas être envisagée comme une solution réaliste en pareil cas.

Comparaison à travail égal Une pompe solaire fonctionne avec un rendement moyen η_s pendant l'équivalent de h_s heures à pleine puissance (voir figure 2) avec une insolation quotidienne moyenne S par mètre carré de capteur. La surface de capteur requise pour une puissance installée c_s est A . Le travail effectué chaque jour est donné par la relation :

$$W_s = \eta_s S A \quad (5)$$

De son côté, la pompe à moteur Diesel peut fonctionner pendant beaucoup plus longtemps chaque jour, soit h_d heures. Ceci signifie une consommation plus élevée de combustible, mais une meilleure utilisation de la puissance installée, c_d . Le travail effectué chaque jour est donné par :

$$W_d = h_d c_d \quad (6)$$

Si l'on pose

$$W_s = W_d \quad (7)$$

on peut écrire :

$$\eta_s S A = h_s c_s = h_d c_d \quad (8)$$

Dans la relation précédente, $\eta_s = \eta_c \eta_p$, η_c et η_p étant respectivement les rendements du capteur et de la pompe. La relation 8 permet de déterminer à la fois la valeur de c_s pour un travail équivalent et la surface de capteur nécessaire.

Comparaison numérique de diverses solutions

Après avoir établi un cadre général pour une comparaison techno-économique, on comparera les solutions offertes à un utilisateur. Ce faisant, on tiendra compte de divers éléments d'incertitude, tels que les améliorations possibles du rendement, le coût des pompes solaires, l'escalade des prix des combustibles fossiles, etc.

Modèle actuel et améliorations techniques possibles

Les pompes à basse température fonctionnant uniquement sur les différences de température ne seront pas prises en considération, car la technologie n'est pas encore suffisamment au point pour assurer la production voulue et aussi parce qu'on s'intéresse essentiellement aux pompes à des fins agricoles. On considérera plutôt une pompe à moteur comme celle qui est schématisée à la figure 3.

Si l'on met au point un système d'orientation manuelle de capteurs solaires à miroirs de Fresnel objectif réalisable et si l'on apporte d'autres améliorations aux moteurs et capteurs solaires, on peut espérer obtenir dans un proche avenir un rendement de l'ordre de 10 %.

Valeurs numériques

Dans l'intérêt de la pompe solaire, on supposera que la région n'est pas électrifiée et que la seule autre solution est donc une pompe à moteur Diesel. D'après les données du tableau 1, il semble que les fermiers aient besoin en général d'une pompe de $c_d = 4$ kW fonctionnant 1 000 h/an. On comparera un moteur solaire et un moteur Diesel capables d'actionner une telle pompe. Les durées de vie, t_s et t_d , sont de 20 ans et 5 ans respectivement. L'investissement K_d est d'environ 6 000 roupies (600 dollars) pour un moteur Diesel de 4 kW ($K_d \cdot c_d = 150$ dollars kW). Les autres hypothèses sont les suivantes : $O_s = m_s = 50$ dollars, $m_d = 50$ dollars plus le coût du lubrifiant (20 dollars) =

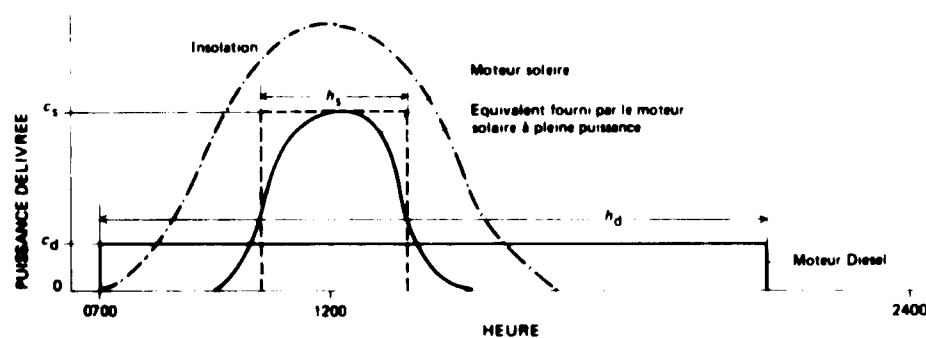


Figure 2. Variations diurnes de l'insolation et de la puissance délivrée par un moteur solaire et un moteur Diesel

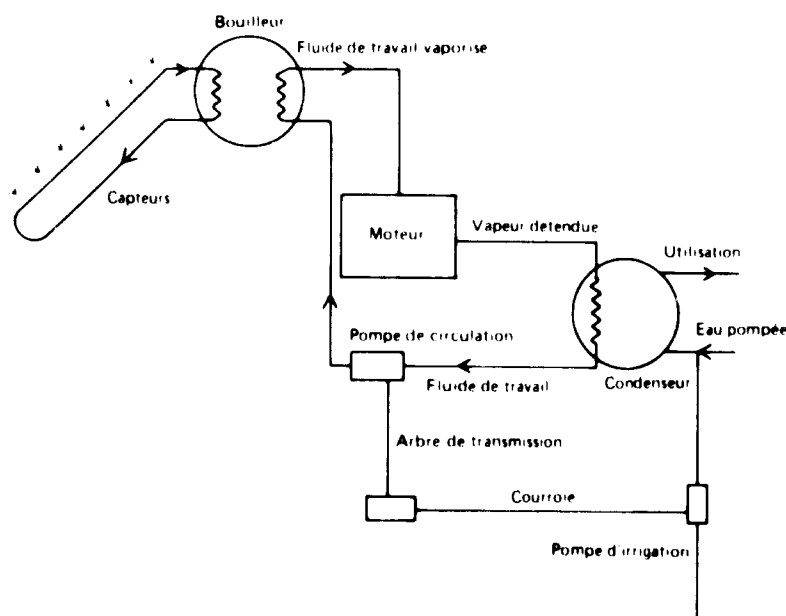


Figure 3. Schéma d'une pompe solaire

70 dollars; $p_d q_d = 150$ dollars, d'où $O_d = 220$ dollars.

Les conditions d'exploitation sont telles que les pompes doivent fonctionner 18-20 h/j ou même 24 h/j. Un moteur Diesel peut fonctionner toute la journée, alors qu'un moteur solaire sans stockage d'énergie ne peut fonctionner que 6-9 h/j. La relation (7) montre que la puissance du moteur solaire doit donc être deux à trois fois supérieure à celle du moteur Diesel. On a étudié ces deux possibilités, en

même temps que trois possibilités d'augmentation du prix du pétrole (augmentations annuelles de 0 %, 5 % et 10 %).

On a utilisé la relation (4), avec $d = 10\%$, pour calculer les prix actualisés en dollars constants (actuels); on n'a pas tenu compte de l'inflation. Les résultats de l'analyse sont résumés dans le tableau 3.

Le prix de vente d'une pompe solaire est actuellement de 15 000-20 000 dollars/kW. Le tableau 3 montre qu'une réduction de ce prix par un

TABLEAU 3. COMPARAISON DES COUTS DE MOTEURS SOLAIRE ET DIESEL POUR LE POMPAGE

| Rubrique | Augmentation annuelle du prix du fuel | | |
|---|---------------------------------------|-------|-------|
| | 0 % | 5 % | 10 % |
| Coût actualisé du moteur Diesel, $T = 20$ ans | | | |
| Investissement | 1 348 | 1 348 | 1 348 |
| Frais d'exploitation | 1 872 | 2 543 | 3 825 |
| Total C_d | 3 220 | 3 891 | 5 173 |
| Déduction - frais d'exploitation actualisés du moteur solaire | (425) | (425) | (425) |
| Prix d'équilibre actualisé du moteur solaire | 2 795 | 3 466 | 4 748 |
| Prix d'équilibre par unité de puissance | | | |
| Pour l'irrigation (dollars/kW) | | | |
| $C_s = 2C_d = 8$ kW | 349 | 433 | 593 |
| $C_s = 3C_d = 12$ kW | 233 | 289 | 395 |
| Pour l'eau potable uniquement | | | |
| $C_s = C_d = 4$ kW | 698 | 866 | 1 186 |

facteur de 25 à 70 est nécessaire avant que les moteurs solaires puissent être économiquement acceptables pour actionner des pompes d'irrigation. Si la pompe n'est utilisée que pour obtenir de l'eau potable, elle peut avoir la même puissance que la pompe à moteur Diesel et ne fonctionner que 4-6 h/j. Dans ce cas, le prix ne doit plus être réduit que par un facteur de 10-20.

Validité des hypothèses

La plupart des hypothèses faites pour l'analyse ci-dessus sont très favorables aux moteurs solaires, comme le montrent les considérations ci-après.

Hypothèses techniques. Il n'y a pas encore sur le marché de moteurs solaires ayant une vie utile $t_s = 20$ ans. En outre, un moteur solaire ayant une puissance double de celle d'un moteur Diesel doit actionner une pompe hydraulique ayant également une puissance double de la pompe à moteur Diesel. Ce coût additionnel de la pompe hydraulique n'est pas pris en considération dans les calculs.

L'analyse repose sur un temps de fonctionnement $h_s = 6-8$ heures, sans stockage d'énergie. Jusqu'à présent, aucun moteur solaire n'a fonctionné quotidiennement pendant $h_s = 8$ heures, même avec stockage d'énergie. Le moteur conçu par le Laboratoire national de physique (Inde) fonctionne pendant $h_s = 4$ heures avec stockage. Le stockage exige une plus grande surface de capteurs solaires, comme le montre la relation (5); ce coût additionnel n'a pas non plus été pris en considération.

Si l'on pouvait assurer un stockage approprié de l'énergie, de sorte que le moteur solaire puisse fonctionner pendant $h_s = 18$ heures, la puissance du moteur solaire ne devrait pas être supérieure à celle du moteur Diesel. Le prix d'équilibre du moteur solaire par unité de puissance, y compris le coût des capteurs et du stockage d'énergie, pourrait être de 1 180 dollars/kW.

Hypothèses économiques. Bien qu'une pompe électrique soit une solution moins coûteuse, la comparaison des coûts a été faite avec une pompe à moteur Diesel. Comme l'analyse a trait à une solution pouvant être adoptée sur le plan national, le fait que l'on ne puisse pas se procurer de fuel dans certaines régions écartées n'a pas été pris en considération. Dans ces régions, les pompes solaires pourraient être utiles dans un proche avenir, notamment pour l'eau potable, car elles pourraient représenter la seule solution possible. Toutefois, on a supposé que le prix du fuel augmenterait du facteur 8 au cours des 20 prochaines années (10% par an) par rapport aux autres prix, que l'on a supposé constants dans l'analyse.

Si les pompes solaires étaient fabriquées dans les pays en développement, leurs prix pourraient être inférieurs aux prix actuels. Par exemple, la pompe

mise au point en Inde⁵ revient à 1 200 dollars/kW. On peut espérer de grands progrès et il reste à savoir quel sera le prix d'une pompe solaire dans les pays en développement.

Problèmes de fonctionnement des pompes solaires

En supposant que le coût d'une pompe solaire soit comparable à celui des autres solutions, on peut se demander quels sont les autres facteurs dont il faut tenir compte. Parmi ceux qui ont été ignorés dans l'analyse précédente, on peut mentionner les conditions climatiques, le rythme de pompage et la possibilité d'installer des capteurs solaires.

Conditions climatiques

L'intensité du rayonnement solaire varie d'un mois à l'autre. Le rendement d'un appareil solaire dépend de l'intensité du rayonnement, de la température, de la couverture nuageuse, etc. Le tableau 4 donne les variations mensuelles de l'intensité du rayonnement solaire, le pourcentage d'utilisation et l'énergie utilisable à Nagpur, dans le Madhya Pradesh, et à Jodhpur, près du désert de Rajasthan. Le tableau montre qu'à Nagpur l'énergie utilisable est cinq fois moindre en août qu'en mai. Or il s'agit des mois pendant lesquels l'eau est nécessaire aux cultures. La raison de cette diminution est qu'il pleut pendant cette période. Si la saison des pluies est retardée et que le temps reste néanmoins couvert, les pompes solaires peuvent ne pas être utiles, à moins que les capteurs solaires ne captent également le rayonnement diffus et que les réserves d'eau soient suffisantes.

Rythme de pompage

Dans les régions chaudes, certains fermiers préfèrent pomper l'eau dans la soirée ou pendant la nuit afin d'éviter les pertes par évaporation. En pareil cas, le stockage peut être essentiel.

Possibilité d'installation de capteurs solaires

La surface de capteurs nécessaire à une pompe de puissance donnée fonctionnant un nombre donné d'heures par jour est dérivée de la relation (8) :

$$A = h_s c_s / \eta_s S$$

Ceci pourrait signifier une surface de capteurs de 100 m² pour une pompe de 4 kW.

Dans les pays en développement, les fermes sont petites et le fermier moyen ne voudra peut-être pas réserver même une faible surface de terre cultivable

⁵ Voir l'article de V. G. Bhide, page 57.

TABLEAU 4 VARIATIONS MENSUELLES DU RAYONNEMENT SOLAIRE ET DE L'ÉNERGIE UTILISABLE DANS DEUX VILLES INDIENNES

| Mois | Nombre de jours | Nagpur | | Jodhpur | | Énergie disponible dans le mois (MJ m ²) | Énergie disponible dans le mois (MJ m ²) |
|-----------|-----------------|--|------------------------|--|------------------------|--|--|
| | | Rayonnement quotidien moyen (MJ m ²) | Pourcentage utilisable | Rayonnement quotidien moyen (MJ m ²) | Pourcentage utilisable | | |
| Janvier | 31 | 19,3 | 88 | 530 | 17,2 | 84 | 450 |
| Février | 28 | 21,3 | 83 | 500 | 20,1 | 84 | 470 |
| Mars | 31 | 23,9 | 76 | 560 | 23,4 | 77 | 560 |
| Avril | 30 | 25,5 | 72 | 550 | 26,4 | 78 | 620 |
| Mai | 31 | 26,4 | 70 | 570 | 28,5 | 83 | 730 |
| Juin | 30 | 20,1 | 40 | 240 | 28,5 | 73 | 620 |
| Juillet | 31 | 16,7 | 23 | 120 | 22,2 | 48 | 330 |
| Août | 31 | 15,9 | 23 | 110 | 20,1 | 43 | 270 |
| Septembre | 30 | 20,1 | 51 | 310 | 22,6 | 54 | 370 |
| Octobre | 31 | 20,9 | 69 | 450 | 21,3 | 84 | 550 |
| Novembre | 30 | 20,1 | 87 | 520 | 18,4 | 91 | 500 |
| Décembre | 31 | 17,6 | 84 | 460 | 15,9 | 88 | 430 |
| TOTAL | 365 | | | 4 920 | | | 5 000 |

Source: Les chiffres relatifs au rayonnement et au pourcentage utilisable sont empruntés à G. O. G. LoI, J. A. Duffie et C. O. Smith, *World Distribution of Solar Radiation* (University of Wisconsin, Solar Energy Laboratory, juillet 1966)

pour l'installation de capteurs solaires, si cette surface est beaucoup plus grande que celle qui est nécessaire pour d'autres solutions. Si les capteurs doivent être placés de telle sorte qu'ils privent certaines cultures de soleil, les fermiers ne seront peut-être pas disposés à adopter cette solution, à moins qu'ils n'acceptent de cultiver certains légumes à l'ombre des capteurs et de faire d'autres cultures sur la terre restante.

Autres facteurs

D'autres facteurs doivent être pris en considération dans la mise au point de pompes solaires, par exemple :

a) Compatibilité de la charge de pointe possible et de la quantité d'eau nécessaire, c'est-à-dire quantité d'eau pouvant être pompée en regard de la quantité nécessaire dans la journée;

b) Possibilité d'obtenir des pièces détachées et de la main-d'œuvre qualifiée pour les réparations;

c) Compatibilité de la nappe d'eau et de la capacité des pompes actuellement sur le marché (cependant, si la vitesse de recharge des puits est faible, la pompe devra fonctionner continuellement et à puissance réduite).

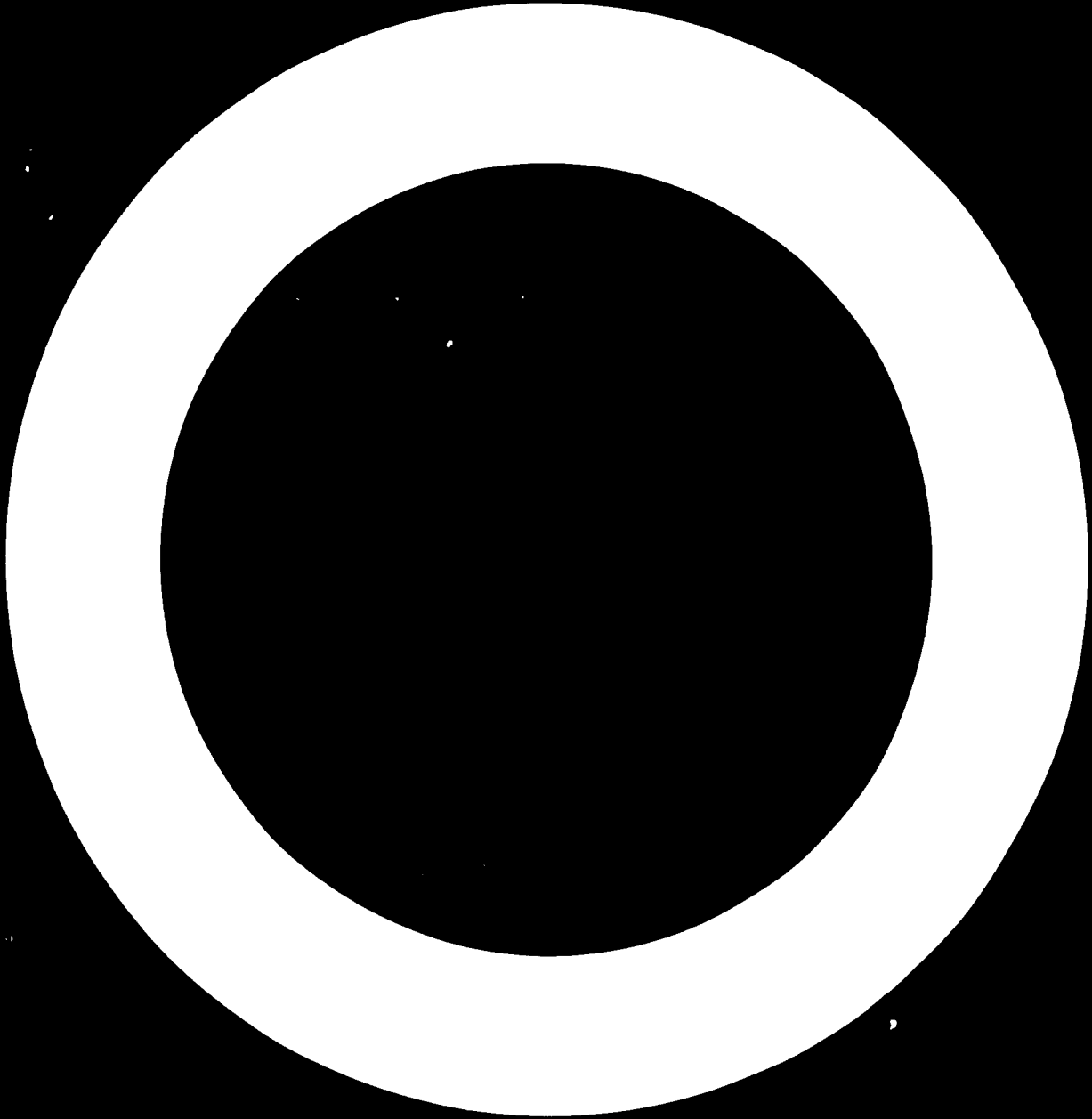
Résumé

Les applications décentralisées de l'énergie solaire conviendraient parfaitement aux grandes et croissantes populations rurales des pays en développement. Une application particulièrement importante

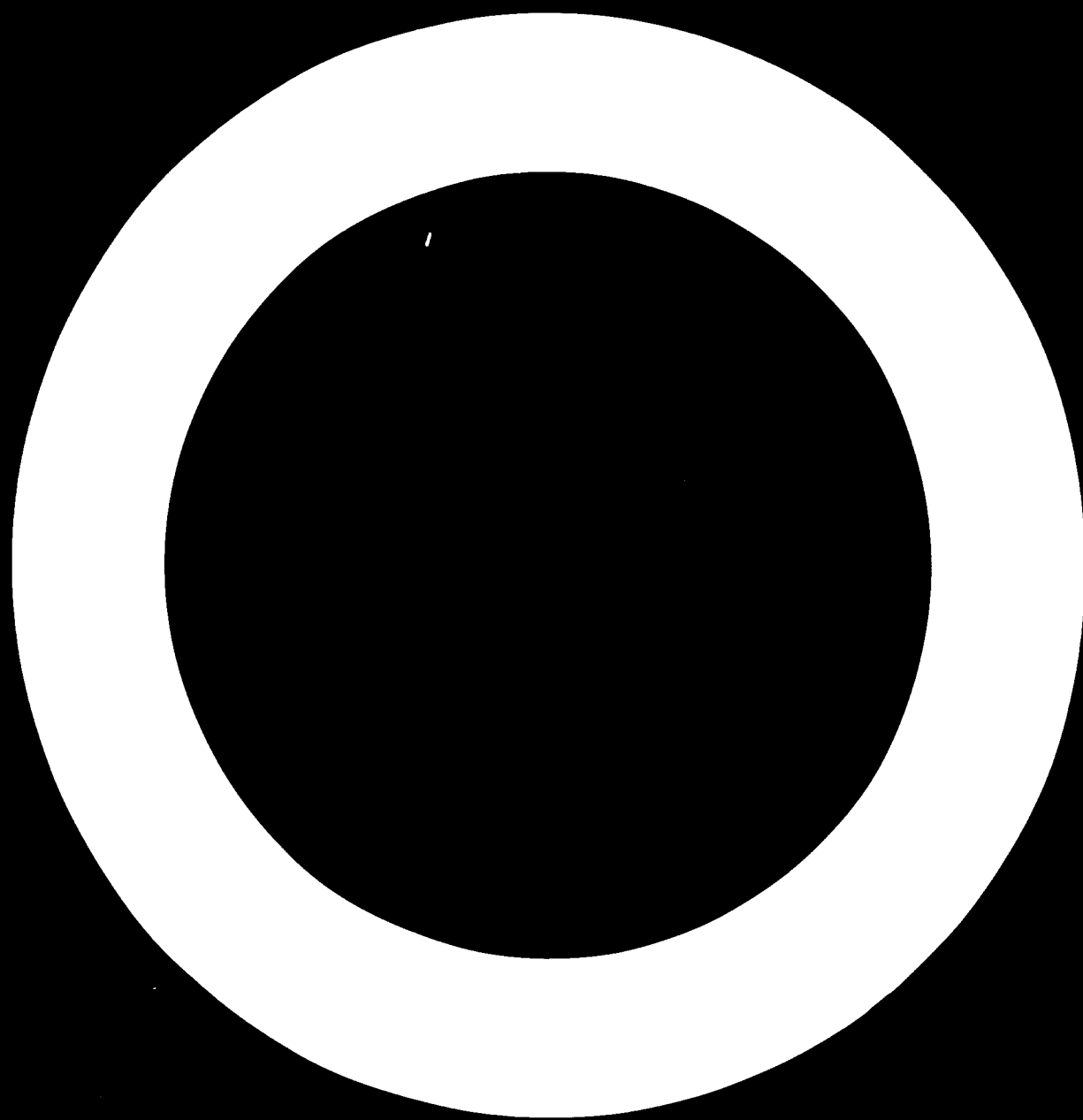
pourrait être le pompage solaire, étant donné les besoins croissants de denrées alimentaires. En Inde, le nombre des pompes motorisées pourra passer de 2 à 20 millions au cours des prochaines décennies.

Le rendement des cultures dépend essentiellement des possibilités d'irrigation ou d'arrosage pendant certaines périodes de l'année. Une pompe solaire devrait donc être conçue pour répondre aux besoins d'irrigation dans toutes les conditions possibles. Cela signifie qu'une pompe solaire doit avoir une puissance plus élevée qu'une pompe à moteur Diesel pour fournir le même travail. L'analyse précédente, qui tient compte de l'escalade du prix du fuel, montre que le prix d'équilibre d'une pompe solaire est de l'ordre de 250-600 dollars/kW. Le prix actuel d'un moteur solaire est vingt fois plus élevé. Cependant, ce prix pourrait baisser si les moteurs étaient fabriqués dans les pays en développement. Si un moteur solaire est installé pour obtenir uniquement de l'eau potable, il suffit qu'il fonctionne 6-8 h/j et il peut donc avoir la même puissance qu'un moteur Diesel. En ce cas, le prix d'équilibre pourrait être de 1 200 dollars/kW. (Évidemment, si l'on ne dispose ni de fuel, ni d'électricité dans certaines régions écartées, les pompes solaires peuvent être la seule solution possible.)

En outre, même si l'on met au point des pompes solaires compétitives du point de vue économique, il faut également tenir compte d'autres facteurs, tels que les conditions climatiques, la situation géographique et l'environnement local, social et institutionnel. Pour qu'un transfert de techniques soit couronné de succès, il faut que ce que l'on propose réponde bien aux fins envisagées.



Annexes



I. RECOMMANDATIONS DE LA REUNION DU GROUPE D'EXPERTS SUR L'EVALUATION DES TECHNIQUES ACTUELLES D'UTILISATION DE L'ENERGIE SOLAIRE ET DES POSSIBILITES DE FABRICATION DE MATERIEL UTILISANT CETTE ENERGIE DANS LES PAYS EN DEVELOPPEMENT*

Plan d'action pour l'ONUDI

I. Préambule: Le Groupe d'experts reconnaît que la technologie solaire est un domaine d'activité transdisciplinaire ayant un potentiel continu d'applications économiques fructueuses dans les pays industrialisés et les pays en développement. Compte dûment tenu des activités de l'ONUDI pour encourager la R-A, la promotion de la fabrication et le transfert des techniques dans le domaine de l'énergie solaire, en vue de répondre aux besoins des pays en développement, le Groupe d'experts reconnaît également les progrès technologiques rapides que les pays industrialisés et quelques pays en développement ont réalisés dans ce domaine et il attache une grande importance aux possibilités d'aider les pays en développement qui s'offrent à l'ONUDI par la vulgarisation des connaissances les plus récentes et l'évaluation efficace d'une technologie en évolution rapide.

Recommandation 1. En conséquence, le Groupe d'experts recommande que l'ONUDI établisse un "Groupe consultatif pour la technologie solaire" à titre honoraire. Ce Groupe consultatif sera composé de spécialistes éminents de la technologie solaire, choisis dans des pays industrialisés et des pays en développement, et servira de "centre de référence et contact technique" pour l'ONUDI. Chaque membre du Groupe sera chargé de conseiller l'ONUDI, à titre individuel et honoraire, dans un système de dissémination des connaissances technologiques. A la demande de l'ONUDI, le Groupe consultatif se réunira pour étudier des problèmes techniques déterminés et pour aider le Secrétariat de l'ONUDI, il sera disponible pour fournir des services consultatifs de brève durée sur le terrain. Ces services sur le terrain ne feront l'objet d'aucun financement, les honoraires étant symboliques.

II. Préambule: Le Groupe d'experts est fermement convaincu que la technologie solaire est bien établie du point de vue des principes scientifiques et théoriques. Cependant, la transformation de principes scientifiques en matériel technique fait encore l'objet de travaux très poussés dans des pays industrialisés et quelques pays en développement. Par exemple: *a)* on ne trouve sur le marché que des capteurs (plans ou à faible effet de concentration) et des chauffe-eau, *b)* des distillateurs d'eau d'un modèle simple, des séchoirs et des appareils de cuisson d'un modèle simple ont été fabriqués, mais ne sont pas encore produits en grandes séries parce que les marchés ne sont pas suffisamment développés, *c)* des pompes, des appareils de chauffage des locaux (habitations, ateliers, centres de loisirs, etc.), des séchoirs, des appareils de cuisson, des bouilleurs, des distillateurs et

*Telles qu'elles figurent dans le rapport de la réunion (UNIDO/IOD.73). Ce rapport a été publié en anglais seulement.

des appareils frigorifiques à absorption intermittente à basse température ont été conçus et fabriqués par quelques industriels et institutions (aucun jugement sur les possibilités de fabrication en grandes séries ne pourra être porté avant des essais sur le terrain en mettant l'accent sur la fiabilité et l'analyse des performances), *d)* les appareils frigorifiques (à absorbant solide chlorure de calcium et autres) et les climatiseurs en sont encore au stade du prototype et exigent de nouveaux travaux de R-A, ainsi que des essais des prototypes sur le terrain, *e)* les centrales solaires en sont encore au stade de la conception, mais ont de belles perspectives, *f)* des piles solaires pour les applications spatiales ont été conçues, fabriquées et utilisées avec succès dans certains pays industrialisés, cependant, leur transformation en vue d'une utilisation terrestre généralisée exige de nouveaux travaux technologiques en vue de réduire leur coût, les piles solaires sont très prometteuses pour tous les pays.

En conséquence, les activités de l'ONUDI pour promouvoir la technologie solaire et, éventuellement, des programmes de fabrication devraient s'exercer à différents niveaux.

Recommandation 2. Afin de promouvoir le concept de technologie solaire et ses perspectives dans les pays en développement, l'ONUDI devrait rassembler toutes les informations disponibles et les mettre à la disposition de tous les pays en développement et des institutions des pays industrialisés. En outre, l'ONUDI devrait lancer un programme pour l'établissement de manuels techniques (sources d'informations, état des connaissances, etc.), organiser des réunions de groupes de travail et créer des bourses (formation) dans l'intérêt des pays en développement.

Recommandation 3. L'ONUDI devrait aider les pays en développement, sur leur demande, à négocier avec les sociétés industrielles étrangères en vue de la fabrication locale de produits bien établis, en mettant l'accent sur l'évaluation des techniques, les possibilités d'adaptation aux conditions locales, l'évaluation des performances grâce à des essais sur place et des négociations d'ordre commercial et technico-économique en vue de la fabrication. Il est recommandé qu'à la demande d'un pays en développement, l'ONUDI devienne un conseiller actif dans de telles négociations, en vue d'aboutir à l'accord le plus satisfaisant en tenant dûment compte des intérêts des pays en développement.

Recommandation 4. L'ONUDI devrait s'associer activement aux programmes de développement de certaines institutions de R-A dans des pays industrialisés et dans des pays en développement choisis, en ce qui concerne des produits qui ont déjà été fabriqués mais exigent des essais plus poussés. A ce sujet, l'ONUDI doit s'occuper activement du jumelage d'institutions de pays industrialisés et de pays en développement et favoriser l'introduction de

tels prototypes dans des pays en développement grâce à des essais et à des évaluations techno-économiques. Son assistance est également nécessaire pour transformer des prototypes d'essais en "prototypes de présérie". L'ONUDI doit également aider les institutions des pays en développement à obtenir une telle technologie et à promouvoir la fabrication. A ce propos, l'ONUDI, sur demande des pays en développement, devrait envoyer les experts appropriés pour aider les gouvernements à formuler un tel programme intégré et à le mettre en œuvre.

Recommandation 5. Grâce à une association active avec des institutions de R-A choisies dans des pays industrialisés, l'ONUDI devrait aider les institutions de R-A de pays en développement à se tenir au courant des activités au stade de la conception, ainsi que des activités qui offrent de belles perspectives.

III. Préambule : Compte tenu de l'infrastructure technologique requise, de l'évolution continue des techniques et du besoin d'adapter les techniques et des prototypes par des essais sur le terrain, ainsi que du besoin d'analyse en laboratoire, de modifications, de négociations pour la fabrication locale et le développement de l'esprit d'entreprise local, le Groupe d'experts attache une grande importance au transfert de techniques par les pays industrialisés, ainsi qu'à la coopération entre pays en développement.

Recommandation 6. Le Groupe d'experts recommande que l'ONUDI aide tous les pays en développement intéressés, sur leur demande, à créer ou à renforcer les institutions nationales appropriées, en mettant l'accent sur la R-A, l'évaluation des techniques, les négociations pour la fabrication locale et le développement de l'esprit d'entreprise. Les programmes de travail devraient prendre en considération les besoins locaux, le niveau de la technologie, la priorité et le potentiel des produits, et être exécutés sur la base des transferts de techniques par les institutions de pays industrialisés, en mettant l'accent sur la coopération entre pays en développement, en vue de développer les possibilités locales. A ce sujet, l'ONUDI doit aider les pays en développement à prendre des décisions judicieuses quant aux programmes de développement de la technologie solaire : R-A, cadre institutionnel, promotion des investissements et promotion de la fabrication.

Recommandation 7. En vue de a) promouvoir la coopération entre pays en développement, b) mobiliser les ressources technologiques et financières, c) promouvoir le concept de l'autonomie, d) utiliser efficacement les réalisations technologiques et les possibilités de pays en développement choisis dans l'intérêt d'autres pays en développement, il est recommandé que l'ONUDI renforce les institutions appropriées existant dans des pays en développement choisis (qui possèdent une infrastructure technologique et industrielle) et les transforme en "centres d'excellence pour l'énergie solaire" qui auront pour

objectif d'exécuter des programmes de R-A dans l'intérêt d'autres pays en développement intéressés. En conséquence, le Groupe d'experts recommande que l'ONUDI détermine l'intérêt de pays en développement choisis à être associés à ce programme, qui fera partie du noyau d'activités dans le cadre de la coopération entre pays en développement, et que l'ONUDI aide les institutions locales à développer un programme de travail intégré de R-A et d'évaluation des techniques et des prototypes, à disséminer les informations technologiques et à vulgariser les techniques, à former du personnel technique venant d'autres pays en développement et à promouvoir l'esprit d'entreprise. Ces "centres d'excellence" devraient aussi mettre des prototypes et des techniques à la disposition d'autres pays en développement, entreprendre des évaluations en coopération et lancer un programme pour la fabrication éventuelle de produits appropriés, en mettant dûment l'accent sur les techniques appropriées. A ce propos, l'ONUDI devrait aussi mettre au point un programme de coopération entre deux "centres d'excellence". Il est également fortement recommandé que les activités de l'ONUDI tendent à promouvoir la coopération et le transfert de techniques à ces "centres d'excellence" par les institutions et les industriels de pays industrialisés.

IV. Préambule : Le Groupe d'experts est convaincu que l'utilisation pratique de l'énergie solaire est devenue une réalité et que le monde entre dans une ère nouvelle. Il s'agit d'une technologie ayant de vastes perspectives et pouvant parfaitement répondre aux besoins des pays en développement. Il faut pousser les travaux de R-A, l'évaluation des techniques, l'analyse sur le terrain des prototypes, l'évaluation de la fiabilité des produits, avec analyse techno-économique et analyse des coûts, le développement de la technologie de fabrication, la promotion de l'esprit d'entreprise et de la fabrication locale. En conséquence, le Groupe d'experts estime que l'ONUDI devrait prendre des initiatives et mettre au point un programme d'action intégré.

Recommandation 8. Il est recommandé que l'ONUDI mette au point un programme d'action intégré, à court et à moyen terme, dans l'intérêt des pays en développement. A ce propos, il est recommandé que l'ONUDI lance un programme de coopération avec des institutions et des industriels dans des pays industrialisés ainsi que dans des pays en développement. Il convient de mettre tout spécialement l'accent sur la coopération d'autres organismes des Nations Unies, ainsi que d'organisations intergouvernementales et non gouvernementales appropriées.

Recommandation 9. Il est recommandé que les gouvernements de pays en développement donnent une priorité suffisamment élevée à un programme d'action en matière de technologie solaire. Une solution consisterait à confier un programme de technologie solaire à une institution existante appropriée, à fournir le financement et le personnel technique nécessaires et à mettre au point un

programme de travail pratique. En outre, il est également recommandé que les gouvernements, par l'intermédiaire des organismes météorologiques existants, prennent les mesures nécessaires pour recueillir les données appropriées pour faciliter et orienter l'exécution d'un programme de technologie solaire.

Recommandation 10. Il est recommandé que l'ONUDI prenne une part active, avec les gouvernements de pays industrialisés, dans le lancement d'activités intégrées appropriées dans l'intérêt des pays en développement. A ce propos, le Groupe d'experts prie vivement l'ONUDI de lancer un programme visant à obtenir des pays industrialisés des

contributions financières pour des projets intégrés sur l'énergie solaire, et d'établir des plans d'action concrets et efficaces.

Recommandation 11. Etant donné l'importance du financement pour le lancement de tout programme de technologie solaire, il est recommandé que les gouvernements des pays en développement allouent les crédits nécessaires à cette activité. En outre, il est recommandé que l'ONUDI lance un programme pour obtenir des contributions appropriées [en espèces ou en nature (installations, techniques, etc.)] dans le cadre de la coopération entre pays en développement.

II. PROJETS EN COURS DE L'AIH TOUCHANT L'ENERGIE SOLAIRE

L'Agence internationale de l'énergie (AIEA) a été créée en novembre 1974. Elle a pour membres les pays suivants: Allemagne (République fédérale d'), Autriche, Belgique, Canada, Danemark, Espagne, Etats-Unis d'Amérique, Irlande, Italie, Japon, Luxembourg, Nouvelle-Zélande, Pays-Bas, Royaume-Uni de Grande-Bretagne et d'Irlande du Nord, Suède, Suisse et Turquie. La Norvège et la Commission des Communautés européennes y participent en qualité d'observateurs.

L'AIEA a plusieurs comités, dont le Comité pour la recherche et le développement en matière d'énergie. Dans ce Comité, le Groupe d'experts de l'énergie solaire a mis au point cinq projets en coopération touchant le chauffage, la climatisation, la mesure et l'analyse du rayonnement solaire. En novembre 1975, le Comité directeur de l'AIEA a approuvé des projets dans sept nouveaux domaines technologiques, dont les centrales solaires, l'énergie éolienne, l'énergie thermique des océans et la biomasse. Cinq des projets en cours sont décrits ci-dessous.

Projet 1. Développement d'appareils solaires de chauffage, réfrigération et production d'eau chaude

Ce projet vise à organiser la coopération entre les pays participants dans deux domaines: d'une part, conception et simulation d'appareils solaires de chauffage, réfrigération et production d'eau chaude, en vue de calculer leurs performances thermiques; d'autre part, mesure et description de la performance thermique de ces appareils, description de leur durée de vie et de leur coût. On espère que ces travaux fourniront une base pour l'optimisation du rapport bénéfices-coûts de ces appareils.

L'exécution de ce projet aura les résultats suivants:

Information sur une évaluation des programmes actuels d'ordinateurs pour le calcul de la performance thermique de systèmes.

Procédure internationale normalisée pour mesurer la performance thermique de systèmes.

Information sur la performance thermique, la durée de vie et le coût de systèmes existants et surtout de nouveaux systèmes.

Procédure pour la conception des systèmes les plus économiques.

Projet 2. Mise au point d'éléments pour des appareils solaires de chauffage, réfrigération et production d'eau chaude

Ce projet vise à accélérer la mise au point des éléments d'appareils solaires de chauffage, réfrigération et production d'eau chaude, par l'analyse et l'échange de données sur des programmes existants et nouveaux dans les pays participants.

La fiabilité des systèmes solaires de chauffage, réfrigération et production d'eau chaude, en vue de leur application industrielle, dépend de l'efficacité des principaux éléments. D'importants travaux de R-A sont donc entrepris dans les pays participants pour améliorer la performance et la durée de vie des principaux éléments, ainsi que pour réduire leur coût.

Les principaux éléments des appareils solaires de chauffage et de réfrigération qui ont été inclus dans ce projet sont les suivants:

- Capteurs.
- Stockage de l'énergie thermique.
- Climatisation.
- Autres éléments principaux, selon le cas.

Projet 3. Essais de capteurs solaires

Ce projet vise à mettre au point et à appliquer des procédures normalisées d'essais pour déterminer la performance de divers capteurs utilisables pour le chauffage et la réfrigération.

Les capteurs constituent un élément essentiel de tout appareil solaire. Il existe de nombreux modèles de capteurs, avec des caractéristiques très diverses. Il est urgent de faire des essais de performances pour définir le potentiel technique et économique des capteurs. Par conséquent, il faut utiliser des méthodes normalisées pour déterminer le rendement d'un capteur et pour prédire sa fiabilité et sa durée de vie. On espère pouvoir définir la performance de capteurs en spécifiant quelques qualités caractéristiques, telles que les propriétés optiques, thermiques et mécaniques. Une procédure d'essais doit permettre de mesurer ces propriétés. La procédure d'essais provisoire (NBSIR-74-365) proposée par le Bureau national des normes (BNN) des Etats-Unis représente un premier pas dans cette direction. Cette procédure d'essais est déjà appliquée ou à l'étude dans plusieurs pays membres en vue d'améliorations éventuelles. Les difficultés inhérentes à la procédure du BNN sont dues à une restriction des conditions ambiantes, qui ne permet les essais dans des régions telles que l'Europe centrale que pendant quelques semaines par an. Ces problèmes peuvent être résolus en utilisant des simulateurs, c'est-à-dire des rayonnements solaires artificiels et des conditions climatiques reproduites en chambre. L'un des principaux objectifs du projet est de déterminer si la simulation donne des résultats valables.

L'exécution des travaux envisagés aura pour résultat: a) des données fiables pour la conception des appareils; b) des conseils d'ingénieurs pour la conception des capteurs; c) une base pour l'établissement de normes de qualité. Il s'ensuit que les procédures d'essais doivent être scientifiquement correctes, suffisamment précises et aussi simples que possible.

Le but des travaux de recherche est de réduire les essais de performances à l'évaluation d'un ensemble de paramètres caractéristiques définissant les propriétés optiques, thermiques et mécaniques. Pour atteindre ce but, il faut mener à bien quatre tâches:

Mise au point de procédures d'essais recommandées pour déterminer les performances thermiques à l'extérieur.

Mise au point de procédures d'essais recommandées pour déterminer les performances thermiques à l'intérieur.

Mise au point de procédures d'essais recommandées, essais de longue durée à l'extérieur, accélérés à l'intérieur, pour déterminer les performances mécaniques.

Compilation des résultats dans un manuel de référence sur les capteurs

Projet 4 *Mise au point d'un manuel sur l'insolation et d'un coffret d'instruments*

Les objectifs de ce projet sont les suivants: *a)* établir et diffuser un manuel sur l'insolation et les mesures météorologiques connexes en vue de l'utilisation de l'énergie solaire; *b)* concevoir, réaliser, essayer, évaluer et recommander un coffret d'instruments, portable et peu coûteux, pour la mesure de l'insolation et des données météorologiques connexes, qui servirait à des mesures au lieu d'implantation d'installations solaires, avant et pendant leur fonctionnement. Ce coffret d'instruments fournira des données essentielles, sous une forme appropriée, pour de nombreuses études des applications de l'énergie solaire et de la conception des installations. Il fournira également des données pour l'évaluation des performances des installations ou de leurs éléments.

Les centres météorologiques nationaux à travers le monde ont accumulé un ensemble significatif et fiable de données et expériences sur l'insolation et les mesures météorologiques connexes. Cependant, ces données et mesures doivent être résumées pour être utilisables dans les nombreux programmes nationaux sur l'énergie solaire. Le manuel qui sera préparé au titre de ce projet répondra à ce besoin.

Tout pays anticipant des applications importantes de l'énergie solaire doit avoir le moyen de mesurer le rayonnement solaire et les paramètres

connexes dans toutes ses zones climatiques, ainsi que dans les zones où l'on prévoit une augmentation de la population ou de l'activité industrielle et sur les lieux d'utilisation possible de l'énergie solaire. En outre, la conception et l'évaluation d'installations solaires et de leurs éléments exigent certaines données sur le rayonnement solaire et la météorologie. Le coffret d'instruments envisagé sera conçu pour fournir ces données dans les limites permises par le fait qu'il devra être peu coûteux et portable.

L'exécution de ce projet aura les résultats suivants: *a)* fournir un recueil de données précieuses; le *Manuel d'insolation et de mesures météorologiques connexes* établi par des experts internationaux et diffusé dans tous les pays membres de l'AIE; *b)* faciliter grandement la compréhension dans les pays membres des essais et démonstrations sur l'insolation et les aspects météorologiques connexes; *c)* permettre un échange de renseignements plus efficaces et mieux utilisables sur les performances des installations, qui permettra à chaque pays participant de combler les lacunes de ses propres programmes nationaux grâce aux expériences et aux résultats acquis dans d'autres pays.

Projet 5 *Utilisation de données météorologiques existantes dans l'énergie solaire*

Les objectifs de ce projet sont les suivants: *a)* déterminer les relations quantitatives entre les mesures du rayonnement solaire et d'autres paramètres météorologiques; *b)* mettre au point un système international uniforme de présentation des données sur le rayonnement solaire, afin de faciliter les calculs d'énergie solaire.

Les travaux seront concentrés sur deux tâches principales: *a)* donner des conseils sur les méthodes d'évaluation de l'insolation d'une surface horizontale ou d'une surface inclinée, grâce à des mesures du rayonnement solaire ou à d'autres données météorologiques; *b)* améliorer la qualité des enregistrements passés et présents du rayonnement solaire et mettre ces données sous forme normalisée.

III - SYSTEMES D'INFORMATION SUR L'ENERGIE SOLAIRE*

Généralités

Idéalement, un système d'information sur l'énergie solaire devrait remplir les tâches suivantes :

Appui à la R-A, par diffusion ordonnée des informations sur les résultats des recherches passées et actuelles.

Transfert des techniques, en fournissant les résultats de la R-A sous une forme appropriée aux applications directes.

Données de planification, par exemple sur les paramètres climatiques, mais comprenant aussi des données sur les coûts et autres aspects économiques ainsi que sur les aspects normatifs, législatifs et réglementaires, etc.

L'étude a porté jusqu'à présent sur le premier rôle (appui à la R-A), qui est probablement le plus important au stade actuel, où plusieurs pays en sont encore au stade de la préparation de programmes. Néanmoins, à longue échéance, les autres fonctions d'un système d'information sont au moins tout aussi importantes. A l'heure actuelle, la plupart des pays pour lesquels on a obtenu des données ne sont pas encore en mesure de donner suite aux systèmes d'information en ce qui concerne les transferts de techniques et les données de planification, bien qu'ils aient des plans pour cela et que dans un cas (Etats-Unis d'Amérique) ces plans commencent à être mis en œuvre.

Le concept d'un programme d'information complet est également à l'étude, notamment aux Etats-Unis, un tel programme remplirait des fonctions multiples, allant du rôle classique d'appui à la R-A et du transfert des techniques jusqu'aux informations destinées aux autorités locales, aux services publics et même à la population, en vue de promouvoir l'utilisation de l'énergie solaire pour conserver ou remplacer d'autres sources d'énergie.

Cependant, dans le domaine de l'appui à la R-A, les résultats actuels de l'étude montrent que dans la plupart des pays la situation n'est pas cristallisée au point que les besoins particuliers des hommes de science et ingénieurs spécialisés dans ce domaine puissent être évalués et que l'on puisse établir une banque de données pour répondre à leurs besoins. En général, les informations paraissent dans une grande variété de journaux et de rapports de laboratoire et, sauf aux Etats-Unis et peut-être en République fédérale d'Allemagne, ne sont pas répertoriées en vue d'un accès facile.

Ampleur et portée — sources d'information

Du point de vue de l'information scientifique et technique, l'énergie solaire est une sous-zone de l'énergie dans son ensemble, comme pour les autres

formes d'énergie. L'information est transdisciplinaire, c'est-à-dire que les informations requises par une équipe exécutant un projet de R-A relèvent de nombreuses sous-disciplines de la physique, de l'ingénierie et autres sciences. Pour la planification de projets, il faudra avoir accès aux informations sur la météorologie et peut-être la géologie, pour des travaux de planification et d'évaluation, il faudra également disposer de données sur les ressources et les aspects économiques.

Il s'ensuit que, si un découpage de ce domaine peut être utile aux fins de classement des documents, l'ensemble du stock d'informations ne peut pas et ne doit pas être divisé en blocs isolés, ayant trait l'un à la production d'électricité, l'autre au chauffage et à la réfrigération, un troisième et un quatrième aux méthodes de conversion thermique et aux photopiles. Une banque de données concernant la production d'énergie électrique solaire ne peut pas être identifiée comme une entité distincte de toute autre banque de données sur la recherche ou les applications. En fait, dans de nombreuses analyses et évaluations concernant l'énergie solaire et fondées sur l'analyse des systèmes ou les méthodes de prévisions de la technologie, il peut être nécessaire d'avoir accès en outre à d'autres domaines de l'information sur l'énergie.

L'ampleur et la portée des informations scientifiques et techniques sur l'énergie solaire sont bien illustrées par la définition ci-après de l'énergie solaire, qui figure dans le répertoire de l'IRDA concernant les informations sur l'énergie :

"Informations sur la conversion du rayonnement solaire en quantités appréciables d'énergie électrique, l'utilisation de l'énergie solaire pour le chauffage et la réfrigération, ou toute autre utilisation de l'énergie solaire pouvant contribuer au bilan énergétique total. Informations sur tous les aspects techniques de la conception, la R-A, la fabrication, l'essai et le fonctionnement des piles solaires et des capteurs. Information sur les matériaux utilisables dans les piles solaires ou les convertisseurs."

Dimension et caractéristiques des banques de données

Selon cette définition de l'ampleur et de la portée, il y a sans doute une dizaine de milliers d'articles, rapports et monographies, la plupart en anglais, qui constituent la principale source d'information. Il est probable que cette documentation ne contient pas beaucoup de publications émanant de l'Europe de l'Est et de l'URSS et ne contient pas de publications en japonais. En outre, il peut y avoir une certaine quantité (inconnue) de documents émanant d'entreprises privées, mais non publiés ou diffusés, la documentation provenant des Etats-Unis contient certainement une forte proportion de rapports donnant les résultats de travaux exécutés par l'industrie sous contrat avec des organismes gouvernementaux. On peut penser que la proportion de documents "non conventionnels" (rapports de

*Extrait de *Small Solar Power Systems* (appendice, p. 175 et suivantes).

laboratoire et de contractants, qui ne sont pas publiés officiellement) sera élevée, comme c'est généralement le cas pour les travaux de R-A à des fins particulières. Par exemple, dans le domaine de l'énergie atomique, le rapport documents non conventionnels/documents officiels est de 1,5. Le rythme de parution des documents scientifiques et techniques concernant l'énergie solaire augmente sans cesse d'après une estimation bien fondée, les additions atteindront le chiffre de 200 par mois en 1976.

Informations sur la R-A en Europe

Sources disponibles

L'étude des activités d'information scientifique et technique dans les pays européens membres de l'IAE est loin d'être complète, mais une source d'information fréquemment mentionnée est celle qui est contenue dans les fichiers mécanographiques du RECON, système d'information exploité par le Service de documentation spatiale de l'Agence spatiale européenne et auquel on peut avoir accès grâce au réseau FSANET (ce réseau a des terminaux en Allemagne (République fédérale d'), au Danemark, en Espagne, en France, en Italie, aux Pays-Bas, au Royaume-Uni et en Suède. Cependant, d'autres pays peuvent y avoir accès par liaison téléphonique normale. On peut interroger une douzaine de fichiers centraux mécanisés, parmi lesquels les suivants ont un contenu touchant l'énergie solaire

NASA (technologie aérospatiale et technologies connexes).

INSPEC (physique appliquée).

ME-LADFX (métallurgie, etc.).

ENGINEERING INDEX (ingénierie).

Résumés analytiques de recherches gouvernementales (NTIS - technologie)

A l'exception d'INSPEC, tous ces fichiers sont établis aux Etats-Unis. On peut également trouver des références utiles dans d'autres fichiers disponibles par l'intermédiaire du réseau, par exemple World Aluminium Abstracts, Nuclear Science Abstracts et Chemical Abstracts Condensates.

Comme ces sources d'information sont à la disposition des utilisateurs dans la plupart des pays européens membres de l'IAE, il peut être utile d'évaluer l'ampleur probable du contenu de ces fichiers, par comparaison aux banques de données nationales sur l'énergie solaire.

Si l'on admet que la banque de données totales n'existe pas encore, la plus proche approximation est la Bibliographie sur l'énergie solaire, produite par l'ERDA, qui contient maintenant quelque 10 000 articles. Sur le même sujet, la banque de données de l'FSANET contient probablement un peu plus de la moitié de ce chiffre, mais on ne peut pas faire d'estimation exacte sans une vérification détaillée, qui serait longue et coûteuse. Néanmoins, l'existence de l'FSANET et le fait qu'elle peut être consultée par tous les pays d'Europe occidentale constituent une aide précieuse aux travaux de R-A dans ce domaine. Toutefois, cette banque de données ne contient pas

d'informations sur les recherches en cours. Pour ce qui est de sa croissance éventuelle, il se peut qu'elle soit freinée dans une certaine mesure par le fait que les données résultant du programme solaire des Etats-Unis figureront dans la banque de données de l'ERDA (rapports de contractants, etc.) de préférence à d'autres banques de données. Les informations sur l'énergie solaire n'émanant pas de l'ERDA figureront dans le fichier central de l'Engineering Index, le cas échéant, et le NTIS ne modifiera sans doute pas le cadre de son activité actuelle, mais la meilleure solution du problème serait vraisemblablement que les nouvelles informations disponibles à l'ERDA puissent être consultées par l'intermédiaire de l'FSANET.

Pour ce qui est des sources d'information non mécanisées, les représentants des Etats membres de l'IAE ont été priés d'indiquer quels étaient les journaux et autres publications qu'ils jugeaient utiles. Les réponses reçues à ce jour sont insuffisantes pour permettre de tirer des conclusions quelconques. Toutefois, l'impression générale est que les informations utiles sont dispersées dans un si grand nombre de publications que l'obtention d'un pourcentage satisfaisant de données sur une question déterminée est un problème majeur, même pour les usagers des grandes bibliothèques spécialisées.

Au cours de l'étude, on n'a noté que deux tentatives de création d'une banque de données spécialisée faisant une place suffisante à l'énergie solaire, toutes deux en République fédérale d'Allemagne à Jülich et à Karlsruhe. Karlsruhe est le centre allemand pour l'introduction dans INIS et constitue donc le foyer des services d'information allemands en matière d'énergie atomique. On croit comprendre qu'il va étendre son activité pour englober tout le domaine de l'énergie. La banque de données sur l'énergie solaire de Jülich en est au stade de la planification.

Informations sur la R-A aux Etats-Unis

Introduction

La meilleure manière de comprendre la situation actuelle est d'étudier le développement de la banque de données sur l'énergie de l'ERDA (EFDB). Il s'agit d'une banque de données sur ordinateur, qui contient tous les articles figurant dans les Résumés analytiques de l'ERDA, lesquels couvrent toutes les publications faisant état de recherches faites sous les auspices de l'ERDA, dans Energy Abstracts (or Policy Analysis (également une publication de l'ERDA), les apports de l'ERDA à l'INIS dans le domaine nucléaire, ainsi que les articles non nucléaires et n'émanant pas de l'ERDA qui figurent dans la publication Energy Abstracts. Cette dernière est un sous-groupe de Engineering Index, mais est spécialisée dans toutes les disciplines de l'ingénierie relatives à l'énergie. Ainsi tous les documents relatifs à l'énergie solaire, qu'ils émanent ou non de l'ERDA, figurent dans l'EFDB. La documentation n'émanant pas des Etats-Unis est acquise grâce à des accords d'échanges. En juillet 1976, l'EFDB devait remplacer Nuclear Science Abstracts. Les informations sur l'énergie solaire

publiées avant la création de l'EDB provenaient de nombreuses sources autres que les publications (par exemple les programmes de la NASA et de NSF), mais il semble que toute cette documentation figure dans la bibliographie sur l'énergie solaire publiée par le Centre d'information technique de l'ERDA.

Organisation

L'exécution du programme d'information scientifique et technique de l'ERDA est confiée au Bureau des relations publiques. Le Centre d'information technique de Oak Ridge (Tennessee) est responsable de toutes les publications techniques de l'ERDA et de la création de la banque de données. La banque de données de l'ERDA peut être consultée à l'intérieur des Etats-Unis grâce au réseau RECON de l'ERDA (autrefois AEC) qui dessert les centres et les principaux contractants de l'ERDA. Le terminal principal du réseau est également à Oak Ridge, au Laboratoire national d'Oak Ridge.

Contenu de l'EDB sur l'énergie solaire

Les sous-catégories de l'énergie solaire figurant dans l'EDB sont les suivantes

| | |
|--|--|
| Ressources et possibilités d'obtention | Centrales solaires à tour |
| Stockage et rejet de la chaleur | Centrales à réflecteurs paraboliques linéaires |
| Géologie et météorologie locales | Utilisation du rayonnement solaire |

| | |
|---------------------------------|---------------------------------------|
| Aspects économiques | Chauffage et climatisation des locaux |
| Aspects écologiques | Cuisson |
| Conversion de l'énergie solaire | Fours |
| Conversion photovoltaïque | Distillation |
| Conversion thermionique | Séchage |
| Conversion thermoélectrique | Dessalement |
| Conversion par photosynthèse | Chauffage de l'eau |
| Centrales photovoltaïques | Moteurs thermiques |
| Centrales thermiques solaires | Capteurs solaires |
| Centrales orbitales | |

Autres banques de données

Les banques de données sur ordinateur contenant une documentation sur l'énergie solaire sont la NASA, NTIS et COMPENDEX (Engineering Index). La catégorie "énergie solaire" de l'EDB contiendra, semble-t-il, des données provenant de ces fichiers. Les informations d'avant 1976 contenues dans ces fichiers ont été incluses dans la bibliographie sur l'énergie solaire de TIC.

Une bibliographie sur l'énergie thermique solaire est publiée par le Centre d'applications technologiques de l'Université du Nouveau-Mexique. Elle contient environ 4 000 articles et est mise à jour. La mesure dans laquelle son contenu figure également dans la bibliographie de TIC, qui a une plus grande portée, n'est pas exactement connue, mais les deux bibliographies devraient être pratiquement identiques puisque leurs sources sont les mêmes. Il n'existe pas de service de bandes pour ordinateur.

IV. ORGANISMES S'INTERESSANT A L'ENERGIE SOLAIRE

Allemagne, République fédérale d'

Deutsche Forschungs- und Versuchsanstalt
für Luft- und Raumfahrt
Pfeifenwaldring 38-40
D-7000 Stuttgart

Australie

Committee on Solar Energy and Research
Australian Academy of Science
P.O. Box 216, Civic Square
Canberra, ACT 2606

Autriche

Agence solaire et spatiale autrichienne
Garnisongasse 9
A-1090 Vienne

Bresil

Université de Campinas
Caixa Postal 1170
Campinas, São Paulo

Canada

Institut de recherche Brace
Collège Macdonald de l'Université McGill
Ste Anne de Bellevue HOA 100, Québec

Etats Unis d'Amérique

College of Engineering and Applied Sciences
Arizona State University
Tempe, AZ 85281

Solar Energy Application Laboratory
Colorado State University
Fort Collins, CO 80523

Solar Energy and Energy Conversion Laboratory
College of Engineering
University of Florida
Gainesville, FL 32611

France

Centre national de la recherche scientifique
15, quai Anatole-France
Paris

Centre national de la recherche scientifique
Laboratoire d'énergétique solaire
B.P. 5
66120 Odeillo-Font-Romeu

Ecole nationale supérieure des Arts et Métiers
151, boulevard de l'Hôpital
Paris (13e)

Laboratoire d'électronique et de physique
appliquée
3, avenue Descartes
94 Limeil-Brévannes

Laboratoire de physique des solides
1, place Aristide-Briand
92190 Meudon-Bellevue

Grèce

Conseil national de l'énergie
Athènes

Commission de l'énergie atomique
Athènes

Laboratoire de physique
Université de Patras
Patras

Inde

Central Salt and Marine Chemicals Research
Institute
Gyubhai Badheka Marg
Bhavnagar 364 002

Birla Institute of Technology and Science
Pirani
Rajasthan

Mali

Laboratoire de l'énergie solaire du Mali
B.P. 134
Bamako

Niger

Office de l'énergie solaire
B.P. 621
Niamey

Pays Bas

Institut de physique appliquée
1 Stieltjesweg
Delft

Stichting FOOT
P.O. Box 525
Eindhoven

Université de technologie
Delft

Serie "Mise au point et transfert des techniques"

- *N° 1 Systèmes nationaux d'acquisition des techniques (ID 187)
- N° 2 UNIDO Abstracts on Technology Transfer (ID 189)
- *N° 3 Fabrication de véhicules bon marché dans les pays en développement (ID 193)
- N° 4 Manuel sur l'instrumentation et le contrôle de la qualité dans l'industrie textile (ID 200)

En Europe, en Amérique du Nord et au Japon, toutes les publications citées ci-dessus peuvent être obtenues gratuitement à l'exception de celles qui sont marquées d'un astérisque et qui sont mises en vente, séparément, dans ces régions, au prix indiqué. Dans les autres régions, toutes les publications, sans exception, peuvent être obtenues gratuitement.

Pour obtenir des numéros gratuits, il suffit d'adresser une demande au Rédacteur en chef du *Bulletin d'information*, boîte postale 300, A-1400 Vienne (Autriche), en indiquant le titre et la cote du ou des documents souhaités.

Il est possible de commander les numéros mis en vente, en indiquant le titre et le numéro de vente, aux vendeurs autorisés des publications des Nations Unies ou à l'un des services suivants :

Pour l'Europe
Section des ventes
Office des Nations Unies
CH-1211 Genève 10
(Suisse)

Pour l'Amérique du Nord et le Japon
Section des ventes
Nations Unies
New York, New York 10017
(Etats-Unis d'Amérique)



C - 537



81.07.13