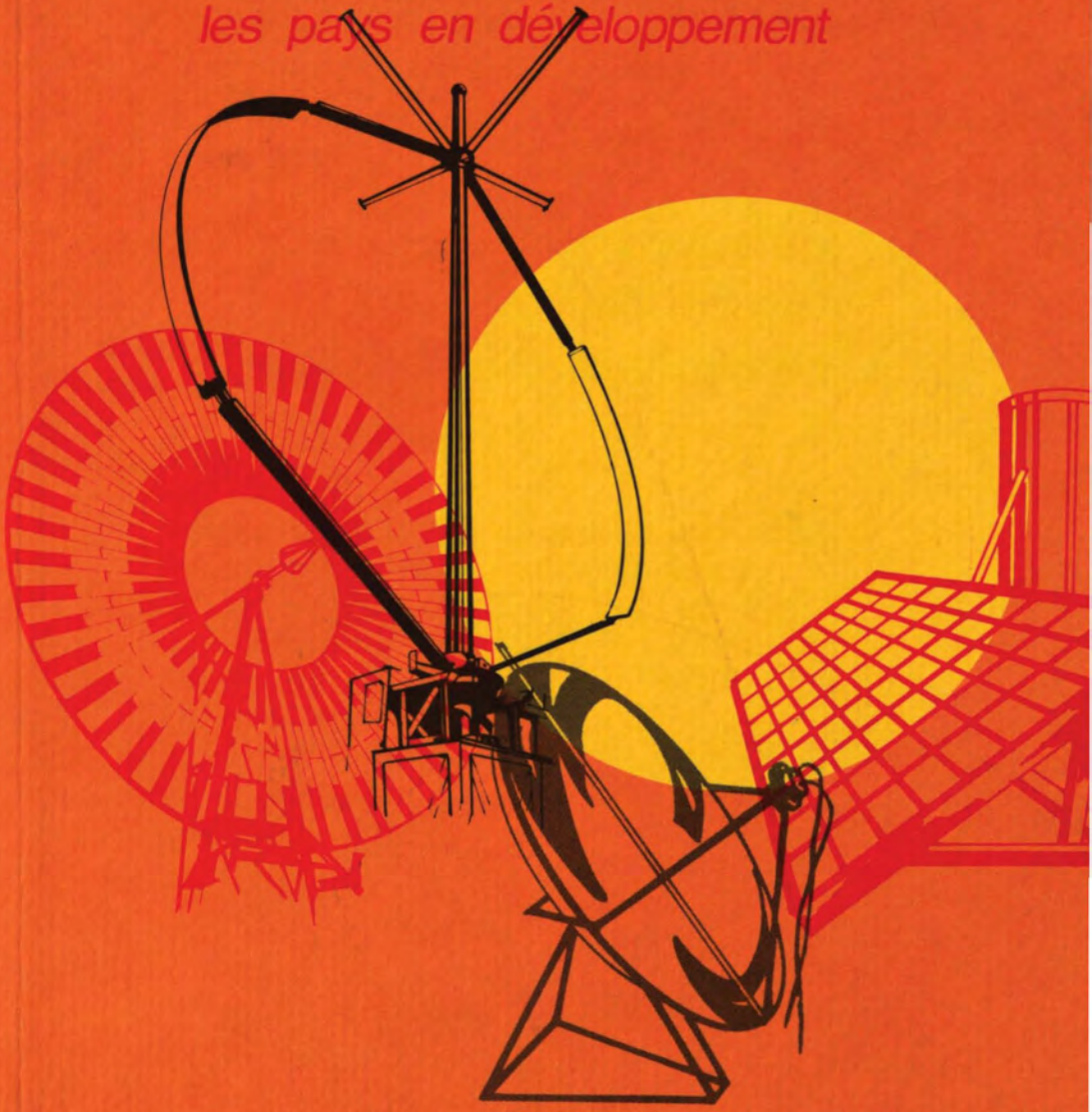
L'ENERGIE ET LE DEVELOPPEMENT RURAL

Ressources renouvelables et options techniques pour les pays en développement



NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES

Digitized by Google

Digitized by Google

L'ENERGIE ET LE DEVELOPPEMENT RURAL

Ressources renouvelables et options techniques pour les pays en développement

Rapport d'un groupe de travail ad hoc du Comité consultatif sur les innovations techniques
Conseil de la science et de la technologie pour le développement international
Commission des relations internationales

NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES
Washington, D.C. 1977

Le présent rapport, publié pour la première fois en 1976, a été rédigé par le Groupe de travail sur les ressources énergétiques renouvelables du Comité consultatif sur les innovations techniques du Conseil de la science et de la technologie pour le développement international, Commission des relations internationales, Académie nationale des sciences–Conseil national de la recherche, pour le compte de l'Office de la Science et de la technologie, Bureau de l'assistance technique, Agence pour le développement international, Washington, D.C. aux termes du Contrat No. AID/cds-2584, Task Order No. 1. La version française a été rédigée en vertu du Contrat AID/csd-2584, Task Order No. 22, passé avec la Division des opérations régionales, Bureau des affaires pour l'Afrique, Agence pour le développement international.

NOTE : Le projet examiné dans le présent rapport a été approuvé par le Conseil d'administration du Conseil national de la recherche, dont les membres appartiennent aux Conseils de l'Académie nationale des sciences, de l'Académie nationale de l'ingénierie et de l'Institut de médecine. Les différents membres du Comité chargé de la rédaction ont été choisis de manière à ce que leurs compétences particulières donnent au texte l'équilibre qui lui est nécessaire.

Le présent rapport a été examiné par un groupe comprenant des personnes autres que les auteurs, selon des dispositions approuvées par le Comité d'examen des rapports, lui-même composé de membres de l'Académie nationale des sciences, de l'Académie nationale de l'ingénierie et de l'Institut de médecine.

GROUPE DE TRAVAIL SUR LES RESSOURCES ENERGETIQUES RENOUVELABLES

WILLIAM L. HUGHES, Head, School of Electrical Engineering, Oklahoma State University, Stillwater, Oklahoma 74075, USA, *Chairman*

CLANTON C. BLACK, JR., Chairman, Department of Botany, University of Georgia, Athens, Georgia 30601, USA

JAMES A. CRUTCHFIELD, JR., Department of Economics, University of Washington, Seattle, Washington 98105, USA

JESSE C. DENTON, Dean, School of Energy, American Technological University, Killeen, Texas 76541, USA

JOHN A. DUFFIE, Director, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, Wisconsin 53706, USA

JOSEPH J. ERMENC, Thayer School of Engineering, Dartmouth College, Hanover, New Hampshire 30755, USA

THOMAS A. LAWAND, Director of Field Operations, Brace Research Institute, MacDonald College, McGill University, Ste. Anne de Bellevue, Québec, Canada

GEORGE O.G. LÖF, Solar Energy Applications Laboratory, Engineering Research Center, Colorado State University, Denver, Colorado 80521, USA

DALE N. MOSS, Department of Agronomy and Plant Genetics, University of Minnesota, St. Paul, Minnesota 55101, USA

ROBERT W. REX, President, Republic Geothermal, Inc., 11848 E. Washington Boulevard, Whittier, California 90606, USA

GEOFFREY R. ROBSON, Chief, Minerals Section, Energy and Mineral Development Branch, Center for Natural Resources, Energy and Transport, United Nations, New York 10017, USA

DANIEL I-c. WANG, Department of Nutrition and Food Science, Massachusetts, Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts 02139, USA

JEROME M. WEINGART, International Institute for Applied Systems Analysis, 2361 Laxenburg, Austria

NORMAN L. BROWN, Board on Science and Technology for International Development, Commission on International Relations, National Academy of Sciences–National Research Council, 2101 Constitution Avenue, Washington, D.C. 20418, USA, *Staff Study Director*

JULIEN ENGEL, Board on Science and Technology for International Development Commission on International Relations, National Academy of Sciences–National Research Council, *Head, Special Studies*

Préface

Il y a cinq ans, le Conseil de la science et de la technologie pour le développement international du Conseil national de la recherche a créé le Comité consultatif sur les innovations techniques (Advisory Committee on Technology Innovation—ACTI) et lui a assigné trois grandes tâches :

- étudier les techniques utilisées dans les pays industrialisés ;
- examiner des techniques existantes mais inexploitées ; et
- déterminer les techniques susceptibles d'être appliquées avec succès dans les pays en développement.

L'ACTI avait en outre pour mission d'orienter la recherche, d'assurer la mise au point de ces techniques et d'encourager toute nouvelle approche nécessaire à leur adaptation.

Conformément à ces objectifs, l'ACTI entreprit une étude des sources de production d'énergie électrique à faible puissance pour les pays en développement. A l'origine, il s'était proposé d'étudier essentiellement celles qui pourraient fournir une puissance de l'ordre de 100 watts, destinée surtout, mais non uniquement, à de petits dispositifs de communication (et notamment à des récepteurs de télévision dans les villages). Une première technique, entreprise en 1973, avait eu pour but d'évaluer la disponibilité et le coût des dispositifs appropriés. Elle reconnaissait les applications possibles des engins solaires et des génératrices éoliennes, mais supposait aussi que la plupart des régions rurales des pays en développement disposeraient en permanence continue de combustibles fossiles (tel que le kérosène). Cette

hypothèse justifiait l'importance accordée aux aspects économiques et mécaniques de petits moteurs à combustion interne peu coûteux.

On s'aperçut pourtant rapidement que le combustible destiné aux systèmes énergétiques conventionnels devenait de plus en plus coûteux et, dans bien des cas, de plus en plus rare. C'est pourquoi (et à la demande de l'Agence pour le développement international) l'ACTI décida d'élargir le champ de son étude et d'étudier d'autres sources d'énergie susceptibles d'être exploitées à peu de frais par les pays en développement. Un groupe de travail fut chargé d'examiner les techniques applicables au niveau du village ou au niveau rural, c'est-à-dire les techniques génératrices de puissances situées entre 10 et un maximum de 100 kW. Le présent rapport est issu de cet examen. Chaque technique devrait être analysée sous l'angle de sa disponibilité actuelle ou à court terme (c'est-à-dire dans les cinq ans), de même qu'à moyen terme (cinq à dix ans). Le groupe de travail fut également chargé de proposer des activités précises dans le domaine des recherches et des réalisations qui pourraient être entreprises à moyen terme dans les régions où les projets avaient des chances sérieuses d'être réalisés.

Compte tenu de l'exclusion de l'énergie nucléaire, les techniques étudiées par le groupe de travail peuvent être classées en deux catégories : les emplois directs et les emplois indirects de l'énergie solaire. Les premiers comprennent les appareils de cuisson, les dispositifs permettant d'obtenir de l'eau potable par distillation, la climatisation des édifices, la réfrigération, le chauffage de l'eau, le séchage des récoltes, la production de sel et les applications photovoltaïques. Les emplois indirects comprennent la photosynthèse, la conversion microbienne des végétaux en combustible, les machines éoliennes et hydrauliques. Enfin, le groupe a aussi examiné l'énergie géothermique et le problème général du stockage de l'énergie, qui n'entrent dans aucune des grandes catégories précédentes. Au début, les membres du groupe de travail se demandèrent s'il fallait inclure dans cette étude les sources géothermiques en raison de l'ordre de grandeur des puissances produites (mégawatts) et des coûts de prospection et d'exploitation. Toutefois, le groupe estima que dans certaines circonstances particulières les puits géothermiques pouvaient constituer des sources d'énergie commodes pour certaines régions rurales de pays en développement. Les avantages dont pouvaient bénéficier les régions où la technique est applicable furent considérés suffisants pour en justifier l'inclusion.

Afin qu'il puisse servir le plus possible à deux publics différents, le rapport a été divisé en deux sections. La première contient une série de résumés non techniques décrivant chaque méthode et exposant les grandes lignes des applications possibles. Cette section est destinée aux législateurs et aux planificateurs qui doivent évaluer les propositions techniques en fonction des besoins et des contraintes dominantes. La deuxième–la section technique–est

destinée aux spécialistes qui connaissent déjà sans doute les principes de base de certaines techniques, mais n'ont connaissance ni des problèmes locaux, ni des progrès récents, ni des sources d'informations auxquelles ils pourraient s'adresser.

Dans le rapport, les techniques mises au point au cours des cinq prochaines années sont dites "actuelles" ou "à très court terme". Elles englobent des matériels qui sont déjà sur le marché ou qui ont dépassé les stades de la mise au point et des essais, et dont la commercialisation est normalement attendue dans les cinq années à venir. Les techniques susceptibles d'être appliquées d'ici cinq à dix ans sont appelées techniques "intermédiaires" ou "à exploitation future". Pour celles-ci, les matériels ont à peine dépassé l'étape des essais et sont utilisés comme prototypes sans avoir cependant atteint le stade précédant immédiatement leur fabrication commerciale.

Le groupe de travail reconnaît que le présent rapport n'est qu'un premier pas vers l'adoption des techniques examinées et que leur application au développement rural exigera de nombreux efforts de caractère individuel. C'est pourquoi les membres du groupe ont accepté de répondre personnellement—et dans des délais raisonnables imposées par le temps et la géographie—aux questions qui pourraient se poser et auquelles les sources d'information énumérées dans le rapport ne pourraient fournir de réponse. On pourra obtenir une assistance du même genre, surtout en ce qui concerne les aspects pratiques de la construction et du fonctionnement, en s'adressant à d'autres sources telles que VITA* (Volunteers in Technical Assistance), organisme qui possède une longue expérience des applications pratiques de la technologie.

*Pour toute question s'adresser à : VITA, 3706 Rhode Island Avenue, Mt. Rainier, Maryland 20822, USA.

LISTE DES SYMBOLES

a	acre
A/h	ampère-heure
Btu	unité thermique britannique
bu	boisseau
°C	degré celsius
c.a.	courant alternatif
c.c.	courant continu
cm	centimètre
°F	degré fahrenheit
ft	pied (foot)
g	gramme
gal	gallon (E.U.)
Gcal	gigacalorie
ha	hectare
hl	hectolitre
HP	cheval anglais (746 W)
h	heure
Hz	Hertz
in.	pouce (inch)
kcal	kilocalorie
km	kilomètre
kW	kilowatt
kWe	kilowatt (puissance électrique)
kWh	kilowatt heure
l	litre
lb	livre (pound)
m	mètre
μm	micron (1×10^{-6} m)
mA	milliampère
mi	mile (1609 m)
MHz	mégahertz
mph	milles à l'heure
m/sec	mètre-seconde
MW	mégawatt
mV	millivolt
Ω-cm	ohm-centimètre
psig	pression manométrique en livres par pouce carré (*p.s.i.*)
W	watt
Wh	watt-heure
Whe	watt-heure (puissance électrique)

Remerciements

Nous tenons ici à rendre hommage aux efforts des membres du groupe directeur qui a initialement recommandé l'exécution de cette étude et qui en a suggéré la forme. Outre Jesse C. Denton et Clanton C. Black, Jr., qui ont également fait partie du groupe de travail, il comprenait Charles A. Rosen (président), Irma M. Adelman, Charles A. Berg, Lloyd O. Herwig et Thomas F. Malone. Leurs suggestions ont été extrêmement utiles aux membres du groupe.

Il nous faut également remercier Kudret Selçuk, Marshal F. Merriam, William T. Beale, W. P. Teagen et Sohrab K. Ghandhi pour leur contribution aux sections relatives au séchage des récoltes, à l'énergie éolienne, aux moteurs Stirling, aux moteurs Rankine et aux applications photovoltaïques respectivement. Notre plus profonde gratitude va à Warren Kornberg pour son travail de rédaction et à F. R. Ruskin qui a préparé avec un soin tout particulier le manuscrit destiné à la publication. La version française a été assurée par Transemantics, Inc., Washington, D.C.

Enfin, je désire remercier tout spécialement de leurs efforts, les membres du groupe de travail et Norman L. Brown, Directeur des projets à l'Académie nationale des sciences. Les membres du groupe de travail ont travaillé infatigablement pour atteindre leurs objectifs ; M. Brown a de surcroît consacré de nombreuses heures à la rédaction du rapport et à assurer la liaison entre les groupes de spécialistes de chacune des techniques examinées. La cohérence du rapport est sans aucun doute due à ses efforts incessants et à sa ténacité.

WILLIAM L. HUGHES,
Président du Groupe de travail sur les
ressources énergétiques renouvelables

Introduction

Lorsqu'il lutte contre les caprices de la nature, l'homme ne se contente pas d'utiliser l'énergie pour entretenir la vie. Dans *The Economic History of World Population*, Cipolla a dit que plus l'homme parvient à exploiter sa propre production énergétique pour contrôler et employer d'autres formes d'énergie, "plus il parvient à maîtriser son milieu ambiant et à atteindre des objectifs autres que ceux qui sont strictement liés à l'existence animale". Il ajoute, ce qui va sans dire mais mérite d'être dit et redit, que le problème fondamental de l'utilisation de l'énergie non musculaire est celui de sa transformation en une forme qui soit disponible "à un moment et en un lieu choisis, et à un prix abordable"[1].

Tel est le sujet de ce rapport. Ce n'est pas la première étude du genre. En effet, des groupes et des individus compétents en ont déjà effectué des analyses qui ont permis aux membres du groupe de travail de se faire une première opinion[2]. Cependant, à la différence d'un grand nombre de textes, le présent rapport porte sur les techniques énergétiques de petite envergure qui ne dépendent pas de combustibles conventionnels et sont utilisables en milieu rural dans les pays en développement. Il examine aussi les différentes contraintes techniques et économiques, présentes et futures, qui peuvent influer sur leur application. En acceptant sa mission, le groupe de travail a reconnu dès le départ que la nature de sa tâche (signalée par les termes clés "ressources renouvelables", "techniques de petite envergure" et "milieu rural") l'obligeait à n'étudier que les techniques capables d'avoir une incidence directe sur la situation énergétique d'un pays. Plus exactement, celles-ci devraient contribuer à l'amélioration de la qualité de la vie des ruraux et des villageois, là où les combustibles actuels et l'électricité n'ont pas encore pénétré ou sont encore trop onéreux pour jouer un rôle important dans un avenir prévisible.

Indirectement toutefois, le bilan énergétique de quelques pays s'améliorera sans doute à mesure que l'adoption de ces petites techniques se généralisera (ne serait-ce que pour empêcher ces pays de dépendre de plus en plus de la production d'énergie sous la forme traditionnelle.)

Le rapport fait le point des différentes techniques ("appropriées" ou "générales") fréquemment suggérées comme solutions aux besoins en énergie des régions rurales, de l'individu ou de la famille. De plus, il signale à l'ingénieur et au planificateur des sources d'informations plus détaillées, de même que le genre de recherches et de mises au point nécessaires pour qu'un dispositif ou un processus particulier puisse être utilisé. En conséquence, ce rapport devrait être très utile pour évaluer le potentiel d'une source d'énergie donnée dans une situation donnée. Tel est en effet le but premier de l'étude. Cette dernière n'est pas et ne saurait être un mode d'emploi détaillé, car il ne s'agirait plus alors d'un volume mais d'une bibliothèque.

REFERENCES

1. Cipolla, Carlo M. 1962. Sources of energy. Conversion of energy. In *The Economic history of world population*, pp. 35-36. Baltimore, Maryland: Penguin Books.
2. Voir par exemple :

General Electric Co. March 1963. *Small-scale power supplies for rural communities in developing countries: Report to U.S. Agency for International Development*. Syracuse, New York: General Electric Co.

Johnson, A. L. 1974. Non-conventional sources of energy for developing countries. Paper prepared for the United Nations Advisory Committee on the Application of Science and Technology to Development. U.N. Document No. E/AC.52/XX/CRP.T/Annex. New York: United Nations.

United Nations. Economic and Social Affairs. 1967. *Small-scale power generation. A study for pioneer electrification work.* U.N. Document No. ST/ECA/94. New York: United Nations.

Little, Arthur D., Inc. 1974. *An overview of alternative energy sources for LDCs.* Report to U.S. Agency for International Development, Technical Assistance Bureau, Office of Science and Technology. Cambridge, Mass.: Arthur D. Little, Inc.

Parmi les études plus spécialisées figurent :

Golding, E. W. n.d. *Windmills for water lifting and generation of electricity on the farm*. Agricultural Engineering Branch, Land and Water Development Division, Informal Working Bulletin No. 17. Rome: Food and Agriculture Organization.

Heronemeus, W. E. 1974. *A survey of the possible uses of windpower in Thailand and the Philippines*. Prepared for the U.S. Agency for International Development, Office of Science and Technology. Amherst, Mass.: University of Massachusetts, Department of Civil Engineering.

Lustig, H. 15 February 1974. *Solar energy: The state of the art and the art of the states*. UNESCO Document No. SC/WS/575. Paris: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.

On trouve dans le *Courrier de l'UNESCO* (janvier 1974) un recueil intéressant d'articles non techniques qui dressent l'inventaire des appareils à énergie solaire et de leurs applications possibles dans les pays en développement.

La technologie énergétique et le développement économique – Tour d'horizon

Le rapport entre l'énergie et le développement économique est tout aussi crucial dans les pays en voie de développement qu'il ne l'était et continue de l'être dans les pays industrialisés. Le processus de la croissance économique a pris naissance au moment où la machine a remplacé l'homme pour les travaux agricoles, industriels et domestiques. De plus, bon nombre de pesticides, d'herbicides et d'engrais, dont dépend normalement une bonne agriculture dans les pays industrialisés, tirent aussi leur origine de combustibles fossiles. Il n'est donc guère surprenant que les perspectives de croissance des principaux secteurs des économies en voie de développement soient liés, en partie du moins, à l'exploitation des ressources énergétiques dont elles disposent.

Aucun de ceux qui connaissent les problèmes de l'accélération du développement économique ne se fait d'illusion quant à la lenteur avec laquelle les innovations naissent et finissent par être économiquement viables. Pour apprendre à utiliser l'énergie sous des formes nouvelles et de manières différentes, il faut dans certains cas consacrer de nombreuses années–peut-être même une génération ou plus–à surmonter les obstacles économiques, culturels, sociaux et institutionnels qui entravent le progrès technique dans les pays en développement. Toutefois, bien qu'il faille exploiter sur une échelle réduite et à des prix raisonnables des sources d'énergie diversifiées, adaptables à une vaste gamme de besoins et de milieux physiques et sociaux, cela ne suffit pas à garantir l'accélération du progrès économique.

Les décisions les plus profitables sont souvent axées sur l'économique de l'offre et de la demande d'énergie dans les pays en développement. Comme

dans n'importe quel pays, l'évaluation de la rentabilité économique doit commencer par une étude exhaustive des capacités techniques présentes et futures, ainsi que des ressources humaines et matérielles qui permettront de les exploiter. La section technique du rapport dresse le bilan de l'état actuel d'un certain nombre de techniques énergétiques, innovatrices ou conventionnelles, accompagné en général d'une évaluation de leur adaptabilité aux différents contextes des économies sous-développées.

Deux autres mesures doivent cependant être prises avant de formuler une politique de recherches pertinentes et d'élaborer des programmes à plus long terme pour l'exploitation de techniques énergétiques. En premier lieu, il est essentiel de les lier à d'autres éléments de l'offre de facteurs dans les pays intéressés (voir l'analyse de la deuxième proposition dans le chapitre Conclusions et propositions). L'analyse de l'économique du développement d'une des techniques ne peut en soi donner toutes les informations nécessaires, pas plus d'ailleurs que la construction d'un seul des dispositifs discutés dans le rapport n'apportera de données suffisantes pour évaluer les programmes d'énergie. Le recours à une seule des deux propositions précédentes sous-estimerait l'interdépendance des nouveaux types de production d'énergie et des autres composantes de l'économie qui doivent être prises en considération, en particulier les ressources naturelles et les faibles réserves de capital et de main-d'oeuvre qualifiée. De plus, la quantité de devises disponibles ou potentiellement disponibles—fondée sur de nombreuses et complexes fonctions économiques et politiques—doit être soigneusement evaluée. Les disponibilités en devises seront particulièrement importantes puisque les prix fictifs affectés aux importations dans les pays qui imposent de sévères restrictions de change sont d'ordinaire nettement supérieurs aux prix nominaux et, à moins de n'envisager que le développement le plus rudimentaire de l'énergie, la dépendance à l'égard de sources étrangères pour le matériel et la technologie entrera presque toujours en ligne de compte.

En second lieu, les coûts liés à la dissémination des nouvelles techniques et aux conseils à suivre pas à pas pour les appliquer sont, bien que moins évidents, souvent d'une importance cruciale. Tout en évitant de confondre analphabétisme et incompétence, il faut être conscient des formidables obstacles qui empêchent la dissémination d'une nouvelle technique dans les sociétés rurales traditionnelles, axées comme elles le sont souvent sur une activité de subsistance ou de semi-subsistance, et imparfaitement liées à des marchés et des centres culturels peu ou mal organisés. Dans ce contexte, les coûts de l'information peuvent souvent paraître plus importants que les coûts plus directement liés au développement et à l'application de la technologie.

A l'exception de certaines méthodes—comme, par exemple, les petites éoliennes et les petites roues à eau de fabrication locale, les séchoirs solaires, les presses hydrauliques—dont les capacités génératrices sont parmi les plus

faibles de l'échelle considérée, les perspectives à court terme (1 à 5 ans) de l'utilisation effective des sources d'énergie examinées dans le présent rapport ne sont pas encourageantes. Bien que les calculs nécessaires n'aient pas encore été effectués, une évaluation économique des dimensions indiquées ci-dessus donnera vraisemblablement une image encore plus décourageante. En bref, les pays en développement, à l'image du reste du monde, semblent condamnés à devoir lutter constamment contre des prix relatifs de plus en plus élevés pour l'énergie provenant de sources conventionnelles. La "crise énergétique" continuera d'être essentiellement une crise de combustibles fossiles (en particulier, une crise de pétrole). Cette conclusion ne devrait pas surprendre ; même dans les pays industrialisés, où la capacité de recherche et de réalisation, le stock de capital, la main-d'oeuvre qualifiée et l'aptitude à prendre des risques sont infiniment plus considérables, une ou deux décennies au moins devront s'écouler avant qu'une des sources d'énergie "non conventionnelles", considérées de nos jours comme prometteuses, ne joue un rôle important dans le domaine de l'offre d'énergie. Même lorsque une technique énergétique particulière promet, les perspectives à court terme pour les pays en développement sont médiocres. En effet, les sources prometteuses ne correspondent pas exactement aux besoins des consommateurs d'énergie dans les pays en développement. Une fois encore, cette conclusion ne doit pas surprendre puisque les perspectives les plus favorables sur le plan de l'offre correspondront vraisemblablement au schéma de la demande d'énergie dans les pays industrialisés où se font les recherches. Ce schéma est très différent de l'usage ou des besoins en énergie des pays en développement. Bien qu'il ne faille généraliser qu'avec prudence lorsqu'on examine ces différents besoins, il est pratiquement certain que la majeure partie de la demande d'énergie dans les pays en développement est imputable aux transports et à toute une gamme d'activités liées à la production alimentaire.

Comme l'a constaté un récent rapport*, l'examen de la demande d'énergie dans le domaine agricole révèle un degré d'utilisation nette beaucoup plus élevé et une corrélation beaucoup plus étroite que prévue entre l'exploitation de l'énergie et la productivité. La production phénoménale de l'agriculture aux Etats-Unis et dans d'autres grands pays exportateurs d'aliments s'explique en grande partie par une utilisation massive d'énergie et d'engrais, l'apport de main-d'oeuvre par unité de production diminuant très rapidement à mesure que s'intensifient les pressions exercées par l'accroissement des salaires dans les industries secondaires et tertiaires.

Puisque l'expansion agricole dans les pays en développement se fera vraisemblablement dans des environnements extrêmement défavorables à l'agri-

*Pimentel, David, *et al.* 1973. Food production and the energy crisis. *Science* 182: 443-449.

culture–forêts tropicales, savanes mal ou rarement irriguées, terres désertiques–les apports d'énergie requis pour obtenir une augmentation de la production alimentaire capable de satisfaire les besoins ruraux et l'accroissement continuel de la population rurale seront encore plus importants qu'ils ne l'étaient dans les plaines fertiles et tempérées.

Plus précisément, ces apports continueront de dépendre dans une large mesure du pétrole et de ses dérivés. Bien que le monde dans son ensemble doive trouver dans un avenir assez proche des succédanés aux engrais dérivés du pétrole, la demande de ces produits ira croisante pendant plusieurs décennies encore. En effet, restreindre le recours aux dérivés du pétrole pour des utilisations à faible rendement (tels que le chauffage de locaux) est une nécessité de plus en plus évidente, si l'on veut assurer la continuité de l'approvisionnement des industries pétro-chimiques. A l'heure actuelle, les pays industrialisés ont des difficultés à trouver des succédanés du pétrole ou à s'y convertir de manière à pouvoir atteindre cet objectif. Etant donné que les progrès techniques dans les pays en développement, à quelques rares exceptions près, sont le résultat d'une adaptation des progrès réalisés ailleurs, il ne faut pas s'attendre à ce que ces pays avancent plus rapidement. Le coût élevé du capital et l'incapacité inhérente de ces pays, tant pour des raisons politiques qu'économiques, de prendre de gros risques en matière de développement limitent sérieusement la possibilité qu'ont ces pays (dont certains sont acculés à la famine) d'expérimenter de nouvelles sources d'énergie.

Les transports et les télécommunications, par exemple, sont les clés mêmes d'une meilleure organisation des marchés, d'une division du travail plus efficace et d'un accès plus libre aux ressources naturelles. Pour "acheter" ces services, un pays doit investir dans les sources d'énergie. Toutefois, aucune des sources d'énergie étudiée dans le présent rapport (aucune en tout cas que l'on puisse envisager dans un avenir proche, compte tenu des contraintes qui accompagnent presque toujours une carence quelconque) ne contribuera vraisemblablement de façon notable aux transports du type et de la qualité requis pour transformer une structure économique.

En bref, la principale contribution de l'énergie à la croissance économique dans les pays en développement est liée aux domaines qui requièrent des types conventionnels d'énergie et il en sera probablement ainsi pendant plusieurs décennies au moins, aucune amélioration de l'offre n'étant en vue. On ne peut raisonnablement s'attendre que les pays en développement qui possèdent des réserves exportables de combustibles fossiles les partagent philanthropiquement avec leur voisins moins bien nantis.

Les techniques énergétiques les plus prometteuses qui sont étudiées dans le présent rapport concernent la transformation de l'énergie éolienne et hydraulique en électricité ainsi que l'utilisation de l'énergie solaire pour le chauffage et peut-être même le froid. Dans la mesure où ces techniques relèvent du

domaine du confort—éclairage, radio, télévision, chauffage des locaux, froid—elles ne contribueront pas substantiellement ou immédiatement à l'amélioration de la productivité économique nationale. A moins qu'une innovation n'améliore la productivité agricole, n'achemine plus efficacement les cultures de rapport vers les marchés ou ne réduise les coûts des biens de consommation manufacturés, il est peu probable qu'elle ait un effet significatif sur le potentiel général de croissance d'une économie qui émerge de la semi-subsistance.

Toutefois, certaines applications technologiques peuvent contribuer à cette croissance économique générale. Par exemple, l'amélioration des communications—grâce à la production de modestes quantités d'électricité—peut permettre la dissémination de données essentielles sur des problèmes agricoles, la santé publique, la nutrition et la planification familiale. Les séchoirs solaires peuvent améliorer sensiblement le stockage des récoltes, accroissant à la fois la quantité et la qualité en fin de la période de stockage. L'emploi d'excréments animaux comme combustible remplaçant le bois à brûler qui se fait de plus en plus rare dans de nombreux pays en développement a sérieusement affecté la rendement agricole, car on ne s'en sert plus alors comme engrais*. Une des manières d'aborder ce problème—fournir un combustible tout en préservant le potentiel fertilisant—sera étudiée dans un autre rapport**. Un arsenal de ces petites améliorations, qui atténuerait les pressions exercées sur d'autres sources d'énergie influant directement sur la productivité, pourrait avoir un effet cumulatif à long terme sur une économie nationale et mérite sérieusement d'être considéré.

Il importe cependant de préciser que les sources d'énergie économiquement importantes sont en général fortement capitalistiques du fait même de la structure du développement des pays industrialisés, que la plupart des pays en voie de développement, semble-t-il, ont été persuadés d'imiter. C'est là le principal obstacle aux méthodes non-conventionnelles d'utilisation des das techniques énergétiques dans ces pays. En conséquence, lorsque les capitaux et les capacités nécessaires pour les employer avantageusement sont rares, les gouvernements se borneront vraisemblablement à limiter leurs principaux investissements en énergie à des projets de grande envergure qui promettent d'apporter une contribution importante à la productivité économique d'une

*La pénurie sans cesse croissante de bois à brûler, qui atteint des proportions critiques dans bon nombre de pays, ne fait qu'aggraver le problème des combustibles dans les régions rurales. Ce problème est examiné dans une récente publication : *The Energy Crisis: Firewood*, par Erik P. Eckholm, Worldwatch Paper 1, Worldwatch Institute, Washington, D.C., septembre 1975.

***Methane Generation from Human, Animal, and Agricultural Wastes*. Voir p. 327.

région ou d'une nation. En évaluant le potentiel d'une approche à échelle réduite, selon une technique appropriée, le groupe de travail a toujours été pleinement conscient de cette réalité.

L'électricité, par exemple, n'aura pas d'influence très profonde sur les économies des pays en développement à moins d'être très bon marché, condition exigeant des travaux hydrauliques sur une échelle massive là où la topographie et l'approvisionnement en eau le permettent. Et pourtant, des projets relativement restreints utilisant l'eau soit comme force motrice directe soit comme source de courant électrique peuvent, même lorsqu'il n'existe aucune possibilité de développement à grande échelle, être économiquement rentables comme l'a fait ressortir la discussion sur l'énergie hydro-électrique. De petits barrages peuvent être construits avec la main-d'oeuvre locale et des matériaux locaux ; à quelques exceptions près, ces ouvrages ont une longue durée de vie et n'exigent qu'un entretien minimal, quelles que soient leurs dimensions.

Même ainsi, il est improbable que l'exploitation de l'énergie hydro-électrique évolue sensiblement dans les pays en développement au cours des cinq prochaines années. La plupart des emplois à échelle réduite sont connus depuis des siècles et, en dehors des avantages que l'on pourrait obtenir en introduisant ces anciennes techniques dans des régions où elles sont inemployées, le maximum auquel nous devons réellement nous attendre dans un avenir très proche sera un effort concerté pour accroître la fiabilité de ces techniques et en réduire le coût. Ces avantages ne sont pas à négliger, mais n'augmentent guère les chances de pouvoir remplacer les combustibles fossiles importés par de l'énergie hydro-électrique locale.

Le même commentaire vaut dans une large mesure pour l'utilisation de l'énergie éolienne. Le vent est plus facile à capter que l'eau. C'est pourquoi les pays en développement auraient peut-être grand avantage à utiliser le vent comme force motrice principale et comme source d'électricité en revenant aux petites unités qui se sont avérées si utiles il y quelques années encore dans les régions rurales de l'Europe et de l'Amérique. Recourir à la main-d'oeuvre locale et aux matériaux locaux pour la construction d'appareils éprouvés, dont le coût en capital et les coûts de fonctionnement sont relativement faibles, présente encore le même attrait dans les milieux ruraux. Dans les circonstances actuelles, l'énergie éolienne utilisée directement pour la production d'électricité à grande échelle ne semble cependant pas être plus rentable dans les pays en développement que dans les pays industrialisés. Cela est vrai non seulement à cause du problème du stockage, mais aussi du fait qu'un tel programme entraînerait des dépenses d'équipement et le recours à des techniques d'intégration et de transport d'énergie trop perfectionnées et trop coûteuses pour les pays en développement.

L'étude des emplois directs de l'énergie solaire semble indiquer une fois encore que les avantages à court terme se limitent sans doute à ceux que l'on

peut obtenir par des améliorations marginales de processus déjà connus et depuis longtemps utilisés dans le monde entier. Malheureusement, la perspective de pouvoir assez aisément chauffer des locaux à un coût concurrentiel (et, pour un prix plus élevé, de les climatiser) intéresse nettement moins les pays en développement que les pays industrialisés. Après tout, il existe de nombreux facteurs de substitution bon marché pour le chauffage des locaux dans les pays en développement des zones tempérées et septentrionales (tels que la construction traditionnelle et la manière de s'habiller), alors que sous les tropiques cette application n'est manifestement pas très importante. L'emploi de l'énergie solaire pour le refroidissement pourrait être rentable, car les coûts des combustibles fossiles continuent d'augmenter dans les grandes villes et les installations touristiques. Toutefois, aux coûts envisagés, il n'influera certainement pas sur la vie des pauvres en milieu rural (qui dans certaines régions du Tiers Monde, représente 90 pour cent de la population).

Malgré la présence généralisée de formations géothermiques prometteuses, le coût de la prospection et de la mise en valeur demeure extraordinairement élevé, sauf pour les unités qui sont trop grandes pour pouvoir s'adopter à une économie de village. Il est improbable que même le meilleur de ces gisements puisse offrir de grandes quantités d'énergie électrique à des coûts comparables à ceux des principaux sites hydro-électriques. Cette conclusion serait peut-être différente si l'exploitation des ressources géothermiques pouvait être combinée avec la prospection pétrolière ou la production d'eau douce destinée à la consommation ou à l'irrigation.

L'élimination des principaux obstacles écologiques qui s'opposent au développement de l'énergie géothermique dans les pays industrialisés—en particulier le problème des eaux résiduaires fortement polluées—est dans l'immédiat peut-être moins urgente dans certains pays en développement. Toutefois, même si l'ampleur de l'opération était suffisante pour réduire la charge unitaire des coûts élevés de prospection et de développement, l'énergie géothermique ne pourrait être utile que pour l'approvisionnement des grandes villes ou des entreprises industrielles qui ont besoin d'une grande quantité d'énergie électrique à bon marché. Sur une telle échelle, l'évacuation des eaux résiduaires polluées pourrait devenir un sérieux problème.

Il est difficile d'évaluer en termes économiques l'importance du potentiel énergétique que recèle la photosynthèse dans les pays en développement. Dans ce domaine, le but initial de l'étude entreprise par le groupe était de se concentrer sur la production des matériaux de combustion. En conséquence, le groupe ne comprenait pas de spécialiste possédant les compétences nécessaires pour discuter des problèmes d'ingénierie que soulèvent les techniques d'exploitation telles que la distillation destructrice du bois.

Les questions économiques posées par l'utilisation de matières végétales aux fins de la combustion n'ont malheureusement pas pu être traitées dans le rapport, à l'exception de la production microbiologique de combustibles.

Néanmoins, il convient de signaler qu'il existe dans le monde certains endroits où l'on pourrait cultiver de grandes quantités de combustibles ou de matériaux convertibles qui ne concurrenceraient pas directement ou indirectement la production alimentaire indispensable. Il est évident qu'il y a concurrence directe avec la production alimentaire pour l'utilisation des terres. De plus, si la production de matériaux en quantités suffisamment importantes pour être rentables comme sources d'énergie requiert de grandes quantités d'engrais, il y aura peu de chances de pouvoir recourir à cette solution, étant donné la situation mondiale actuelle de l'alimention et de la production d'engrais.

La technique de l'utilisation soulève une autre question : dans quelles circonstances vaudrait-il vraiment la peine de convertir la bio-masse végétale en une énergie dérivée telle que l'électricité ou même en une source thermique primaire pour des activités manufacturières? Pourquoi ne pas l'utiliser tout simplement, ainsi que le bois et les fibres végétales l'ont été depuis des temps immémoriaux, comme combustible destiné aux communautés locales, aux petits consommateurs et aux ménages, puisque l'on sait qu'une très grande partie de la consommation ménagère de combustibles dans les pays en développement est destinée aux processus élémentaires que sont la cuisson, le fumage et le séchage? Cette question a été étudiée dans un récent rapport* qui indique les dimensions du problème de la pénurie de plus en plus grave de bois à brûler dans diverses parties d'Asie, d'Afrique, d'Amérique centrale et d'Amérique du Sud, pénurie qui est étroitement liée au déboisement considérable et à l'expansion des zones désertiques. Cette pénurie croissante montre que l'extension de l'arboriculture et la culture d'autres matières végétales destinées à être utilisées directment comme combustibles par les ménages présentent encore trop d'inconvénients. Il est donc peu probable que la méthode d'"exploitation énergétique" puisse contribuer autant au développement rural que les cultures destinées à être utilisées directement par les ménages.

Le chapitre sur la production d'électricité par procédé photovoltaïque décrit la technique employée dans ce domaine qui progresse rapidement et ouvre des perspectives d'avenir (mais non d'avenir à court terme) qui intéressent les pays en développement. Pour ces derniers, la perspective reste encore très éloignée. Mais une diminution spectaculaire des coûts d'équipement pour les procédés photovoltaïques permettrait sans aucun doute à ceux-ci de concurrencer les combustibles fossiles, sans pour autant soulever les problèmes que l'énergie nucléaire semble devoir créer d'ici quelques années. Des économies de fabrication sont certainement possibles; néanmoins, l'investissement dans la recherche et la mise au point de procédés photovoltaïques, qui serait suffisante pour mettre cette technique à portée des pays en déve-

*Eckholm, *op. cit.*

loppement (pour lesquels les coûts actuels des combustibles fossibles sont encore trop élevés), serait plus facile à justifier, si l'on parvenait à trouver aussi d'importants débouchés dans les pays industrialisés.

La science et la technologie ont depuis longtemps prouvé qu'elles parviennent souvent à devancer les prévisions. Dans le cas de la photovoltaïcité cependant, il est certain que le principal élan viendra des pays développés qui choisiront des objectifs et adopteront cette technique. Il se pose alors la question du rendement : le taux de rendement de l'adaptation aux besoins des pays en développement d'une technique encore en pleine évolution sera-t-il supérieur à celui du rendement obtenu éventuellement avec d'autres investissements en énergie? Si l'on en juge d'après cette comparaison, les perspectives à court terme de la production photovoltaïque dans les pays en développement ne sont pas favorables.

Cette étude de la possibilité technique de satisfaire les besoins en énergie des milieux ruraux en développement laisse supposer que l'importance relative des sources "conventionnelles" et "non conventionnelles" ne sera pas sensiblement modifiée au cours des dix à quinze prochaines années. De plus, il faudra attendre encore dix ou vingt ans avant que les changements techniques éventuels à la fin de cette période n'aient pas une incidence considérable sur l'économie des pays en développement, à moins qu'un effort concerté ne soit fait pour accélérer le processus du "compte-goutte" (mentionné ci-dessus). C'est pourquoi nous ne pouvons nous empêcher de conclure que l'exploitation plus efficace de toutes les sources d'énergie figurera pendant quelque temps encore parmi les toutes premières priorités.

Conclusions et propositions

Le rapport fournit des données sur les techniques nécessaires pour exploiter les ressources énergétiques renouvelables. Toutefois, de l'avis du groupe de travail, la portée en est bien plus considérable. Ce texte examine en effet les contraintes techniques et économiques qui donnent fort peu d'espoir de pouvoir adopter, sur une vaste échelle et dans un avenir assez proche, la plupart des techniques considérées. Dans le cadre de cette étude, le groupe est arrivé après un long travail à trois conclusions fondamentales et inéluctables :

1. Il existe un ensemble de sources et de techniques énergétiques qui peuvent effectivement remplacer les systèmes conventionnels.
2. A l'exception de quelques dispositifs (éoliennes de fabrication locale, séchoirs solaires), il n'existe aucune autre technique peu coûteuse et très rentable pour les pays tant industrialisés qu'en développement et il n'y en aura vraisemblablement pas dans un avenir proche.
3. Il ne suffit pas d'avoir à sa disposition une source d'énergie ; il faut aussi une technique qui puisse l'exploiter. Les avantages d'une quelconque des méthodes suggérées pour produire de l'énergie seraient bien plus considérables si l'on investissait un capital, même modeste, destiné a) à mettre au point les techniques propres à utiliser l'énergie et b) à assurer que la technique retenue est bien adaptée à l'économie et au genre de vie.

Compte tenu de ces éléments, le groupe de travail conclut que certaines mesures pourraient accélérer l'adoption de techniques qui rendront possible une exploitation efficace et économique de certaines ressources énergétiques

renouvelables, tout au moins dans les régions rurales du monde en développement. Puisque cette étude se présente essentiellement comme une évaluation technique de certains modes d'exploitation énergétique, le groupe ne présentera pas des recommandations définitives sur la question, mais se contentera plutôt de soumettre des propositions destinées à un examen plus approfondi.

Les activités ci-après sont proposées comme mesures visant à résoudre le problème a) de l'interdépendance de l'énergie et du développement économique et b) des conséquences qu'entraîne le rattachement du développement à des systèmes conventionnels axés sur une source énergétique centrale.

- Organisation de conférences-ateliers pour évaluer le rôle potentiel des systèmes énergétiques décentralisés dans les régions rurales des pays en développement ;
- Mise en oeuvre d'un programme pilote de développement axé sur l'énergie et destiné à aider les régions rurales à obtenir la technique énergétique nécessaire et les moyens de l'exploiter utilement ;
- Etablissement d'instituts régionaux de recherches et de réalisations, consacrés aux techniques d'exploitation des ressources énergétiques renouvelables.

CONFERENCES-ATELIERS

Une série de conférences-ateliers devrait tout d'abord être organisée en Asie, en Afrique et en Amérique latine pour examiner les avantages économiques et sociaux éventuels de la création et de l'adaptation de petites sources d'énergie décentralisées, qui utilisent des ressources énergétiques renouvelables et sont destinées aux collectivités rurales. Ces conférences-ateliers devraient accorder une importance toute particulière aux deux propositions qui suivent et ils devraient être structurés de manière à traiter des besoins propres à chaque pays (compte pleinement tenu des sensibilités propres à chaque milieu). Outre les fonctionnaires compétents et les représentants d'organismes de financement internationaux et privés, ils devraient inclure des représentants de milieux universitaires—en particulier des écoles d'ingénieurs—ainsi que d'autres responsables de l'exécution de projets sur le terrain, et notamment, lorsque cela est possible, des responsables de villages connus comme étant réceptifs aux idées nouvelles.

Les membres du groupe de travail savent que même si des rapports comme celui-ci peuvent intéresser ceux qui possèdent des intérêts techniques connexes et servir de sources pour d'autres études, ils ne sont généralement d'aucun avantage à ceux qu'ils sont censés aider, certainement pas à court

terme. En outre, ils ne sont malheureusement que trop conscients des échecs déjà subis à l'occasion de tentatives visant à introduire de nouvelles techniques d'énergie—telles que les fours solaires—dans les pays en développement. Si l'on veut une fois encore faire de sérieux efforts pour aider ces pays à acquérir des techniques propres à leur permettre d'exploiter leurs ressources en énergie, il convient de les entreprendre dès le début avec la participation de représentants compétents des collectivités appelées à en bénéficier.

De l'avis du groupe de travail, cette proposition est la plus important des trois et constitue une condition nécessaire à l'examen des deux autres, présentées ci-dessous.

PROGRAMME PILOTE DE DEVELOPPEMENT DES VILLAGES A ORIENTATION ENERGETIQUE

Une zone rurale bien définie (comme, par exemple, un village ou un groupe de villages) devrait être choisie et étudiée en tant qu'unité économique par une petite équipe de techniciens et d'économistes en développement rural. Le but de cette étude sur le terrain consisterait à identifier des méthodes—et à concevoir un plan approprié—compatibles avec les objectifs de développement du pays et permettant à la zone choisie d'adopter des systémes d'énergie adéquats et notamment d'importer certaines composantes essentielles qu'on ne peut trouver sur place. L'équipe y parviendrait en donnant à la collectivité des informations et une formation qui lui permettraient de mieux utiliser ses ressources humaines et naturelles, ou en fournissant des biens d'équipment si cela est utile.

Le groupe est en effet convaincu que, bien utilisées, de petites quantités d'énergie—peut-être même intermittentes—peuvent avoir une valeur cruciale pour une économie rurale. L'incapacité des pays en développement d'accroître en petites quantités leur énergie est un obstacle majeur au développement de nombreuses régions. Bien que la fourniture de ces quantités d'énergie ne soit pas une condition suffisante pour améliorer le bien-être économique et social, elle en est une condition nécessaire.[1] Son efficacité est, bien sûr, étroitement liée à d'autres changements économiques, sociaux et politiques qui doivent intervenir simultanément. Le groupe de travail estime que l'interdépendance de ces changements et de la source d'énergie est d'une importance telle que la fourniture de techniques énergétiques représente un "point d'entrée" singulièrement opportun pour un projet de développement rural.

L'effet cumulatif d'une utilisation efficace d'énergie en milieu rural, même en petites quantités, peut être considérable. La productivité agricole, la santé publique, les communications, les possibilités d'éducation—le tout

aboutissant peut-être à un ralentissement de l'exode rural–pourraient tirer parti d'appareils de faible puissance[2]. Par exemple, une puissance de 100 W pourra faire fonctionner une petite pompe et fournira, avec plus ou moins d'efficacité, de l'eau d'irrigation avec un débit d'environ 75 l/min à une profondeur de 6 m*. Cette même puissance pourrait aussi puiser de l'eau potable à une source dont l'exploitation était jusqu'alors malaisée ou permettre le traitement d'une source d'eau peu sûre. Le matériel de communication qu'elle pourrait facilement alimenter permettrait à une collectivité éloignée d'obtenir des services médicaux en cas d'urgence. En alimentant un récepteur de télévision de village comme cela s'est fait récemment encore en Inde (Projet SITE–Satellite Instructional Television Experiment), ces 100 W pourrait fournir des données essentielles sur l'agriculture, la santé, la nutrition et la planification familiale. Ils seraient certainement à même de répondre aux besoins d'éclairage d'un ménage ; à un village de 200 familles il ne faudrait que 20 kW par exemple pour fournir 100 W d'éclairage par famille.

Aucun des dispositifs capables de fournir de modestes quantités d'électricité–à l'exception éventuelle de la photovoltaïcité (cellules solaires)–et aucune des machines qu'il pourrait faire fonctionner ne doivent être considérées de nos jours comme faisant partie des techniques de pointe. Néanmoins, ils représentent un niveau technique normalement hors de la portée d'une collectivité qui ne fait que peu ou pas de commerce avec le monde extérieur et doit donc tout faire elle-même. La plupart des techniques énergétiques examinées dans le présent rapport (à l'exception des éoliennes de fabrication locale, des roues à eau, des séchoirs solaires et peut être même de la presse hydraulique) sont probablement inaccessibles à la majeure partie des collectivités rurales des pays en développement. Si elles sont hors de leur portée, ce n'est toutefois pas en raison d'un manque d'aptitudes dans le village, mais bien en raison de l'absence des capitaux requis pour acheter le matériel et les outils nécessaires. L'instruction fait peut-être défaut, mais non les compétences. L'absence d'une éducation ou d'une formation régulière a rarement fait obstacle à l'utilisation de techniques d'un niveau aussi rudimentaire, à condition que l'on puisse montrer à la collectivité comment s'en servir. En effet, le villageois ou l'agriculteur comprend d'ordinaire ces problèmes plus efficacement que la plupart des étrangers ne sont prêts à le croire.

Le génie mécanique rural n'est pas seulement une caractéristique occidentale ; de remarquables aptitudes techniques existaient déjà longtemps avant que la science occidentale ne se développe[3]. Mais si de bons moteurs électriques ont pu être assemblés par des ouvriers analphabètes dans des milieux

*Soit l'irrigation de l'équivalent d'un hectare avec environ 1 cm d'eau en 24 h. Pour une hauteur d'un mètre, cependant, un hectare de riz paddy pourrait être couvert d'eau jusqu'à une profondeur de deux centimètres en huit heures environ.

qui sont relativement primitifs pour un pays industrialisé, c'est uniquement parce que des composantes telles que des fils de cuivre, les lames d'acier au silicium, les pièces usinées, les roulements, etc. étaient disponibles. Les connaissances peuvent être transmises et les aptitudes transférées, mais l'acquisition d'une technique est pratiquement impossible, si l'on ne peut se procurer certaines pièces ou matériels indispensables. Il n'y a aucune raison de rechercher l'autarcie dans une situation où le commerce avec les sources extérieures fournissant ce matériel existe ou peut être engendré.

Le groupe reste convaincu que l'économie rurale d'un pays en développement sera renforcée par la création et l'acquisition d'un volume de capitaux suffisant pour obtenir la technique qui, à son tour, permettra au pays de mettre en valeur ses propres capacités humaines et ses propres ressources naturelles. Son développement économique s'accélérera s'il peut exploiter ses sources énergétiques renouvelables d'une manière compatible avec les besoins locaux et les coutumes locales. Le groupe est d'avis que si l'énergie et son utilisation sont les seuls facteurs sur lesquels doit se fonder le développement économique, l'étude d'un plan de développement axé sur les ressources énergétiques locales est amplement justifiée. En l'absence de nouvelles techniques énergétiques, la situation des régions rurales pauvres ne s'améliorera pas sensiblement ; avec l'augmentation constante du coût des sources d'énergie conventionnelles, elle se détériorera certainement.

Des études et modèles économiques généralisés de régions rurales ne sont pas plus utiles dans des situations réeles que le sont des études purement techniques. Un village de la côte méditerranéenne, où il y a du vent, du soleil et peut-être même d'abondantes précipitations, diffère totalement d'un village de la forêt équatoriale, qui a de l'eau mais peu de vent, ou d'un village de l'Inde qui, à certaines époques de l'année, risque de n'avoir ni l'un ni l'autre. Toute tentative pour trouver un modèle universel de toutes ces situations n'aboutira qu'à des généralités tellement théoriques qu'elle n'aura quère de valeur pour les micro-économies particulières auxquelles les solutions doivent être appliquées. Une micro-économie peut toutefois être efficacement étudiée par les spécialistes de l'économie rurale et des disciplines y afférentes, travaillant de concert avec des technologues sachant ce que peut faire un apport de capitaux ou de main-d'oeuvre. La proposition avancée ici expérimenterait l'hypothèse selon laquelle une unité économique rurale peut améliorer de façon permanente son niveau de vie général et son bien-être économique, à condition que les moyens d'adopter des systèmes d'énergie appropriés soient disponibles. Si l'expérience réussit, on pourrait reproduire la méthode ailleurs dans d'autres unités économiques rurales aux caractéristiques différentes, afin d'en évaluer la valeur de manière plus concluante pour la stratégie du développement rural.

INSTITUTS REGIONAUX DE RECHERCHES ET DE REALISATIONS ENERGETIQUES

Il faut songer à créer des centres régionaux de recherches et de réalisations énergétiques qui prendraient l'initiative de mettre au point et d'adapter des techniques d'exploitation des ressources énergétiques renouvelables appropriées à la région. Nous recommandons donc que le personnel de ces centres soit, dans la mesure du possible, d'origine locale et qu'il comprenne des spécialistes en sciences sociales. Sans ces derniers, le groupe redoute en effet que ne se répètent certaines expériences malheureuses du passé, comme l'échec des tentatives faites pour introduire des dispositifs à énergie solaire (fours par exemple) et que les techniques étudiées dans le présent rapport soient rejetées.

La dernière et troisième proposition vient de la nécessité admise par le groupe d'adapter aux contraintes locales aussi bien les techniques étudiées que les appareils disponibles pour leur exploitation. Pendant les délibérations du groupe, on a suggéré la création d'instituts régionaux de recherche à l'échelle mondiale. Ce n'est pas là un concept nouveau ; il a été proposé sous différentes formes dans le passé, d'abord en 1961 par M. S. Tracker dans un article écrit pour l'UNESCO[4]. Cette proposition portait sur la création d'une Commission mondiale de l'énergie dont le rôle aurait été de surveiller le développement mondial dans ce domaine. Intéressée essentiellement par l'approvisionnement en énergie sur une vaste échelle, la commission devait être contrôlée par les pays industrialisés. L'idée a été légèrement modifiée en 1955 lorsqu'on a suggéré que l'organe international proposé comprenne des groupes dont la tâche est d'aider les pays en développement. En 1961, il a été proposé que soit créé en Grèce un institut international, le Centre international de recherches sur l'énergie solaire et éolienne, qui orienterait ses efforts vers les sources d'énergie non conventionnelles[5].

En 1972, une groupe de travail de l'Académie nationale des sciences, dans un rapport sur l'énergie solaire et les pays en développement, a relancé l'idée et recommandé "l'établissement de centres régionaux de recherches et de réalisations énergétiques, dont les fonctions seraient les suivantes :

1. Aider à créer une base d'informations sur les besoins en énergie dans la région ;
2. Procéder aux recherches et aux réalisations nécessaires pour satisfaire les besoins régionaux en énergie ;
3. Entreprendre des expériences sur le terrain et obtenir une rétro-information des usagers vers les centres afin d'améliorer les processus énergétiques et de faire progresser les processus solaires (ou autres) ;

4. Servir de centres d'information, d'éducation et de formation en collaboration avec les universités locales ;

5. Suivre de près les progrès scientifiques et techniques, ainsi que les résultats obtenus en matière d'énergie dans d'autres centres et dans les pays industrialisés[6].

En 1973, un Groupe de travail international organisé par l'UNESCO a proposé la création d'une Commission internationale de l'énergie solaire[7] qui présupposait la création d'un réseau de centres régionaux à l'échelon international. En 1974, le Comité consultatif des Nations unies sur l'application de la science et de la technologie au développement a proposé que le Programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE) "prenne l'initiative et crée un institut d'énergie qui pourrait . . . collaborer avec divers gouvernements, organisations et particuliers du monde en développement . . .[8]"

Au printemps de 1975, les Etats-Unis ont proposé officellement la création de l'Institut international de l'énergie pour aider les pays en développement à résoudre leurs problèmes énergétiques[9]. Les Etats-Unis ont suggéré que l'institut identifie "les techniques actuelles ou nouvelles les plus conformes [aux besoins particuliers des pays en développement] et contribue à l'évaluation de toutes les ressources et de tous les besoins en énergie de ces pays". Composé d'experts des milieux gouvernementaux, industriels et universitaires des pays industrialisés et en développement, cet institut pourrait former des techniciens ou spécialistes locaux et régionaux dans le domaine énergétique. Il pourrait devenir un point de contact central où législateurs et experts pourraient échanger des idées sur les plans et les programmes. De plus, l'institut pourrait devenir un "premier pont" jeté entre l'effort énorme que font les pays industrialisés à l'heure actuelle pour découvrir d'autres sources d'énergie et celui que "doivent aujourd'hui entreprendre" les pays en développement[10].

Aucune décision importante n'a encore été prise pour mettre en oeuvre une des premières recommandations et la proposition la plus récente est encore débattue par le gouvernement des Etats-Unis. Le groupe estime donc que le moment est venu d'insister sur la nécessité de décentraliser non seulement les réseaux d'approvisionnement en énergie, mais aussi l'Institut international de l'énergie. Cette décentralisation est essentielle si un pays veut tirer parti des différentes techniques d'exploitation des ressources énergétiques renouvelables. Un Institut international de l'énergie jouerait sans aucun doute un rôle utile comme "point de contact central" pour la coordination des recherches, les études de politique énergétique, les analyses de systèmes et la formation du personnel des pays en développement dans le domaine de la gestion énergétique. Toutefois, l'exploitation et l'adaptation locales de techniques énergétiques ne se feront vraisemblablement pas dans un tel cadre.

L'institut central devrait plutôt être associé à un ensemble d'instituts régionaux à qui ces tâches seraient confiées. Le succès de l'adaptation des nouvelles techniques est tributaire de l'apport pratique local, qui ne pourra probablement être obtenu que dans des conditions favorables aux essais sur le terrain et à la formation technique.

Ces instituts régionaux devraient s'efforcer de réduire le coût des techniques (de sorte qu'elles soient financièrement accessibles aux pays en développement) et d'exploiter les matériaux locaux et les compétences locales chaque fois que cela est possible. Le groupe désire souligner une fois encore, qu'il est indispensable d'affecter à ces centres des spécialistes des sciences sociales qui puissent accorder suffisamment d'attention aux facteurs économiques et sociaux des milieux où les nouvelles techniques sont introduites.

Le coût actuel des techniques d'exploitation des ressources énergétiques renouvelables est dans la plupart des cas trop élevé pour les collectivités rurales des pays en développement. Toutefois, le rôle joué par l'énergie dans le développement rural revêt une telle importance—en particulier pour l'amélioration du niveau de vie des populations rurales—que, de l'avis du groupe, il faut à tout prix mettre fin à cette situation. Il convient de faire un effort concerté pour mettre ces techniques à la portée de ces populations, spécialement dans les pays pauvres en énergie, en augmentant la production, en améliorant la distribution et en assurant une adaptation et une utilisation appropriées des techniques. C'est à cette fin que le groupe soumet les présentes propositions en espérant qu'elles aboutiront à d'utiles applications.

REFERENCES

1. Bien que l'on ait récemment pris davantage conscience de cette interdépendance à la suite de la "crise de l'énergie", il ne s'agit pas d'un concept nouveau. Voir, par exemple : Millikan, Robert A. 1939. Science and the world tomorrow. *Vital Speeches* 5:446-468; et MacCurdy, George G. 1929. *Human origins : A manual of prehistory.* 2 vols. New York : Holt, tirage à part de la Johnson Reprint Corporation.
2. Merriam, M. F. 1974. *Engineering research for decentralized power : A plan for action.* Honolulu : East-West Center, Technology and Development Institute.
3. Voir, par exemple : Brown, N. L., et Pariser, E. R. 1975. Food science in developing countries. *Science* 188:589-593.
4. Thacker, M. S. 24 May 1951. *The role of energy in underdeveloped areas.* UNESCO Discussion Theme 1951 Energy in the Service of Man. Paris: United Nations Educational, Scientific, and Cultural Organization.
   Voir aussi Johnson, Référence 2 (Introduction) pour une étude de l'histoire de cette idée.
5. Golding, E. W. 1964. Methods of assessing the potentialities of wind power on different scales of utilization. Dans *Solar and aeolian energy*. Proceedings of the International Seminar on Solar and Aeolian Energy, 4-15 September 1961, Sounion,

Greece. Athens: North Atlantic Treaty Organization. Distribué par Plenum Press, New York.

6. National Academy of Sciences/National Research Council. 1972. *Solar energy in developing countries: Perspectives and prospects*. Report of an *ad hoc* advisory panel of the Board on Science and Technology for International Development, Office of the Foreign Secretary. Washington, D.C.: National Academy of Sciences.
7. *Bulletin of the UNESCO Regional Office of Science and Technology for Africa*. 1974. IX(3) (July-September).
8. Billings, B. H. 1974. *A proposal to the United Nations Environment Programme for a programme in non-polluting energy*. Advisory Committee on the Application of Science and Technology to Development. U.N. Document No. E/AC.52/XX/CRP.7, 11 September. New York: United Nations.
9. Kissinger, Henry. 1975. Global consensus and economic development. Discours à la Septième Session extraordinaire de l'Assemblée générale des Nations Unies, le 1er septembre 1975. Washington, D.C.: U.S. Department of State, Bureau of Public Affairs, Office of Media Services.
10. Kissinger, Henry. 1975. Energy, raw materials, and development: The search for common ground. Discours prononcé à la Conférence sur la coopération économique internationale, le 16 décembre 1975. Washington, D.C.: U.S. Department of State, Bureau of Public Affairs, Office of Media Services.

SECTION NON TECHNIQUE

PREMIERE PARTIE

EMPLOIS DIRECTS DE L'ENERGIE SOLAIRE

Chauffage, refroidissement, distillation, séchage des cultures et production d'électricité

Parmi les applications désormais possibles de l'énergie solaire, auxquelles les régions rurales pourraient recourir, compte tenu naturellement des conditions locales, figurent :

- Le chauffage de l'eau (à usage domestique et commercial) ;
- Le chauffage des bâtiments ;
- Le refroidissement des bâtiments ;
- Le séchage des produits agricoles et animaux ;
- La production de sel par évaporation de l'eau de mer ou des eaux salées intérieures.

D'un point de vue technique, nombreuses sont les autres applications possibles de l'énergie solaire. Elles comprennent la production d'électricité, la réfrigération des aliments, la cuisson, la production d'eau pure à partir de l'eau salée et la fabrication de produits chimiques. Toutefois, pour des raisons économiques, on ne peut s'attendre à ce qu'elles soient utilisées à court terme. En effet, tantôt le coût des sources conventionnelles d'énergie ainsi exploitées est nettement inférieur au coût de l'énergie solaire, tantôt leur substitution dans l'économie des pays en développement n'est guère nécessaire.

Les applications énumérées sont aujourd'hui utilisées dans diverses parties du monde, mais cela ne veut pas dire pour autant que la technique n'est pas perfectible. Cela signifie tout simplement qu'un matériel existe dans le commerce et que, d'ici cinq ans, les pays en développement y auront probablement recours. Cela veut dire qu'on ne doit pas s'attendre à ce que, au cours de

ces cinq ans, chaque application pour laquelle il existe déjà un matériel dans le commerce soit adoptée par les collectivités rurales des pays en développement sans que les travaux de recherches et de réalisations aient progressé.

TECHNIQUES ACTUELLEMENT DISPONIBLES

Au cours des cinq années à venir, il est probable que quatre seulement des applications énumérées seront adoptées dans les régions rurales de pays en développement.

L'exploitation de l'énergie solaire dans le secteur agricole comprend le séchage de diverses récoltes, soit par exposition directe à la lumière du soleil, soit en utilisant de l'air chauffé circulant à travers ou au-dessus de la récolte à sécher. Ces procédés sont immédiatement applicables avec des matériaux, de la main-d'oeuvre et des competences locaux. De plus, la technique est déjà éprouvée et des recherches récentes ont permis d'en améliorer la conception. Les coûts que représente le séchage des céréales, des fruits, du bois et d'autres produits au moyen d'air chauffé par le soleil n'ont pas encore été évalués avec exactitude. Bien qu'ils semblent légèrement plus élevés que ceux des procédés de chauffage conventionnels, ils sont financièrement à la portée des intéressés.

L'énergie solaire pour le chauffage de l'eau est depuis longtemps exploitée avec succès pour l'eau chaude domestique. Etant donné que ces systèmes entrent souvent en concurrence avec d'autres sur le plan économique, ce procédé, comparé à ceux qui utilisent des combustibles fossiles, sera de plus en plus économique à mesure que s'accroîtra le prix des combustibles. Lorsque des combustibles tels que le bois ou la tourbe existent dans la région et peuvent être obtenus à bon marché ou gratuitement—encore que leur source s'épuise—le coût en capital d'un système domestique d'eau chaude à énergie solaire n'est pas justifié.

Le chauffage de logements par l'énergie solaire est rarement économiquement concurrentiel lorsque les combustibles fossiles sont peu coûteux et abondants, phénomène de plus en plus rare également. Dans le cas du chauffage des logements, des systèmes à air chaud ont été utilisés avec succès au lieu de l'eau chaude. Ces systèmes sont techniquement peu compliqués, généralement sûrs et peuvent être utilisés avec des matériaux, de la main-d'oeuvre et des compétences locaux.

La production de sel par évaporation de l'eau de mer ou des eaux salées intérieures est une pratique ancienne suffisamment connue pour que l'on n'en discute pas en détail ici. Il suffit de dire que cette application directe de l'énergie solaire existe et peut être immédiatement utilisée chaque fois que de l'eau contenant du sel existe dans un climat approprié ; l'application pratique

et économique de cette méthode ne dépend pas de manière cruciale d'une amélioration des techniques.

Ces quatre applications couvrent la plus grande partie des modes d'exploitation directs connus de l'énergie solaire auxquels les pays en développement auront recours d'ici cinq ans. Une autre application sera peut-être possible vers la fin de cette période : le système de refroidissement solaire employant le cycle d'absorption. Toutefois, la seule technique qui sera utilisable pendant cette période sera un nouveau système hydraulique au bromure de lithium. Ce système devrait être fiable d'ici cinq ans environ, mais sa rentabilité par rapport à d'autres méthodes est encoure douteuse; étant donné les conditions locales, il se pourrait que les pays en développement ne soient pas en mesure de recourir uniquement durant cette période à des matériaux, une industrie, de la main-d'oeuvre et des compétences locaux. Cependant, si cette technique est considérée comme applicable, des unités de ce type ne seront vraisemblablement rentables qui si elles sont utilisées dans des bâtiments relativement grands où une activité commerciale fournit un capital suffisant pour financer un investissement coûteux.

TECHNIQUES DISPONIBLES A COURT TERME

D'ici cinq à dix ans, on peut s'attendre à l'exploitation de meilleurs systèmes de refroidissement aussi bien du type à absorption que du type à compression. Ce dernier devrait permettre d'améliorer et de rendre plus économique le cycle organique Rankine et peut être même le cycle Stirling. Quant aux processus d'absorption, les recherches devraient inclure des systèmes à phases multiples et de nouveaux fluides de traitement. Certaines modifications récentes du cycle d'absorption restent encore à éprouver et l'on pourrait aussi mettre au point des systèmes désséchants appropriés à la régénération par énergie solaire. Les recherches et les réalisations devront se poursuivre dans tous ces domaines.

Il est possible que, vers la fin de cette période, on parviendra à simplifier les petites génératrices alimentées par l'énergie solaire. Cette question est discutée plus en détail dans la section sur la photovoltaïcite. Le pompage de l'eau, le refroidissement, peut-être même l'éclairage et les collectivités éloignées des réseau électriques. Enfin, cette technique pourrait être introduite dans les régions où le prix des combustibles est extrêmement élevé et où l'énergie solaire existe en abondance, à condition que l'on dispose des capitaux nécessaires.

Pour ce qui a trait à la production d'énergie électrique à grande échelle, il sera difficile d'accomplir de grands progrès sur le plan pratique dans les pays

en développement au cours des dix prochaines années. Ce retard n'est pas imputable au rythme auquel progresse la technologie, mais plutôt au fait que l'infrastructure industrielle très perfectionnée qui serait nécessaire de même que le manque de capitaux risquent de s'opposer au succès de cette opération pendant la période considérée. Quant à la technique requise pour les systèmes de production d'électricité par énergie solaire, nombreuses sont les méthodes qui en sont à l'heure actuelle au stade des recherches et des mises au point : des cycles, comme celui de Stirling ou le cycle organique de Rankine, sans oublier les systèmes photovoltaïques, thermo-ioniques et thermo-électriques. Il est trop tôt pour dire qu'une de ces méthodes est nettement supérieure aux autres, encore que certaines indications favorisent la méthode de la "tour électrique". Ces méthodes doivent être étudiées plus en détail avant qu'on ne puisse décider d'une orientation. Il est improbable que d'ici cinq ou dix ans l'accord soit suffisant pour permettre la réalisation d'un système unique à grande échelle, même dans les pays industrialsés.

RECHERCHES ET REALISATIONS

D'ici cinq ans, il est possible de procéder à des applications rentables de l'énergie solaire dans les pays en voie de développement par une injection de capitaux et par exploitation de matériaux locaux. Certains matériaux devront être importés, bien que la plupart des pays intéressés en possèdent la majeure partie. Il ne fait aucun doute que le volume de capitaux disponibles est un des facteurs critiques de l'application à court terme de l'énergie solaire dans les pays en développement.

Pour la période de cinq à dix ans, le capital est une fois encore le facteur limitatif. Toutefois, des travaux de recherche et de mise au point sur les nouvelles applications prometteuses, ainsi que l'amélioration et la réduction du coût des systèmes solaires, s'imposeront également. L'appui que peuvent donner à ces programmes les collectivités locales, les organisations intergouvernementales telles que les Nations unies et l'UNESCO, ainsi que la communauté bancaire internationale, peut jouer un rôle décisif. Outre les recherches à effectuer dans les pays technologiquement avancés, les projets de développement pratiques dans les pays en développement devraient largement contribuer à y introduire les techniques. Mais un programme de ce genre ne sera complet que si les organismes qui patronnent ces projets en recensent les résultats et en assurent la diffusion par les voies de communication techniques et internationales existantes.

Dispositifs photovoltaïques

De toutes les méthodes d'exploitation de l'énergie solaire, la conversion directe de la partie visible du spectre solaire (lumière solaire) en électricité est peut-être la plus simple et la plus satisfaisante du point de vue esthétique. C'est malheureusement aussi la plus difficile à appliquer sur une vaste échelle dans les pays en développement.

La conversion photovoltaïque directe peut se faire au moyen d'appareils de conception très simple, qui ne comportent ni partie mobile, ni source d'énergie, et n'exigent que peu sinon pas d'entretien. Ces appareils photovoltaïques, qui sont aujourd'hui appelés cellules solaires, se fondent sur la propriété qu'ont certains solides cristallins de produire un courant électrique utilisable comme force motrice lorsqu'ils sont exposés à la lumière du soleil. Bien que ces appareils soient en effet très simples (ils se composent d'une plaquette de matière cristalline munie de deux électrodes métalliques), leur fabrication exige les capacités techniques perfectionnées des pays industrialisés. En fait, c'est cette technique elle-même qui permet aujourd'hui de mettre au point des méthodes qui (en réduisant le coût du produit) pourront donner aux régions rurales la possibilité d'utiliser à peu de frais les cellules solaires. A de très rares exceptions près, les pays en développement ne pourraient donc recourir à cette technique qu'en achetant ces produits sur les marchés internationaux. Il en sera ainsi jusqu'à ce qu'un plus grand nombre de pays du tiers monde se munissent de l'infrastructure technique et industrielle nécessaire et jusqu'à ce que les processus industriels soient suffisamment élaborés et la production suffisamment abondante pour justifier économiquement le transfert des techniques mêmes de fabrication.

Les cellules solaires on été utilisées pour la première fois en 1955. Depuis, leur évolution a éte essentiellement un sous-produit de la recherche spatiale. Les caractéristiques qui les rendent avantageuses pour les pays en développement – simplicité, faible poids, efficacité, sûreté, absence de parties mobiles – en ont fait des éléments indispensables aux véhicules spatiaux qui s'en servent comme source d'énergie. Malheureusement, les techniques de production de masse (orientées vers la satisfaction d'une très forte demande et la concurrence économique) n'ont pas encore été utilisées pour la fabrication de ces appareils. Il n'est donc pas surprenant que les cellules solaires soient restées aussi coûteuses. L'intérêt actuellement porté à la recherche et aux prix des combustibles fossiles ainsi qu'aux injections massives de fonds de développement dans la recherche sur l'énergie pourraient fournir un nouvel encouragement aux récentes tendances, qui s'orientent vers l'adoption de techniques de production de masse peu coûteuses pour les cellules solaires.

TECHNIQUES ACTUELLEMENT DISPONIBLES

Les systèmes photovoltaïques d'un rendement énergétique de 10 pour cent et d'une puissance maximale allant d'un à plusieurs dizaines de kilowatts peuvent être obtenus auprès de fabricants au Japon, aux Etats-Unis, en Angleterre, en France et en République fédérale d'Allemagne. Des systèmes générateurs destinés à être utilisés dans des endroits éloignés tels que les bouées de navigation et les phares, les stations de contrôle de l'environnement, les stations de relais par hyperfréquences et les communications entre gardes forestiers, existent dans le commerce, leur gamme de puissances allant de quelques watts à 1 kW. Des systèmes plus puissants sont construits "sur mesure". Les coûts d'un système complet dépendent surtout de l'éventail photovoltaïque : ils atteignent de 20 à 30 dollars par watt en pointe, ce qui correspond à 100.000 à 150.000 dollars par kilowatt de capacité installée moyenne ; ces coûts devraient cependant diminuer de plus de moitié au cours des prochaines années. Ces systèmes contiennent tous des cellules solaires de silicium produites grâce à un procédé dérivé de la technique utilisée pour fabriquer les cellules solaires des véhicules spatiaux. Ils comprennent des batteries, un régulateur de tension et de courant, ainsi que d'autres composantes facultatives telles que des convertisseurs continu alternatif.

Au cours des cinq prochaines années, plus de 100 millions de dollars seront dépensés par l'industrie et le gouvernement aux Etats-Unis, au Japon, en Allemagne fédérale, en France et en Angleterre pour la mise au point de systèmes d'énergie photovoltaïque terrestres bon marché. Durant cette période, l'accent sera mis sur la recherche et la mise au point de nouveaux procédés de production de masse de modules solaires intégrés et, en 1980, de rangées de

cellules solaires intégrées avec des cellules fabriquées à partir d'un ruban de silicium fabriqué en masse. En outre, des rangées incorporant des concentrateurs à large ouverture (qui éliminent la nécessité d'orienter les cellules en fonction de la position du soleil) seront vraisemblablement mises en vente. Grâce à l'effort intensif de recherche et de mise au point actuellement en cours sur ces systèmes terrestres, on peut s'attendre à une diminution constante des coûts ; des modules de cellules solaires d'un coût de quelques milliers de dollars par kilowatt de puissance installée moyenne (soit une réduction de moitié environ) et d'un rendement énergétique approchant 15 pour cent, pourraient être mises sur le marché d'ici 1980.

TECHNIQUES DISPONIBLES A COURT TERME

Si la pénurie de combustibles et leur prix élevé constituent toujours des stimulants économiques, il est fort probable que l'éventail commercial des dispositifs photovoltaïques à des coûts de quelques centaines de dollars par kilowatt moyen sera disponible d'ici 1985 ou même plus tôt. Il faudra réaliser l'intégration de cet éventail pour en faire un réseau complet comprenant le stockage, le conditionnement, le transport et la distribution de l'énergie avant que ces matériels ne soient utiles sur une échelle suffisamment vaste pour que chaque "réseau" puisse produire plus de quelques kilowatts. A cet égard, la disponibilité de systèmes de stockage économiquement avantageux (voir le chapitre sur le stockage) sera un facteur crucial lorsqu'il s'agira de décider du degré d'utilisation de cette technique.

Dans cette gamme de prix, il y aurait sans aucun doute intérêt à utiliser cette technique, peut-être pour l'établissement de "minigrilles" locales (villages et collectivités), destinées éventuellement à s'amplifier et à s'intégrer en réseaux électriques plus étendus et plus diversifiés. Toutefois, si l'on veut que cette technique évolue de manière à satisfaire des besoins techniques, économiques, et sociaux propres à différents pays en développement, il faudra une action délibérée et spécialement conçue à cette fin. Dans le cas contraire, il est peu probable que l'on puisse "transférer" directement aux village éloignés des systèmes photovoltaïques mis au point pour être intégrés aux réseaux des services publics modernes.

DEUXIEME PARTIE

EMPLOIS INDIRECTS DE L'ENERGIE SOLAIRE

L'énergie éolienne

L'exploitation de l'énergie éolienne "gratuite" est une perspective tout aussi attrayante que celle de la voltaïcité. Toutefois, elle n'est pas non plus exempte de problèmes, bien que ceux-ci puissent être plus faciles à résoudre pour les pays en développement. Le vent a été l'une des premières sources d'énergie utilisées pour multiplier la capacité de production du travail musculaire. En mer, il a été utilisé pour propulser les navires et à terre on lui a trouvé une multitude d'usages à l'échelon du village, notamment :

- le pompage de l'eau douce destinée aux ménages, au bétail et à l'agriculture ;
- l'irrigation des champs ;
- la mécanisation des travaux agricoles tels que le broyage du maïs, du blé et de la canne à sucre, ainsi que le battage, la mise en balles et le vannage ;
- la coupe du bois ;
- le pompage d'eau de mer dans les salines ; et
- la production d'électricité à des fins diverses.

Le présent chapitre porte sur de petits appareils éoliens qui produisent de 10 à 20 HP (7,5 à 15 kW).

TECHNIQUES ACTUELLEMENT DISPONIBLES

Plusieurs types d'éoliennes sont actuellement disponibles, que ce soit commercialement ou sous la forme de prototypes éprouvés dont la fabrication en

série pourrait être facilement entreprise au fur et au mesure que le marché s'amplifiera. Il s'agit de machines tournantes à arbre vertical ou horizontal selon le cas. Parmi les machines à arbre vertical figurent le rotor Savonius – facilement adaptable à la construction locale – le rotor Darrieus et le rotor à voilure verticale. Les machines à arbre horizontal les plus courantes sont munies d'hélices à 2, 3, et 4 pales, qui sont d'ordinaire celles des génératrices électriques éoliennes ; on connaît aussi les hélices multi-pales habituellement utilisées pour le pompage de l'eau et la version à voilure horizontale caractéristique du moulin à vent bien connu des îles grecques. On emploie en outre de simples éoliennes du type "roue à aubes" dont l'arbre est soit horizontal soit vertical.

Quant aux possibilités d'application de cette technique au cours des cinq prochaines années, il existe actuellement un nombre suffisant de machines de fabrication commerciale pour en permettre l'application immédiate, que ce soit pour pomper de l'eau, pour comprimer de l'air ou pour produire de l'électricité.

Le prix de groupes-pompe varie sensiblement de 4.000 à 8.000 dollars par HP (5.000 à 10.000 par kW) pour les petits groupes et tombe à 1.000 – 2.000 dollars par HP (1.300 à 2.600 dollars par kW). Quelques groupes-pompe à plus grande puissance sont déjà sur le marché.

Les groupes électrogènes éoliens coûtent de 3.000 à 6.000 dollars par kilowatt dans le groupe des puissances inférieures au kilowatt et de 1.000 à 2.000 dollars/kW pour des puissances de 5 à 15 kW. Un groupe dont la production vient de commencer aux Etats-Unis devrait se vendre pour 500 dollars/kW environ. Il n'existe actuellement sur le marché aucun groupe commercial plus puissant.

La plupart des groupes à énergie éolienne mis aujourd'hui sur le marché sont fiables et n'exigent guère d'entretien. Leur durée de vie prévue est de 10 à 20 ans (parfois plus) avec un entretien adéquat.

En outre, les villageois peuvent se procurer un certain nombre de plans qui leur permettent de construire eux-mêmes les groupes en utilisant souvent des matériaux fabriqués sur place*. Ces groupes à faible puissance reviennent à 1.000 – 1.500 dollars/HP (1.300 à 2.000 dollars/kW), puissance délivrée à l'arbre. En règle générale, cependant, ils exigent un entretien et des coûts d'exploitation légèrement plus importants (principalement pour la main-d'oeuvre) que la plupart des groupes déjà répandus sur le marché.

*Par exemple : "How to Construct a Cheap Wind Machine for Pumping Water". Leaflet No. L-5. Brace Research Institute, MacDonald College, McGill University, Ste. Anne de Bellevue 800, Québec, Canada. ($1.00). Aussi : "Low Cost Windmill for Developing Nations" par Hartmut Bossel. On peut se procurer cette brochure en s'adressant à VITA (Volunteers in Technical Assistance), 3706 Rhode Island Avenue, Mt. Rainier, Maryland, 20822, USA ($2.00).

Dans les régions en développement, le prix des éoliennes classiques sera souvent beaucoup moins élevé que les chiffres précités, un grand nombre d'unités pouvant être construites localement avec les techniques disponibles.

RECHERCHE ET REALISATIONS

Si l'on parvient à encourager les recherches et les réalisations, on pourra s'attendre à des améliorations techniques et économiques d'ici cinq à dix ans. Ce programme de recherches et de réalisations devrait inclure les éléments suivants :

- Etudes mécaniques et études de matériaux pour les éoliennes commerciales existantes, destinées à améliorer les techniques de production et à réduire les coûts ;
- Mise au point de systèmes éoliens pour la production d'énergie mécanique sur l'arbre et la production d'électricité à l'aide d'un nombre aussi important que possible de matériaux et de techniques autochtones et disponibles localement ;
- Examen et, le cas échéant, modification, des appareils entraînés par les éoliennes en fonction du travail à effectuer – pompage, travaux agricoles (broyage, battage, triage), production d'énergie électrique, etc. – en vue de leur fabrication dans des ateliers locaux ;
- Elaboration de systèmes décentralisés qui soient simples, fiables et faciles à entretenir dans les zones villageoises, s'ils n'y ont pas été fabriqués ;
- Application des techniques connues pour adapter les éoliennes à une variété de conditions écologiques (vents, précipitations, neige, glace, températures extrêmes), ce qui peut comprendre : l'élaboration de nouvelles formes de rotors pour les applications peu puissantes (encore qu'il ne faille pas s'attendre dans ce domaine à une forte amélioration des rendements) ; et
- Mise en place d'un programme d'éducation publique dans les régions rurales pour démontrer les possibilités offertes par l'énergie éolienne.

Il est prévu qu'un tel programme pourrait aboutir, grâce à l'amélioration des matériels actuels, à la mise au point et à l'utilisation de machines capables de fournir de 1 à 15 HP (750 W à 11 kW) dans un vent de 16 km/h.

La création de groupes de 25 à 50 HP (20 à 40 kW) serait plus coûteuse, mais mérite néanmoins notre attention. On peut s'attendre à tirer des avantages considérables des programmes de réalisation en cours dans les pays industrialisés.

Il conviendrait de confier le programme de recherches et de réalisations à un organisme central qui bénéficierait d'un financement multilatéral et serait doté d'un personnel international. A l'heure actuelle, plusieurs groupes se

livrent à des recherches sur l'énergie éolienne dans les pays développés, tous à des fins différentes et avec un financement différent. Parmi eux figurent des groupes universitaires tels que ceux de l'Oklahoma State University à Stillwater et de la Technische Hogeschool Eindhoven aux Pays-Bas ; l'Institut universitaire de recherches Brace à McGill University, Montréal ; le groupe Windworks à Mukwonago (Wisconsin), financé commercialement et le Swedish Technical Board à Stockholm, organisme d'Etat. Dans les pays en développement, l'Institut de technologie de Bandung en Indonésie, par exemple, a procédé à quelques réalisations sur le terrain.

Le groupe estime qu'il serait bon de coordonner les travaux de tous ces groupes en créant un centre de recherches et de réalisations qui aurait pour objectif de faire bénéficier au maximum les pays en développement des applications de l'énergie éolienne. Ce centre travaillerait par l'intermédiaire des instituts régionaux de recherches et de réalisations en matière d'énergie. Cette proposition figure dans le chapitre consacré aux conclusions du groupe. Le centre devra être à même de mettre au point des programmes coordonnés de conception et d'expérimentation en collaboration avec des groupes tels que l'Appropriate Technology Development Unit de l'Institut d'études Ghandi à Rajghat à Bénarès en Inde, les Laboratoires d'énergie solaire à Karachi au Pakistan, le Laboratoire national de physique à Jérusalem en Israël et le Ministère de l'électricité au Caire en Egypte.

Ce centre bénéficierait du concours du Conseil consultatif des Nations Unies pour l'application de la science et de la technologie au développement, et il travaillerait avec des organismes donateurs nationaux, bilatéraux et multilatéraux pour faciliter l'échange d'informations sur les travaux en cours et assurer la plus large diffusion des résultats obtenus.

L'énergie hydraulique

LA TURBINE HYDRAULIQUE

La première source d'énergie utilisée sur une très grande échelle (en dehors de celle que fournissaient les muscles de l'homme et de l'animal) a été l'eau courante, que l'on dirigeait soit directement sur les aubes solidaires d'une roue, soit dans des godets également fixés à une roue. Cet appareil, le moulin à l'eau, a été le précurseur de la turbine hydraulique ; il est né voici plusieurs milliers d'années en Egypte, en Chine et en Perse.

Les moulins à eau ont remplacé l'homme pour de nombreuses tâches laborieuses et monotones comme le broyage des céréales pour la farine et les aliments destinés aux animaux, le pompage pour l'irrigation et l'adduction d'eau, la fabrication des produits textiles et la métallurgie.

Au fur et à mesure que la demande d'énergie augmentait, le simple moulin à eau s'amplifiait. Au milieu du dix-neuvième siècle, la découverte révolutionnaire de la turbine hydraulique par Fourneyron en France commença à remplacer le moulin comme source d'énergie. En fait, la machine à vapeur avait déjà commencé à le remplacer cinquante ans auparavant.

La turbine hydraulique était nettement supérieure à la roue à aubes ou à auges, quel que soit le point de vue pratique considéré. Elle pouvait produire beaucoup plus d'électricité que le plus grand moulin dans un espace plus réduit et avec une mécanique moins volumineuse. Elle pouvait fonctionner adéquatement à haute ou à basse pression, ce que ne pouvaient faire les moulins. Elle pouvait aussi fonctionner à une plus grande vitesse angulaire (tours/minutes) que le moulin, essentiellement en raison de son diamètre réduit.

Pendant la deuxième moitié du dix-neuvième siècle, on comptait en Nouvelle Angleterre plus de cinquante fabricants de turbines hydrauliques qui satisfaisaient les besoins des petites usines rurales. Il n'était pas inhabituel pour un constructeur de moulin de dessiner et de construire sa propre turbine hydraulique. De nos jours, on trouve encore quelques installations "fabrication maison". A la fin du dix-neuvième siècle, la petite turbine hydraulique d'une usine était souvent reliée par courroie à une génératrice, principalement aux fins de l'éclairage.

Avec la création de grandes centrales hydro-électriques et thermo-électriques et l'extension de lignes de transport d'énergie aux régions rurales, la construction de petites turbines hydrauliques a rapidement diminué. Ces dernières années cependant, en raison sans aucun doute de la crise de l'énergie, le monde entier s'intéresse à nouveau aux groupes hydro-électriques à faible puissance. Les pays en développement peuvent à l'heure actuelle se procurer des groupes de ce genre.

Par petits groupes hydro-électriques à faible chute, on entend les groupes capables de produire de 5 à 15 kW avec une hauteur d'eau de 3 à 6 mètres. S'il est vrai que notre étude porte essentiellement sur la production d'électricité, il n'en faut pas moins reconnaître que le même appareil peut accomplir directement des tâches utiles ; il peut entraîner, grâce à un jeu de courroies ou d'engrenages, des broyeurs de céréales, des pompes, des machines pour le travail du bois et du métal, ou d'autres machines de production.

Techniques Actuellement Disponibles

Avec des hauteurs de chute faibles, il est préférable d'utiliser des roues de turbine à pas fixé ou le type Francis plus connu* que les types plus complexes comme celui de Kaplan, dont le pas s'ajuste automatiquement à la charge électrique. On peut actuellement se procurer de petites génératrices hydro-électriques auprès de plusieurs fabricants aux Etats-Unis et en Europe. De plus, il semble que ce type de turbine soit construit et utilisé en grandes quantités en République populaire de Chine, mais le groupe ne possède aucunes données concernant leur possibilité d'exportation.

En raison de la production limitée de ces petits groupes hydro-électriques, leur coût par kilowatt est assez élevé. Les unités capables de produire 10 kW coûtent environ 1.000 dollars par kilowatt. Le coût par kilowatt augmente pour les unités à puissance plus réduite. Ces coûts ne comprennent pas le coût d'autres ouvrages nécessaires comme le barrage, le canal d'amenée (bief) entre le barrage et la turbine, et les locaux. Une fois considérés tous les coûts, le coût de l'électricité au générateur atteindrait vraisemblablement de 8 à 10 cents par kilowatt-heure.

*Voir p. 148 pour la description.

Recherches et Réalisations

Les pays en développement pourraient vraisemblablement obtenir une réduction significative des coûts en construisant des turbines à pas fixe en bois (la turbine Francis, plus compliquée, ne se prête pas facilement à la construction en bois). Des rapports en provenance de Chine, d'Union Soviétique et de Roumanie montrent que cette méthode a été utilisée avec succès dans ces pays.

La turbine à pas fixe et les turbines Francis constituent une technique bien au point et éprouvée depuis longtemps. Les progrès à venir dans ce domaine devraient se limiter à réduire le coût des méthodes et des matériaux de fabrication et à incorporer de nouveaux procédés techniques (dispositifs à semiconducteurs et transistors) pour la commande électrique.

L'étude de l'évolution de l'énergie hydraulique peut également aider les pays en développement. On peut encore voir aux Etats-Unis (Nouvelle Angleterre), en Chine, en Suisse, dans les Balkans, en Norvège et en Suède de petites usines qui utilisent des turbines pour répondre à de nombreux besoins ruraux.

LE BELIER HYDRAULIQUE

Le bélier hydraulique est une pompe simple et ingénieuse qu'actionne uniquement l'eau courante, mise au point en Europe à la fin du 18ème siècle. Tout comme le moulin à eau, il était très répandu dans les pays industrialisés, mais a perdu du terrain lorsque la production et la distribution de l'énergie électrique sont devenues plus économiques. Il existe encore aux Etats-Unis un fabricant de béliers hydrauliques qui vend ces appareils dans le monde entier.

Le bélier hydraulique peut être décrit comme un dispositif entièrement automatique qui utilise l'énergie de l'eau courante pour pomper une partie de cette eau à une hauteur supérieure à celle de la source. Il peut aussi être utilisé pour comprimer l'air destiné à faire fonctionner les machines. C'est un appareil simple qui ne comprend que deux pièces mobiles.

Techniques Actuellement Disponibles

Le prix des béliers hydrauliques est actuellement compris entre 159 et 2.700 dollars environ, selon leur puissance.

Les béliers hydrauliques peuvent fonctionner 24 heures par jour pendant de nombreux mois sans entretien. On ne s'attend à aucune amélioration significative pendant les cinq prochaines années.

On peut se procurer les plans de construction d'un bélier hydraulique en s'adressant à l'USAID ou aux Volunteers in Technical Assistance*.

D'autres travaux de recherches et de réalisations ont été suggérés pour adapter le bélier hydraulique à la compression de l'air et l'utiliser dans des moteurs à pistons et des turbines.

LE COMPRESSEUR D'AIR HYDRAULIQUE OU TROMPE

La trompe, ou compresseur d'air hydraulique, est un appareil plus simple que le bélier. Elle ne contient aucune pièce mobile, mais utilise très efficacement l'énergie hydraulique pour comprimer de l'air. Ce système, qui fonctionnerait jour et nuit sans surveillance, pourrait stocker de l'énergie sous forme d'air comprimé qui peut être utilisé pour alimenter des turbines et des moteurs à piston, lesquels, à leur tour, peuvent alimenter des machines de production ou des génératrices électriques.

Nous proposons que des études à grande échelle soient consacrées à cet appareil simple et bon marché ; elles auront pour but de vérifier les données rares mais impressionnantes que la documentation fournit à son sujet.

*Voir p. vii pour plus de détails.

La photosynthèse

La seule source d'énergie renouvelable que l'homme a pu exploiter depuis la découverte du feu est la photosynthèse. Même si c'est la nature qui franchit la première étape en convertissant l'énergie solaire en une biomasse riche en énergie, le processus de la photosynthèse est l'objet de progrès techniques tout aussi perfectionnés que ceux du domaine de la photovoltaïque.

Depuis longtemps déjà, l'homme a découvert que les sous-produits du processus photosynthétique remplissaient d'importantes fonctions : alimentation, production de fibres et de combustibles, logement. Dans le contexte des questions ici considérées, l'exploitation de ces sous-produits constitue en fait une technique bien établie de conversion et de stockage d'énergie, mais leur mise en valeur systématique dans le domaine agronomique ne l'est certainement pas. C'est pourquoi le présent rapport met l'accent sur les ressources énergétiques qui peuvent être mises en valeur pour compléter des pratiques agricoles existantes dans les régions rurales.

La superficie dont dispose un village peut être divisée en terres arables et non arables. Nous nous intéressons ici essentiellement, mais non exclusivement, à l'utilisation la plus efficace des premières. Bien que le groupe se soit intéressé à la culture des plantes comme aliments énergétiques, le cadre dans lequel s'inscrit la présente étude n'a pas permis d'examiner l'utilisation finale des matières végétales produites. Cette utilisation sera sans aucun doute fonction des besoins de la population et des méthodes dont on dispose pour transformer la matière végétale en formes d'énergie plus utiles. C'est elle aussi qui déterminera de nombreux aspects des programmes de recherche, de réalisation et d'exploitation poursuivis (une technique de conversion est toutefois examinée dans la section relative à la conversion bactérienne).

Lorsqu'on considère l'agriculture du point de vue de la manière dont l'homme exploite la lumière et le soleil comme sources d'énergie, les critères sur lesquels s'appuient le choix et le calendrier de plantation des cultures diffèrent des critères traditionnellement appliqués. Des facteurs normalement méconnus deviennent alors très importants. Un des premiers qu'il conviendrait de prendre en considération est celui de la teneur en énergie de la matière végétale. C'est un facteur particulièrement important lorsqu'il y a un choix à faire entre les cultures vivrières ou les cultures à fibre possédant différentes quantités de résidus dont la teneur en énergie peut être exploitée.

Un deuxième facteur dont il faut tenir compte est que l'utilisation maximale de la lumière solaire disponible exige que les terres agricoles soient couvertes de plantes toute l'année si possible. Cela fait intervenir, par exemple, la multiculture, la culture intercalaire, les cultures protectrices (c'est-à-dire les cultures à maturation tardive qui sont plantées avec les cultures à maturation précoce de telle sorte que les premières seront déjà bien avancées lorsque les secondes seront récoltées) et l'utilisation de plantes de saison froide, chaude, humide et sèche lorsque les cultures traditionnelles ne peuvent être plantées. Naturellement, l'approvisionnement en eau ou tout autre facteur écologique peut empêcher une couverture toute l'année mais les terres nues doivent être couvertes de plantes vertes, car en l'absence de plantes vertes, il n'y a pas de photosynthèse.

Des expériences bien menées ont récemment permis de dégager un troisième concept. La plupart des plantes agricoles transforment en matière végétale moins de 1 pour 100 de l'énergie solaire disponible pendant une saison de croissance. Toutefois, certaines plantes, en raison d'un système photosynthétique plus efficace, peuvent convertir de 2 à 3 pour 100 de l'énergie solaire. Ces plantes, connues sous le nom de plantes "C_4*", requièrent des saisons de croissance chaudes et un ensoleillement considérable. Elles sont déjà cultivées sur une vaste échelle dans bon nombre de pays en développement, mais il conviendrait d'en envisager sérieusement la culture dans les climats appropriés où elles sont donc moins vulnérables à la sécheresse que maintes espèces courantes.

Enfin, il existe un autre groupe de plantes connu sous le nom de plantes MAC* qui, en raison d'une caractéristique métabolique génétiquement contrôlée, figurent parmi les plantes qui utilisent l'eau de la façon la plus efficace au monde et donnent de bons résultats dans les régions semi-arides. Ce sont des plantes à croissance lente, mais, dans les régions arides où les plantes pourraient être récoltées plusieurs années de suite (2 à 6 ans), elles pourraient rendre la terre plus fertile et mieux utiliser la quantité d'eau disponible.

*On en trouvera des exemples dans la deuxième partie de la section technique sur la photosynthèse.

Le choix à faire entre les plantes vivrières et les plantes à fibre est d'ordinaire régi par la tradition qui, à son tour, se fonde normalement sur une longue expérience des conditions écologiques. Toutefois, il faudrait entreprendre une réévaluation méticuleuse de ces facteurs, et notamment de facteurs fondamentaux comme l'irrigation, la température, l'intensité lumineuse et l'apport de substances nutritives, si l'on veut inclure parmi les objectifs de l'agriculture la captation maximale et le stockage de l'énergie solaire par les plantes. Les notions esquissées ici sont tirées des pratiques courantes et de l'étude des plantes existantes. Ces plantes devraient être expérimentées dans des régions données et sur plusieurs saisons de croissance ; certaines techniques d'implantation bien connues pourraient même être appliquées dès maintenant. Dans chaque région, il faudrait mettre au point, sur une période de 2 à 5 ans, des techniques destinées à maximiser la captation de l'énergie, en utilisant un grand nombre de variétés et de méthodes d'exploitation.

Conversion microbiologique de matières végétales en carburants liquides

Un autre processus où les phénomènes biologiques peuvent produire utilement de l'énergie est celui qui fait intervenir l'action de micro-organismes sur des couches de matière végétale et la collecte du produit combustible qui en résulte.

Par exemple, l'étude de la fermentation d'une variété de produits végétaux, destinée à produire des boissons alcooliques, art très ancien, a tout naturellement abouti à l'idée selon laquelle l'alcool pouvait être oxidé à l'extérieur plutôt qu'à l'intérieur du corps et, partant, pouvait être une source utile de chaleur sensible. En fait, le principal obstacle à l'exploitation de cette idée dans les régions rurales des pays en développement est la difficulté technique d'obtenir l'alcool (ou d'autres liquides combustibles produits par fermentation) sous une forme suffisamment pure pour qu'il puisse servir de combustible liquide.

La production d'alcool éthylique par fermentation (considéré comme processus chimique) est assez similaire à la production bactérienne d'acétone, d'alcool butylique et d'alcool isopropylique, tous des liquides imflammables. Ces processus font tous intervenir la croissance des populations bactériennes dans des conditions anaérobiques (sans contact avec l'air) en utilisant les substances nutritives découvertes dans diverses sources végétales et en transformant les hydrates de carbone (sucres et amidons) de ces sources en systèmes tels que : 1) l'alcool éthylique ; 2) l'acétone, l'alcool butylique, l'hydrogène ; 3) l'alcool butylique, l'alcool isopropylique, l'hydrogène ; 4) l'acétone, l'alcool éthylique, l'hydrogène.

Dans trois des cas mentionnés, on obtient aussi un combustible gazeux comme sous-produit, mais en petites quantités. Un processus similaire de

fermentation anaérobique produit de grandes quantités de méthane, autre combustible gazeux, mais ce processus, qui est l'objet d'une étude séparée, n'est pas étudiée dans le présent rapport*.

Toutes les matières ci-dessus ont été produites commercialement par des systèmes bactériens surtout durant les années quarante et au début des années cinquante, lorsque ces matières faisaient gravement défaut. Toutefois, à l'exception peut-être de l'alcool éthylique, elles sont aujourd'hui produites industriellement, par des moyens non bactériens, à partir de produits pétrochimiques. En fait, la plus grande partie de la production mondiale d'alcool éthylique est ainsi fabriquée de nos jours.

TECHNIQUES ACTUELLEMENT DISPONIBLES

S'il est vrai que les produits chimiques précités peuvent être effectivement utilisés comme combustibles liquides, il n'en reste pas moins que leur utilisation dépend de leur degré de concentration. Dans le cas contraire, l'eau présente dans ces produits entravera le processus de combustion (comme par exemple dans un moteur à combustion interne) ou diluera tout simplement la densité d'énergie – la chaleur dégagée par une masse donnée – au point de diminuer la valeur économique de la matière. Etant donné que les procédés bactériens produisent ces matières, dans une solution aqueuse contenant diverses autres substances en suspension ou en solution, la récupération sous une forme suffisamment concentrée est un facteur critique permettant d'évaluer l'utilité du procédé. Puisque la technique nécessaire à la séparation n'est vraisemblablement pas disponible en milieu rural, le groupe de travail ne pense pas que les processus bactériens puissent d'ici cinq ans être considérés comme applicables dans les villages des pays en voie de développement.

TECHNIQUES DISPONIBLES A COURT TERME

Pour que la production de combustibles à l'aide de processus bactérien devienne une réalité dans les régions rurales des pays en développement, il faudra étudier et mettre au point les matériaux, l'équipement et le traitement appropriés. Si l'on veut réduire l'investissement en capital, et abaisser le niveau des compétences actuellement exigé, il faudra recenser les matières premières que l'on peut trouver sur place, analyser la microbiologie et la chimie des processus de fermentation et étudier les méthodes et le matériel de récupération.

**Methane Generation from Human, Animal, and Agricultural Wastes*. Voir p. 327.

TROISIEME PARTIE

AUTRES TECHNIQUES

Energie géothermique

L'énergie géothermique, la chaleur naturelle que contient la terre, se trouve d'ordinaire à une trop grande profondeur sous l'écorce terrestre pour pouvoir être utilisée. Toutefois, dans les régions du monde qui ont connu une activité volcanique récente, il existe parfois des ressources géothermiques dont l'exploitation pourrait être rentable. On les trouve généralement dans les régions de sources chaudes on dans des zones où la roche chaude profonde est fissurée, ce qui permet à l'eau ou à la chaleur de circuler et d'atteindre la surface.

L'énergie géothermique peut ainsi être exploitée dans le monde entier dans des zones géographiquement bien définies. C'est une ressource qui ne peut être utilisée qu'à proximité du lieu où elle se trouve. Toutefois, lorsqu'elle est présente, elle fournit une source d'énergie permettant de produire de l'électricité, de chauffer les locaux, de sécher et de réfrigérer, tout en étant économiquement compétitive.

Les techniques actuelles de production d'électricité reposent sur la production et la séparation de la vapeur provenant d'une source d'eau chaude quelconque, ainsi que sur l'utilisation de la vapeur pour mettre en mouvement des turbines. L'eau chaude peut aussi être directement utilisée pour le chauffage de locaux.

TECHNIQUES ACTUELLEMENT DISPONIBLES

De nombreux pays ont actuellement recours à des techniques d'exploitation

des sources géothermiques*. Les systèmes à turbines géothermiques semblent avoir une existence de quelque trente ans ou plus. L'existence des puits semble être de 10 à 15 ans au moins, c'est-à-dire plus longue que dans le cas des puits d'eau chaude utilisés pour les systèmes de chauffage central.

Le coût d'une centrale géothermique va de 150 à 500 dollars par kilowatt et celui des puits de 70 à 100 dollars par kilowatt. Le coût minimal d'un programme de prospection peut être de 100.000 dollars et atteindre facilement 1 million de dollars si de nombreuses opérations de forage s'avèrent nécessaires.

Les projets d'énergie géothermique se sont révélés fiables. Les systèmes à eau chaude et à vapeur sèche fonctionnent au Japon, en Nouvelle-Zélande, au Mexique et aux Etats-Unis. L'expérience a montré que l'énergie géothermique remplit bien ses fonctions dans 80 à 95 per 100 des cas.

La fabrication locale de turbines et de génératrices géothermiques dépendra de l'existence d'une industrie manufacturière relativement moderne.

Les techniques de forage sont relativement simples pour les puits d'eau chaude peu profonds, mais sont beaucoup plus complexes pour ceux qui peuvent produire de l'eau bouillante et de la vapeur. Etant donné qu'on trouve partout dans le monde du matériel de forage pour le pétrole et le gaz naturel, et que ce matériel peut être directement adapté pour le forage géothermique, on peut en conclure que ce type de forage est également réalisable. Certaines opérations de forage géothermique peu profondes peuvent être effectuées avec des tours à cable relativement simples qui sont vraisemblablement utilisées dans bon nombre de pays en développement.

TECHNIQUES DISPONIBLES A COURT TERME

La plupart des nouvelles techniques géothermiques sont mises au point aux Etats-Unis. Un nouveau procédé d'exploitation des sources d'eau chaude ou de vapeur est le mécanisme à vis. Ce procédé emploie deux vis contra-rotatives

*Il est possible de se procurer une étude concernant ces techniques auprès de plusieurs sources, dont notamment deux grands colloques internationaux. Une série d'études sur l'énergie géothermique a été publiée dans le cadre des actes du Symposium des Nations Unies sur le développement et l'utilisation des ressources géothermiques tenu à Pise en 1970 et publiés comme numéro spécial 2, volume 1 du journal *Geothermics* (le numéro spécial 2, volume 2, parties 1 et 2 de *Geothermics* contient toutes les communications techniques présentées au colloque). Le deuxième Symposium sur le développement et l'utilisation des ressources géothermiques a eu lieu à San Francisco en mai 1975 et un résumé de 258 communications qui y ont été présentées a été publié par Lawrence Berkeley Laboratory de l'université de Californie, les actes complets du Symposium devant être publiés au début de 1976. En outre, la publication de l'Unesco, *Energie géothermique* (1973), renferme un recueil utile d'études sur l'énergie géothermique.

dans lesquels l'eau géothermique chaude se déplace et bout ; l'expansion de la vapeur fait tourner les vis, fournissant ainsi une force motrice qui, par l'intermédiaire d'un générateur, peut être transformée en énergie électrique. Patronné par la U. S. National Science Foundation, un programme expérimental qui porte sur un dispositif de 1,25 mégawatt, est en cours au Laboratoire de propulsion à réaction du California Institute of Technology.

Stockage de l'énergie

Aucune des sources intermittentes d'énergie décrites jusqu'ici—certainement pas celles qui sont soumises aux caprices du vent et du soleil—ne peut être envisagée sans qu'il existe une méthode de stockage pour conserver l'énergie, lorsque, par exemple, il n'y a ni vent ni soleil. Dans ces cas-là, le stockage d'énergie est essentiel, même si les techniques varient.

L'énergie peut être stockée sous des formes mécaniques, électriques, chimiques et thermiques, cette dernière étant une forme particulière d'énergie mécanique. Nous avons exclu les formes nucléaires de stockage d'énergie, car notre rapport se limite aux applications de l'énergie dans les régions rurales des pays en voie de développement.

Rares sont les systèmes efficaces de stockage d'énergie qui seraient applicables à court terme dans les collectivités rurales des pays en développement. Le stockage de l'énergie solaire destinée à servir directement d'énergie thermique est de nos jours possible et il est déjà employé dans des systèmes de chauffage d'eau et d'autres systèmes connexes (voir le chapitre sur le chauffage, le refroidissement, etc.). Dans des situations géologiques favorables, il est possible de réaliser un stockage réduit à recyclage hydro-électrique. L'électrolyse dont l'objet serait de fournir un combustible simple à de petits tracteurs, à de petits véhicules à faible autonomie, à la réfrigération, etc., pourrait être l'étape suivante à condition d'en encourager l'application et de pouvoir se procurer de l'électricité à partir du vent ou d'autres sources. Autre solution, les batteries (vraisemblablement au plomb au moins pour le proche avenir) peuvent fournir l'électricité nécessaire pour l'éclairage, la radio, etc. Un point fondamental qu'il convient de noter est que dans les pays industrialisés l'élec-

tricité est souvent utilisée pour des raisons de commodité, alors que dans les collectivités rurales des pays en développement une autre forme d'énergie pourrait être plus utile pour des raisons économiques. Le stockage d'énergie par air comprimé peut être utile, mais, pour s'en assurer, cette technique devra être étudiée de façon plus approfondie. Plus précisément, l'énergie mécanique peut être stockée sous forme d'énergie cinétique (volants) ou potentielle (systèmes hydrauliques, air comprimé, etc.). Le stockage hydraulique se présente d'ordinaire sous la forme de systèmes de recyclage hydro-électriques où l'eau est pompée à un niveau plus élevé pendant les périodes de production excédentaire et servira ensuite à produire de l'électricité par écoulement en période de forte consommation. Ce type de stockage est possible lorsque 1) la main-d'oeuvre est bon marché et 2) on dispose d'une superficie suffisamment étendue pour que les terres soient utilement exploitées de cette façon. L'énergie stockée sous forme d'air comprimé fait d'habitude intervenir l'utilisation de compresseurs ordinaires, mais le même résultat s'obtient avec des systèmes de compression hydraulique isothermiques. Ces derniers sont en général beaucoup plus efficaces et sont vraisemblablement plus faciles à appliquer dans les pays en développement du fait de leur simplicité et de l'absence de pièces mobiles.

L'énergie électrique ne peut être stockée que sous forme de champs électriques ou magnétiques (les batteries sont un système de stockage chimique), mais les conditions techniques sont extrêmement rigoureuses.

Hormis les batteries, qui transforment en électricité l'énergie des réactions chimiques, l'énergie peut être stockée chimiquement 1) par l'électrolyse (ou par des moyens biochimiques examinés ci-après qui produit de l'hydrogène destiné à la combustion directe ou à une utilisation indirecte dans des piles à combustion productrices d'électricité, et 2) sous la forme de combustibles produits par des techniques telles que les procédés bactériens ou les processus de synthèse des hydrocarbures à forte pression et à température élevée.

TECHNIQUES ACTUELLEMENT DISPONIBLES

Lorsqu'ils sont rentables, les systèmes de stockage hydro-électriques sont de nos jours techniquement réalisables. Bien que les composantes de génération existent sur le marché, elles sont plutôt onéreuses pour les petits systèmes. La possibilité de réduire le coût des systèmes est fonction à la fois de l'augmentation du volume de production d'unités normalisées et de l'utilisation de sites pour barrages où les coûts du terrain et de la main-d'oeuvre permettent la construction de réservoirs. Il est peu probable que d'autres travaux de recherche et d'aménagement réduiront sensiblement les coûts (ces génératrices sont étudiées plus en détail dans le chapitre qui a trait à l'énergie hydraulique).

Les systèmes de stockage d'énergie par air comprimé pourraient être commodément utilisés dans les pays en développement et les systèmes de compression isothermiques offrent des possibilités intéressantes. Le système de stockage d'énergie par compression hydro-isothermique a disparu aux environs de 1900, encore que ces dernières années il ait suscité un regain d'intérêt. On dispose de turbines à air et l'on connaît suffisamment bien la théorie de la compression isothermique pour que l'on puisse créer aujourd'hui des systèmes opérationnels. Ceux-ci seraient nettement plus onéreux que les génératrices électriques à moteur diesel (deux à trois fois plus coûteux peut-être), mais n'entraîneraient bien sûr aucun coût de combustible.

Leur utilisation dépendrait d'une étude soigneuse concernant les besoins de stockage d'énergie ; il faut en outre que ceux qui s'intéressent au stockage se rendent compte que ces systèmes peuvent réellement être construits. Ces systèmes devraient avoir une durée de vie extrêmement longue s'ils sont bien entretenus—50 ans ou plus peut-être—et devraient pouvoir être exploités facilement et à peu de frais. Il n'est guère nécessaire d'effectuer des recherches sur cette technique ni de la perfectionner encore, bien que certains systèmes doivent être construits pour démontrer leur rentabilité économique.

Il serait bon d'envisager la méthode à haute pression chaque fois que l'on possède un excédent d'électricité ou que l'on peut utiliser l'hydrogène comme combustible direct. L'électrolyse est réalisable à des pressions pouvant atteindre 300 bars et à des températures pouvant s'élever à 250° C avec des rendements très élevés. La pression requise peut être fournie par le gaz produit sans que l'on doive recourir à des pompes mécaniques. La température élevée peut généralement être obtenue en utilisant la chaleur qu'engendre le système lui-même. Dans les régions rurales des pays en développement, des systèmes électriques à entraînement éolien peuvent être utilisés pour fournir l'électricité nécessaire à la fabrication de l'hydrogène. Lorsqu'il n'y a pas de fuel-oil ou lorsqu'il faut le payer un dollar ou plus le gallon (U.S.) livré sur les lieux, une combinaison de génératrices à vent et d'unités d'électrolyse devrait être sérieusement envisagée. De nos jours, il existe des systèmes techniquement capables de produire de l'hydrogène, que l'on pourrait obtenir très rapidement si le marché est favorable.

L'utilisation de l'hydrogène qui en résulte est une autre question. La majeure partie des travaux de caractère expérimental ont porté sur l'alimentation de moteurs à combustion interne par de l'hydrogène. La commercialisation de ces moteurs serait possible s'il existait un marché. Même de nos jours, il est très possible que ces appareils soient réalisables à court terme (d'ici cinq ans). L'implantation rapide d'une telle industrie pourrait être encouragée par une autre pénurie plus probable de pétrole à l'échelle mondiale, même dans des proportions plus limitées. Cette technique peut être considérée comme une politique "d'attente en coulisse". Pour qu'elle puisse être proposée aux

pays en développement dans les cinq années qui suivent, sa mise au point devrait avoir lieu dans les pays techniquement avancés. Des travaux considérables de recherche et d'application pratique sont encore nécessaires. Appareils de chauffage, séchoirs de céréales et autres dispositifs devraient être construits pour ce combustible dans un avenir proche. Il serait également souhaitable de construire sans tarder des prototypes de mini-tracteurs et de mini-camions.

Enfin, l'énergie stockée sous forme thermique est utilisée de nos jours dans les pays en voie de développement, normalement pour chauffer l'eau ou les logements. Cette question est examinée dans le chapitre qui traite du chauffage, du refroidissement, de la distillation, du séchage des céréales et de la production d'hélio-électricité.

TECHNIQUES DISPONIBLES A COURT TERME

Mise à part l'existence future des techniques déjà mentionnées, il semble peu probable que d'autres systèmes de stockage d'énergie soient créés au cours des cinq prochaines années à l'intention des pays en développement, comme en témoignent les travaux de recherche et de mise au point actuels ou envisagés.

Le stockage de l'énergie sous forme électrique (c'est-à-dire sous forme de champ électrique ou magnétique), n'est vraisemblablement pas réalisable en pratique aujourd'hui ou dans un avenir proche, tant pour les pays en développement que développés. Même si l'on disposait de diélectriques parfaits et de super-conducteurs parfaits, les densités de stockage sont tout à fait insuffisantes. Les projections économiques sont à ce point décourageantes qu'elles nous empêchent de proposer ici un examen plus approfondi de la question.

Ces dernières années, des millions de dollars ont été consacrés à la mise au point de types spéciaux d'accumulateurs. Bien que cet effort ait, dans une large mesure, été axé sur l'application de ces accumulateurs à des véhicules électriques, une nouvelle batterie économique, si elle était fabriquée, pourrait être généralement appliquée comme dispositif de stockage d'énergie. Malheureusement, les recherches n'ont encore abouti à aucune batterie économique et il est difficile d'envisager qu'au cours des dix prochaines années un dispositif de ce genre puisse être appliqué dans les pays en développement.

Il est également possible de synthétiser des hydrocarbures grâce à la technique d'hydrogénation des matières organiques existant sous une forme naturelle. Cette synthèse peut se faire à des températures élevées (environ 500° C) et à des pressions élevées (environ 600 bars), mais la technique n'est sans doute pas utilisable dans le context ici considéré et ne sera probablement pas applicable avant dix ans.

L'emploi de volants cinétiques pour stocker l'énergie d'une durée de plus de quelques secondes ne deviendra réalité que si l'on parvient à créer, comme le proposent de nombreux ouvrages techniques, le super-volant. Tant qu'il n'aura pas été construit, nous ne saurons pas vraiment s'il est viable ou non. Quoi qu'il en soit, cette technique ne sera pas applicable avant cinq ans au moins, surtout dans les pays en développement.

RECHERCHES ET REALISATIONS

En étudiant chaque technique particulière, nous avons signalé les domaines où les recherches et les réalisations pourraient avoir une incidence significative sur l'offre. Qu'il nous soit cependant permis ici de faire quelques observations d'ordre général.

Comme on l'a dit dans le chapitre sur l'énergie hydraulique, les travaux de recherche et de réalisation sur les matériaux pourraient réduire dans une certaine mesure les coûts des petites génératrices hydro-électriques. Bien qu'elle soit de nos jours techniquement réalisable, la production d'hydrogène par électrolyse à pression et à température élevée sur une petite échelle peut vraisemblablement être rendue plus avantageuse pour les pays en développement par la simplification des techniques intervenant dans la fabrication de ces génératrices. L'emploi d'hydrogène dans les moteurs à combustion interne dépend sans aucun doute des travaux de recherche et des réalisations qui se poursuivent dans ce domaine. D'autres perfectionnements techniques sont aussi nécessaires pour les appareils de chauffage et les sécheurs de céréales afin qu'on puisse les adapter à une meilleure utilisation de ce combustible.

Enfin, bien que d'importants travaux de recherche et de réalisation soient nécessaires avant que le stockage par volant, la synthèse d'hydrocarbures, le stockage par batteries et le stockage électrique ne puissent être mis en pratique, aucune de ces techniques ne sera applicable dans les régions rurales des pays en développement au cours les des prochaines années.

SECTION TECHNIQUE

PREMIERE PARTIE

EMPLOIS DIRECTS DE L'ENERGIE SOLAIRE

Chauffage, refroidissement, distillation, séchage des cultures et production d'électricité

L'énergie solaire est une vaste ressource énergétique dont disposent de nombreuses régions où la densité démographique est souvent faible et où les ressources énergétiques conventionnelles peuvent être onéreuses. En dehors de l'agriculture et, dans une moindre mesure, de l'extraction du sel de mer par évaporation, l'énergie solaire n'est pas directement employée sur une vaste échelle dans les pays en développement. Cela est aussi le cas dans les pays industrialisés. Les autres applications dans les pays à capacités techniques avancées portent sur le chauffage de l'eau ménagère et la production d'électricité en très petites unités, principalement par le jeu de dispositifs voltaïques à bord d'engins spatiaux.

Si les applications "utiles" sont encore rares, il existe en revanche dans le monde de nombreux systèmes exploitant l'énergie solaire à titre d'expérience. Ces systèmes fonctionnent dans plusieurs pays industrialisés, en particulier aux Etats-Unis, en Union Soviétique, en Australie, au Japon, en France, en Italie, en Israël, en Inde et au Canada. Dans ces pays, les expériences couvrent une vaste gamme d'utilisations possibles de l'énergie solaire, notamment, la production d'énergie électrique sur une petite échelle, le chauffage et le refoidissement de bâtiments, le dessalement de l'eau par évaporatation, la cuisson, la réfrigération des aliments, la transformation de matériaux à température élevée, le séchage solaire spécialisé. Il existe aussi quelques modes d'exploration combinés.

Des deux emplois commerciaux actuels de l'énergie solaire dans les pays industrialisés, le chauffage de l'eau dans les ménages et les établissements, ainsi que les systèmes miniatures d'énergie utilisant des cellules photo-

voltaïques, seuls les chauffe-eau peuvent être considérés commercialement viables à ce stade. Le coût extrêmement élevé des convertisseurs voltaïques en empêche l'utilisation pour la production d'électricité dans les applications terrestres qui exigent plus de quelques watts. Toutefois, une réduction considérable du coût de ces systèmes pourrait rapidement en accroître l'utilisation. (Cette question est examinée dans le chapitre sur les dispositifs photovoltaïques.)

Bien que son utilisation ne soit pas encore généralisée, le chauffage solaire des bâtiments aux Etats-Unis—en particulier des résidences privées—est sur le point d'être commercialisé. Des systèmes de chauffage solaire sont actuellement installés et plusieurs fabricants vendent à titre d'essai des composants et des systèmes complets de chauffage par énergie solaire. Cette application devrait prendre rapidement de l'ampleur dans les régions à climat favorable et devrait être considérée comme une solution de rechange possible au chauffage par combustible dans les pays en développement où le chauffage est une nécessité. Comme on peut dès aujourd'hui acheter sur le marché un vaste éventail de dispositifs de chauffage par énergie solaire, la liste des fabricants figure à l'annexe 2 ; le lecteur intéressé pourra s'y reporter pour obtenir des sources d'information commerciales. Bien que cette liste ne soit nullement complète (l'énergie solaire est un domaine qui semble attirer des projets d'exploitation commerciale de toutes dimensions, elle donne une idée de la variété de fabricants et d'exploitants qui ont mérité l'attention du groupe de travail. Il convient cependant de faire remarquer qu'aucune méthode normalisée d'évaluation des résultats n'a encore été établie—par exemple, le National Bureau of Standards aux Etats-Unis n'a pas encore achevé ses travaux sur les méthodes normalisées que doit utiliser l'industrie américaine. En conséquence, la liste ne donne aucun détail concernant les spécifications.

Comme la production de l'énergie électrique par des moyens photovoltaïques a été traitée par de nombreux ouvrages et a fait l'objet de nombreuses expériences, le présent rapport lui a consacré un chapitre séparé.

CHAUFFE-EAU SOLAIRES

Les chauffe-eau solaires sont une découverte assez récente fondéee sur un phénomène naturel : de l'eau froide dans un récipient exposé au soleil se réchauffe. Sous sa forme moderne, le chauffe-eau est essentiellement un collecteur à fond plat et un réservoir de stockage isolé. Le collecteur est normalement composé d'une plaque de métal noirci solidaire d'une canalisation métallique. La face supérieure est d'ordinaire revêtue de verre et la face inférieure d'un matériau isolant. Les canalisations du collecteur sont reliées à un réservoir où est stockée l'eau chaude pour utilisation pendant les périodes sans soleil. Installé sur un toit ou sur un autre support approprié, le collecteur

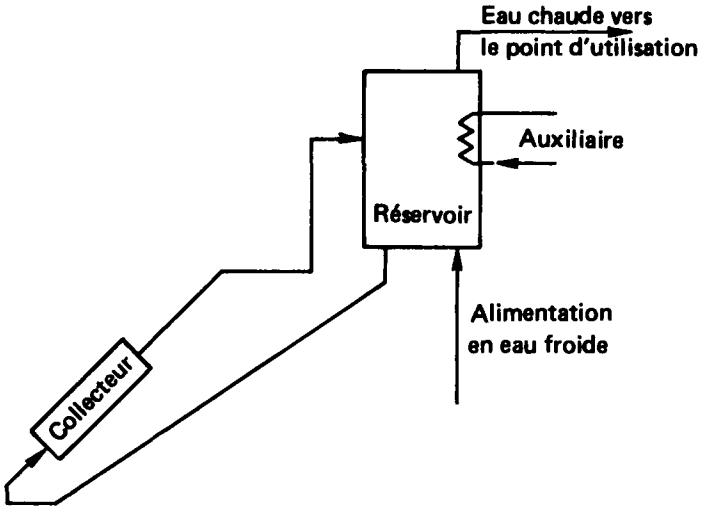


FIGURE 1 Schéma d'un chauffe-eau solaire avec addition d'énergie auxiliaire au réservoir de stockage. Réf. 2 [Avec l'autorisation de John Wiley & Sons, Inc.]

absorbe le rayonnement solaire ; la chaleur est absorbée par l'eau qui circule dans les tubes et l'eau chaude s'accumule dans le réservoir de stockage. Sauf exception, le réservoir de stockage est situé au sommet du collecteur. La position élevée du réservoir permet une convexion naturelle : l'eau circule du collecteur au réservoir et aucune pompe n'est requise. La Figure 1 illustre une disposition typique. La Figure 2 montre comment le système est modifié lorsque la circulation par convexion naturelle (thermosiphon) n'est pas disponible. Un collecteur d'une superficie de 3 à 4 m^2 combiné à un réservoir isothermique de 200 à 400 l peut fournir de 200 à 300 l d'eau chaude à 60°C environ par journée moyenne d'ensoleillement dans un climat favorable (cette quantité n'est normalement pas suffisante pour une famille de quatre personnes aux Etats-Unis). Cette technique a été brèvement décrite dans un texte publié en Australie[1].

Emplois Passés et Présents

Plusieurs pays utilisent des chauffe-eau solaires depuis de nombreuses années. Ces chauffe-eau ont été utilisés pour la première fois sur une grande échelle aux Etats-Unis ; on en a fabriqué et vendu des milliers dans le sud de la Californie entre 1900 et 1920 et dans le sud de la Floride entre 1920 et 1940. Leur nombre a diminué lorsque le gaz naturel est venu fournir un moyen de réchauffer l'eau courante à meilleur prix. Avec l'évolution de la structure des

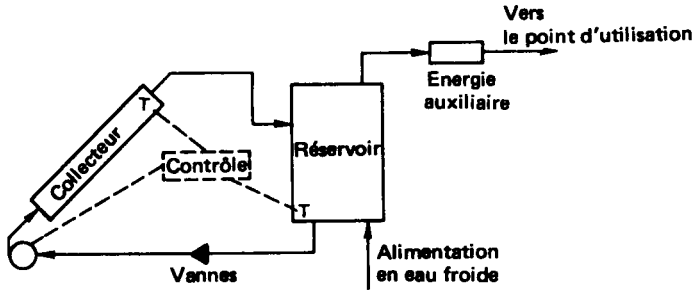


FIGURE 2 Schéma d'un chauffe-eau par l'énergie solaire avec circulation forcée et auxiliaire sur la tuyauterie d'utilisation. Réf. 2 [Avec l'autorisation de John Wiley & Sons, Inc.]

prix des carburants fossiles, les chauffe-eau solaires sont à nouveau fabriqués aux Etats-Unis en petite série.

Après 1950, des modèles nettement plus perfectionnés ont été mis au point en Israël, en Australie et au Japon. Le modèle général décrit ci-dessus a été obtenu en améliorant le contact thermique entre la plaque de métal noircie et les tubulures, ainsi que par la mise au point de surfaces noircies qui permettent d'obtenir une quantité supérieure d'énergie solaire nette. La technique du collecteur et celle du système de base sont étudiées par Duffie[2]. Les entreprises commerciales en Israël ont commencé à fabriquer et à vendre des chauffe-eau solaires pour le marché national et international ; de 10.000 à 15.000 unités par an ont été vendues. A l'heure actuelle, quelque 20 pour cent des ménages en Israël possèdent un chauffe-eau solaire.

En Australie, les chauffe-eau ont pu être perfectionnés (voir ci-dessous) grâce à des études d'exploitation réalisées dans les années ciquante et au début des années soixante ; les résultats ont permis à plusieurs fabricants d'en aborder la production. Il existe de nos jours une industrie bien établie dans ce pays qui fabrique 1,5 million d'unités environ par an. Dans certains districts, en particulier dans le nord de l'Australie, l'eau courante est chauffée presque exclusivement par l'énergie solaire.

Techniques Actuelles (Disponibles d'ici cinq ans)

En Australie, les absorbeurs ménagers (collecteurs) mesurent normalement de 0,8 à 1,6 m^2 avec une capacité de stockage de 300 l ; ils peuvent être dotés d'une résistance électrique d'appoint d'un kilowatt à commande thermostatique et produisent jusqu'à 180 l d'eau chaude par jour. Dans les installations domestiques l'eau circule en thermosiphon, ce qui permet plusieurs passages par l'absorbeur sans pompe, bien que de grandes entreprises commerciales et

industrielles qui fournissent plusieurs milliers de litres d'eau chaude par jour utilisent un dispositif de circulation forcée à commande thermostatique. Un groupe de constructions résidentielles à Darwin possède neuf groupes distincts de chauffe-eau solaires produisant au total 13.000 l d'eau chaude par jour environ. Les chauffe-eau solaires s'avèrent la manière la plus économique de fournir de l'eau chaude à de nombreuses régions d'Australie, particulièrement dans le territoire du Nord où le gouvernement a pour politique d'installer des chauffe-eau solaires dans tous les bâtiment publics.

Au Japon, on a fabriqué et vendu des centaines de milliers de chauffe-eau solaires dont le modèle le plus courant combine les fonctions de collecte et de stockage pour produire de l'eau chaude utilisée en fin de journée. Au moyen de conduites plastiques de 10 cm de diamètre par exemple – posées les unes à côté des autres sous un couvercle de verre – l'eau est chauffée et stockée dans les mêmes récipients[3]. En temps normal, 75 à 200 l d'eau froide fournis à l'unité le matin sont chauffés par le soleil pendant la journée de sorte qu'en fin d'après-midi l'eau atteint des températures de plus to 40°C. L'eau chaude est normalement utilisée dans sa totalité en début de la soirée pour le bain ou à d'autres fins. Ces unités fonctionnent généralement sans pression hydraulique de la canalisation alors que le modèle comprenant des collecteurs métalliques et des réservoirs de stockage distincts pourrait fonctionner à la pression commerciale s'il était adapté à cet usage.

Des expériences ont eu lieu dans de nombreux pays avec des chauffe-eau solaires, mais, à la connaissance du groupe de travail, leur utilisation dans les pays autres que les Etats-Unis, Israël, l'Australie et le Japon a été à ce jour assez limitée. La production de chauffe-eau solaires a commencé au Niger (Figure 3) et il est possible que plusieurs autres pays en aient déjà entrepris la production en petite série.

Coût

Le coût des chauffe-eau solaires varie sensiblement d'après la qualité du produit, mais, en règle générale, celui des modèles à collecteur métal/verre et réservoirs de stockage isolés est de $100/m^2 environ aux Etats-Unis. Pour une installation familiale d'une superficie de 3 m^2 et d'une capacité de 200 l, on peut supposer un coût total installé de 300 dollars environ. Le modèle de chauffe-eau solaire le plus couramment utilisé au Japon (qui ne fournit de l'eau chaude qu'en fin de journée et combine collecteur et stockage) coûte de 100 à 150 dollars.

Fiabilité (Durée de Vie et Entretien)

Sous sa forme la plus simple, le chauffe-eau solaire ne comprend aucune pièce mobile et n'exige qu'un entretien minimum. C'est essentiellement un système

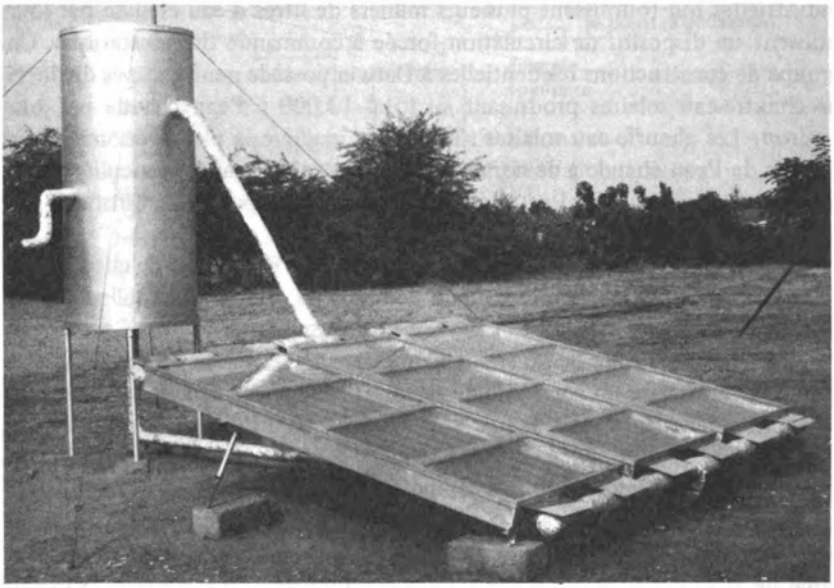


FIGURE 3 Chauffe-eau solaire, Niamey, Niger.

sans problème de plomberie d'une durée de vie d'environ dix ans ou plus ; son entretien dépend surtout du taux de corrosion ou des dépôts métalliques dûs aux substances dissoutes dans l'eau.

Recherches et Réalisations

La technique du chauffe-eau solaire est bien connue et il convient essentiellement de chercher à l'adapter aux matériaux et aux capacités de fabrication du pays. Grâce à cette technique, hôpitaux, écoles, industries, établissements et ménages pourraient disposer d'eau chaude sur une échelle beaucoup plus grande. La nature du matériel est telle que celui-ci peut être fabriqué dans les pays en développement et adapté à leur situation sans aucune difficulté.

CHAUFFAGE ET REFROIDISSEMENT DES BATIMENTS – CHAUFFAGE DES LOCAUX A L'ENERGIE SOLAIRE

Bien que le chauffage des logements ne soit pas un problème essentiel dans la plupart des pays en développement, le chauffage de certaines pièces améliorerait sans aucun doute les conditions de vie. Dans son ensemble, l'architecture traditionnelle a cherché en partie à atténuer au maximum les variations

Digitized by Google

de température des logements. Elle l'a fait en concevant des ouvertures pour contrôler l'admission des rayons du soleil et en créant une capacité de chauffage des logements propre à modifier au maximum la température (basse ou élevée) indésirable. Toutefois, les méthodes de construction traditionnelles n'ont pas toujours été suivies en période d'accroissement démographique rapide. Le chauffage des locaux dans les pays en développement, spécialement dans les bâtiments à architecture non traditionnelle, est un problème limité qui peut être résolu en appliquant des principes bien établis. Les progrès scientifiques modernes peuvent être appliqués à la conception d'un bâtiment pour contrôler toutes les températures extrêmes. Ils englobent les surfaces réflectives, les avancées de toiture réglementées, l'utilisation de matériaux d'isolement et la conception du toit.

Emplois Passés et Présents

La technique de chauffage solaire des locaux où l'eau sert d'intermédiaire est essentiellement un prolongement de la technique utilisée dans le chauffage de la technique utilisée dans le chauffage de l'eau par énergie solaire, sauf que l'énergie doit être extraite du réservoir à l'aide d'un échangeur de chaleur (Figure 4). La technique et ses applications ont fait l'objet de nombreuses études[2,4]. Bien que la commercialisation des systèmes de chauffage par énergie solaire en soit à ses débuts, un nombre considérable de bonnes installations expérementales ont été construites et fonctionnent depuis plusieurs années[5]. Des collecteurs et des unités de stockage beaucoup plus grands que ceux utilisés dans les chauffe-eau solaires sont nécessaires pour satisfaire la majeure partie des besoins en chauffage d'une résidence typique dans un climat ensoleillé.

En dehors du chauffage par énergie solaire, des systèmes d'énergie conventionnelle sont indispensables pour assurer un degré élevé de fiabilité. Dans les

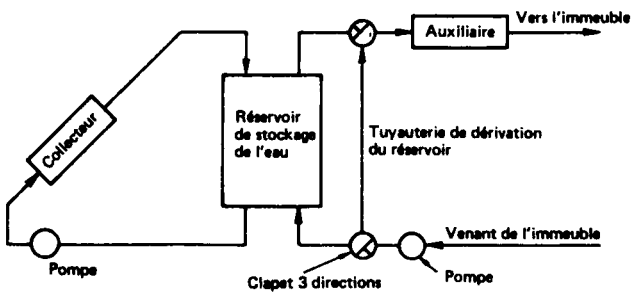


FIGURE 4 Schéma d'un circuit fondamental d'eau chaude. Réf. 2 [Avec l'autorisation de John Wiley & Sons, Inc.]

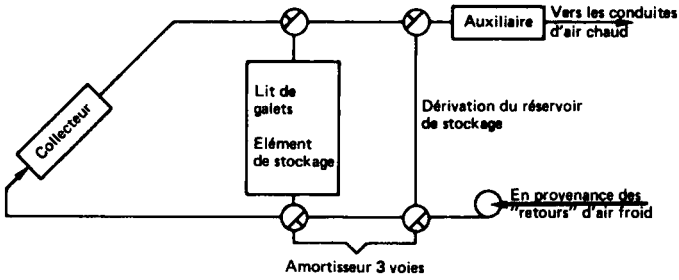


FIGURE 5 Schéma d'un circuit fondamental d'air chaud. Réf. 2 [Avec l'autorisation de John Wiley & Sons, Inc.]

climats où peuvent survenir des températures basses, la source d'énergie conventionnelle devrait pouvoir satisfaire le besoin résiduel d'énergie. Un problème économique essentiel à résoudre est celui qui consiste alors à équilibrer les économies de combustible rendues possibles par le système d'énergie solaire et les coûts d'équipement. (Noter que dans les pays en développement un autre facteur économique important pourrait être celui du capital disponible.)

Les systèmes qui emploient l'air comme agent de transfert thermique entre le collecteur et un récipient de stockage contenant des petites roches (Figure 5) on été utilisés avec succès. La chaleur du soleil est stockée dans les roches et récupérée, lorsqu'on en a besoin, par le passage de l'air sur les roches et, de là, par son acheminement vers les locaux à chauffer.

On a construit plusieurs dizaines de maisons qui utilisent l'énergie solaire comme agent de chauffage. Elles fonctionnent avec un système de chauffage qui comprend le collecteur, l'unité de stockage de chaleur, un chauffeur auxiliaire et des systèmes appropriés de distribution et de contrôle du chauffage. Bon nombre de ces maisons ont été construites avec soin ; Les résultats obtenus ont été mesurés et publiés. D'autres ont été érigées par des partisans enthousiastes de cette méthode. Concepts et conceptions[6-10] se caractérisent par des divergences notables. Des études économiques détaillées ont également été faites, qui peuvent s'appliquer aux économies industrielles[11,12] et qui montrent que le chauffage par énergie solaire devrait être en mesure de fournir de l'énergie à des taux qui fassent concurrence aux autres méthodes dans de nombreuses régions. Une étude de viabilité sur le chauffage par énergie solaire en Iran[13], par exemple, montre que ce système peut être rentable dans ce pays.

Techniques Actuelles (Disponible d'ici cinq ans)

En ce qui concerne l'application de l'énergie solaire aux Etats-Unis, les experts sont arrivés à plusieurs conclusions permettant d'en évaluer l'application

possible dans les pays en développement. En premier lieu, des systèmes d'énergie solaire ont été construits il y a de nombreuses années et fonctionnent normalement depuis lors, contribuant à satisfaire les besoins en chauffage des maisons. En deuxième lieu, les principes de la conception de plusieurs systèmes sont bien établis et on peut en prédire le comportement avec une certitude limitée plus par les changements de température que par n'importe quel autre facteur. Troisièmement, au fur et à mesure que le coût des combustibles augmente, le chauffage par énergie solaire fait de plus en plus concurrence au chauffage par combustible ou au chauffage électrique dans de nombreuses régions des Etats-Unis. Des centaines d'habitations possèdent déjà des systèmes de chauffage par énergie solaire.

Coût

Le principal obstacle à une utilisation généralisée du chauffage par énergie solaire est le coût du système par rapport à la valeur du combustible que son emploi permet d'économiser. Dans les pays industrialisés, le chauffage à l'énergie solaire ne pourrait concurrencer les méthodes conventionnelles de chauffage employant des combustibles comme le pétrole, le gaz naturel et le gaz de pétrole liquéfié. Seule l'électricité est suffisamment coûteuse pour que l'énergie solaire puisse lui livrer concurrence. Ces deux dernières années cependant, le prix des combustibles fossiles liquides et gazeux a monté si rapidement que le chauffage des bâtiments à l'énergie solaire pourrait bientôt devenir compétitif.

La plupart des études montrent que, dans des climats tempérés, il n'est pas pratique d'assurer à 100 pour cent le chauffage des locaux au moyen de l'énergie solaire. Les systèmes qui cherchent à satisfaire la majorité des besoins annuels en chauffage dans les régions où règnent des conditions atmosphériques variables sont le plus souvent trop importants ; en outre, les intérêts et les commissions payables sur ces systèmes les rendraient trop onéreux. La raison essentielle pour laquelle les chauffe-eau à énergie solaire sont compétitifs, alors que les appareils de chauffage ne le sont pas, est la différence entre la charge imposée à l'un et à l'autre des deux systèmes. Le chauffe-eau est utilisé toute l'année chaque fois que l'énergie solaire est disponible, alors que l'appareil de chauffage des locaux ne l'est que pendant l'hiver. C'est pourquoi le rendement utile net du chauffe-eau à énergie solaire est deux à trois fois plus élevé que celui du chauffage des locaux, par unité de surface du collecteur, c'est-à-dire par unité de coût d'équipement. Compte tenu de ce facteur ainsi que du coût très élevé (plusieurs milliers de dollars) d'un système complet de chauffage de locaux par énergie solaire, ce dernier n'a guère fait l'objet d'applications dans les pays industrialisés et moins encore dans les pays en développement. Les récentes hausses brutales du prix

des combustibles ont changé cette situation aux Etats-Unis, au Japon et dans d'autres pays où le chauffage par énergie solaire évolue rapidement sur le plan commercial.

Le fait qu'il n'est pas pratique d'avoir recours à un système de chauffage par énergie solaire comme seule source de chaleur pour un bâtiment peut en outre en limiter l'utilité pour le chauffage de locaux dans les pays en développement à climat froid. Alors que les chauffe-eau à énergie solaire peuvent n'être utilisés que par intermittance – l'eau chaude faisant parfois défaut – le chauffage des locaux est indispensable pratiquement sans interruption pendant la saison froide. Comme la plus grande demande de chaleur peut survenir pendant les périodes sans soleil, tout système de chauffage par énergie solaire doit inclure un dispositif conventionnel dont la capacité est suffisante pour maintenir le local habitable. Comme il faut donc pouvoir aussi disposer d'un combustible chaque fois que le chauffage des locaux s'effectue par énergie solaire, l'utilisation de ce système dans les pays en développement risque d'être limité.

L'un des principaux problèmes de conception est évidemment la difficulté de trouver la combinaison la plus économique entre l'énergie solaire et les combustibles conventionnels ; les études montrent que les systèmes optimum de chauffage par énergie solaire fourniront des deux tiers aux trois quarts peut-être du chauffage annuel aux prix courants des combustibles. Toute nouvelle hausse du prix des combustibles fera monter ces fractions jusqu'à 90 pour cent peut-être dans certaines conditions.

Recherches et Réalisations

Les activités de recherche et de réalisation en matière de chauffage à l'énergie solaire ont pour la plupart porté sur des applications dans les climats tempérés de pays industrialisés. En raison de l'enchérissement des combustibles, ces activités s'intensifient actuellement aux Etats-Unis et dans d'autres pays industrialisés. Auparavant, les experts s'intéressaient essentiellement à l'application du chauffage solaire aux résidences familiales individuelles ; aujourd'hui ils cherchent à résoudre les problèmes du chauffage solaire des logements multifamiliaux et des établissements. Un des principaux événements des deux dernières années est l'intérêt que témoigne l'industrie pour la fabrication et la vente du matériel de chauffage solaire. C'est là une condition indispensable à une application généralisée ; tant que les entreprises locales de chauffage ne peuvent acheter et installer le matériel, ce concept demeurera en grande partie théorique.

Le chauffage par énergie solaire dans les régions en développement pose une série de problèmes auxquels on n'a jusqu'ici guère prêté d'attention. Parmi les diverses techniques possibles, la première fait intervenir une structure qui

utilise des éléments comme la surface des vitrages, les zones d'ombre, l'isolement, la masse thermique des bâtiments et certaines peintures en vue de diminuer les besoins de chauffage. Une deuxième consiste à concevoir des systèmes de chauffage qui peuvent fonctionner sans que la circulation des liquides n'exige d'énergie mécanique. Plusieurs systèmes ont été proposés et étudiés (par exemple, la maison solaire d'Altenkirch[14] et les logements d'Odeillo en France[15]) qui utilisent seulement une convexion naturelle ; le procédé pourrait être avantageusement appliqué aux petites résidences (la Figure 6 montre une maison expérimentale). Une troisième technique consiste à adapter des systèmes de chauffage solaire (avec circulation mécanique) qui ont été mis au point pour être utilisés dans des pays industrialisés, vraisemblablement dans de grands bâtiments des régions urbaines où les besoins annuels en chauffage sont considérables.

On ignore pratiquement tout des besoins de chauffage des locaux dans les pays en développement. Pour mesurer le rôle potentiel de l'énergie solaire, il convient donc d'entreprendre une évaluation région par région de ces besoins portant notamment sur le climat, l'utilisation des combustibles, les plans typiques des bâtiments et d'autres facteurs.

CHAUFFAGE ET REFROIDISSEMENT DES EDIFICES – CLIMATISATION SOLAIRE

Un système conventionnel de climatisation fonctionne par compression de la vapeur et vaporisation subséquente par expansion dans une chambre à basse

FIGURE 6 Habitation chauffée par l'énergie solaire, Odeillo, France.

Digitized by Google

pression. L'air est refroidi en lui enlevant la chaleur nécessaire pour la vaporisation du liquide. Le cycle est répété lorsque la vapeur est ramenée à une pression à laquelle elle peut être condensée ; la chaleur de vaporisation, expulsée à une température plus élevée que celle de la chambre refroidie, est rejetée à l'extérieur ou écoulée dans l'eau.

On peut obtenir une climatisation solaire selon les mêmes procédés au moyen de la conversion mécanique de l'énergie solaire assurant le fonctionnement d'un compresseur. Le besoin de force mécanique découlant de l'énergie solaire, son coût relativement élevé peut être évité grâce au cycle de réfrigération d'absorption[2,16]. Avec ce procédé, la pression de la vapeur réfrigérante est élevée par la chaleur plutôt que par compression mécanique. Le réfrigérant vaporisé est récupéré pour être recyclé par l'absorption dans une solution composée du réfrigérant et de sel. La basse pression de la chambre d'expansion et de vaporisation est maintenue par la réduction de la pression de la vapeur du réfrigérant au-dessous du produit l'absorbant (solution) et la vapeur est reproduite lorsque les solutions du réfrigérant et de l'absorption sont renvoyées dans les générateur qui doit recevoir la chaleur solaire.

L'application de ce procédé dans les climats tempérés a suscité quelque intérêt ; on peut aussi recourir à d'autres méthodes comme la dessication de l'air à l'aide de produits desséchants reconstitués par la chaleur solaire. La viabilité technologique semble être assurée et les perspectives économiques sont encourageantes. Pour ce qui est du chauffage des locaux, il est possible de construire des édifices pour augmenter le confort et réduire les besoins énergétiques.

Le refroidissement solaire est un procédé qui n'est pas aussi perfectionné que le chauffage solaire. On a procédé à deux essais complets seulement (Colorado State University House[17]), dont les résultats, pourtant assez concluants, ont révélé que le coût de l'opération était élevé par rapport au refroidissement conventionnel à compression. Ces études, qui cherchent surtout à appliquer le procédé aux Etats-Unis, en Australie et au Japon, sont encore à un stade préliminaire.

La plupart des mises au point ont porté sur l'utilisation d'un fluide chauffé par énergie solaire dans un cycle de réfrigération d'absorption comme celui décrit ci-dessus; on utilise généralement un mécanisme à base de bromure de lithium agissant comme absorbant-réfrigérant. Les températures auxquelles sont réalisées les opérations sont compatibles avec des capteurs solaires plats, ce qui permet l'adaptation d'un climatiseur commercial à une source de chauffage solaire par substitution de fluide chauffé par l'énergie solaire à une source conventionnelle de chaleur.

Dans les régions où il est difficile d'obtenir des capitaux—que l'on prête d'ailleurs à un taux fort élevé—les perspectives concernant le refroidissement solaire semblent être limitées sauf dans les édifices commerciaux et

publics pour la construction desquels on peut obtenir des crédits. On peut raisonnablement s'attendre à ce que les coûts des systèmes de refroidissement solaire soient fortement réduits lorsqu'on disposera de plus amples informations et qu'une plus grande expérience aura été acquise.

Il convient surtout de souligner que pour la climatisation solaire, on utilise les mêmes systèmes de collecte et de stockage que pour le chauffage en hiver. Par conséquent, le système utilisé conjointement avec le système de chauffage solaire, en supposant des conditions climatiques exigeant toute l'année soit le chauffage soit le refroidissement, permet de relever fortement le coefficient de charge sur un équipement solaire onéreux[18]. Grâce à ces facteurs, la rentabilité se rapproche de celle du chauffe-eau solaire. Cependant, les coûts du refroidissement par absorption sont bien plus élevés que ceux du refroidissement par compression.

Application dans les pays en développement

La conception de systémes de climatisation destinés aux pays en développement pose des problèmes d'élaboration et d'utilité dont la solution ne pourra que difficilement dépendre des critères établis par les pays industrialisés. Il a été suggéré que la climatisation d'usines et de bureaux augmenterait de manière considérable la productivité du personnel ; on pourrait l'installer également dans les résidences et les édifices communautaires. La conception d'un système sans énergie mécanique pose aussi des problèmes techniques. Outre le fonctionnement par énergie solaire de refroidisseurs par absorption mécanique ou à circuit fermé (décrits ci-dessus), on peut avoir recours à d'autres méthodes de refroidissement comme le procédé d'humidification-dessication à cycle ouvert[19], les cycles basés sur la concentration solaire de solution de LiCl par évaporation en plein air[20], les cycles intermittents qui peuvent être adaptés aux systèmes de climatisation[21] et enfin le refroidissement par radiation nocturne[8,9,22,23].

Les édifices construits de façon à minimiser les besoins de refroidissement sont peut-être la meilleure solution, notamment pour les petits bâtiments résidentiels.

La mise au point des meilleurs moyens d'obtenir du froid par énergie solaire dans les pays en développement est loin d'être définitive et l'on ignore l'urgence et l'ampleur des besoins en fait de climatisation. Il est évidemment capital de pouvoir obtenir des renseignements à ce propos.

REFRIGERATION SOLAIRE

Etroitement liée à la climatisation, la réfrigération solaire vise généralement la conservation de denrées ailmentaires ou l'entreposage de matières biologiques

et médicales. Plusieurs expériences ont été tentées dans divers pays, dont les Etats-Unis[24,25], Sri Lanka[21], la France[26] et la Russie[27], sur les refroidisseurs alimentés par l'énergie solaire et utilisant les cycles de refroidissement par absorption. La plupart de ces essais ont porté sur des réfrigérateurs ménagers ou des glacières de volume réduit. Un essai réalisé au Mexique et portant sur un réfrigérateur ménager à énergie solaire a donné des résultats négatifs. Bien que de construction simple, l'appareil s'est révélé trop compliqué pour fonctionner adéquatement et n'a donc pas pu être utilisé par les personnes pour lesquelles il avait été construit. En Russie, l'on procède à l'installation d'un réfrigérateur ménager utilisant un cycle d'absorption d'ammoniaque et un collecteur solaire pressurisé.

Recherches et réalisations

Il existe plusieurs cycles et systèmes de réfrigération tels que les cycles intermittents d'absorption qui peuvent être utilisés pour la réfrigération solaire. Néanmoins, on n'a pas encore résolu une question aussi essentielle que celle de déterminer l'échelle des installations qui convient le mieux à la réfrigération solaire destinée aux pays en développement. Des systèmes destinés aux collectivités peuvent offrir des avantages plus considérables, exiger une formation moins poussée pour les usagers et permettre (le cas échéant) que la glace soit livrée à des usagers moins importants (comme les ménages). Cependant, ces activités requièrent un investissement considérable en capital et la mise en oeuvre de programmes relatifs à la formation des usagers et à l'entretien.

Il reste à répondre à un certain nombre de questions en matière de réfrigération solaire. Néanmoins, son application aurait l'avantage de pouvoir éventuellement augmenter la consommation de denrées alimentaires disponibles si les services de réfrigération pouvaient être commodément assurés. Des travaux de recherche et de réalisation s'imposent parce qu'il n'existe pas encore de réfrigérateur solaire pratique à un prix abordable ni aucune estimation du coût des appareils susceptibles d'être mis au point. Toute réalisation devrait commencer par une analyse objective et critique des besoins qui existent quant aux applications pratiques de la réfrigération solaire et des perspectives concernant la création de tels systèmes.

EVAPORATEURS SOLAIRES ET DESSALEMENT

L'utilisation de l'énergie solaire pour dessaler l'eau de mer et l'eau de puits saumâtre a été démontrée dans des usines pilotes d'importance moyenne aux Etats-Unis, en Grèce, en Australie, en Russie et dans plusieurs autres pays. Ce procédé vieux d'un siècle—un évaporateur sous la forme d'un bassin—a été

modifié et adapté à la technologie moderne. Il comprend un bassin de saumure peu profond, dans lequel l'eau s'évapore lentement. Sous sa forme moderne, it est recouvert de feuilles de verre inclinées ; l'eau condensée sur le dessous du couvercle du refroidisseur de verre s'écoule à travers des canaux vers les bases inférieures puis vers le réservoir. L'excès de saumure est éliminé à mesure que le bassin est réalimenté en eau salée. Ce procédé a été mis en pratique pour la première fois en 1892 à Las Salinas au Chili dans une usine fournissant de l'eau potable aux animaux de trait travaillant dans les mines de nitrate. L'usine de Las Salinas a fonctionné, semble-t-il, pendant 30 ans. Les progrès accomplis en matière de distillation solaire ont directement porté sur l'utilisation de matériel et d'appareils destinés à une construction économique et durable, et à la réduction des coûts de l'eau produite. Il existe une étude complète sur la distillation[28] ; les Nations Unies ont en outre publié un rapport[29] d'évaluation, moins détaillé, mais utile.

Techniques Actuelles (Disponibles d'ici cinq ans)

La distillation solaire s'effectue sur une échelle commerciale réduite pour approvisionner les petites villes et les petits hôtels situés dans des régions isolées d'Australie (Figure 7) et les petites communautés du bassin de la Médi-

FIGURE 7 Evaporateur solaire couvert en verre, Coober Pedy, Australie. (Construit en 1966 ; surface totale 3.530 m^2)

Digitized by Google

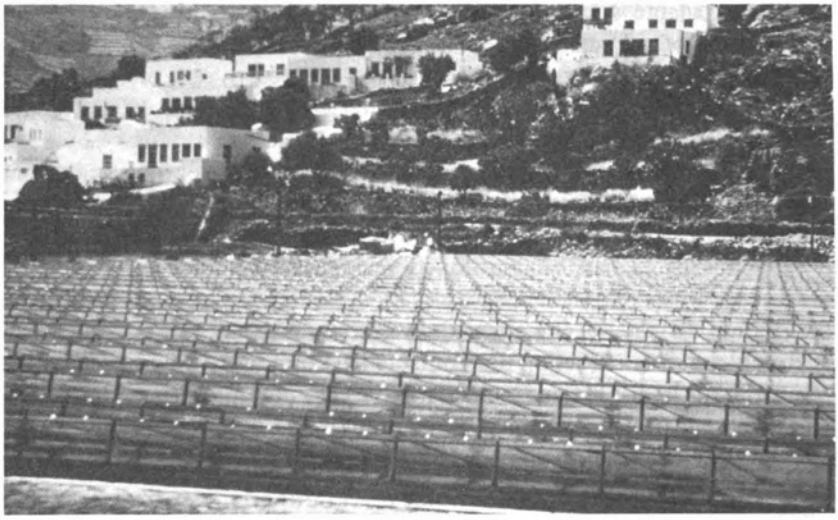


FIGURE 8 Evaporateur solaire de l'île de Patmos, Grèce. (Construit en 1967 ; surface totale 8.826 m^2)

terranée (Figure 8) et des Antilles. Dans ces régions, ou bien il n'existe pas de source d'eau douce adéquate, ou bien le coût de l'adduction est trop élevé. Si les évaporateurs solaires destinés aux communautés sont presqu'aussi compétitifs que d'autres systèmes de dessalement, le procédé ne peut être envisagé que sur le plan expérimental. Sont encore à l'étude les problèmes concernant les matériaux de construction, l'obtention de l'énergie et du matériel et la conception destinée à fournir un rendement maximal et à minimiser les coûts.

Quelques plans sont suffisamment standardisés et l'on a acquis une expérience considérable quant au mode de fonctionnement, expérience en tout cas suffisante pour évaluer l'utilité et les coûts.

Coût

La distillation solaire est un procédé qui requiert un investissement considérable en capital par unité de capacité et, dans un système adéquatement conçu et construit, un minimum de frais de fonctionnement et d'entretien. Les coûts produit-eau dépendent donc avant tout de la productivité de l'évaporateur, de la durée de service, du montant du capital requis pour l'installation et du montant de l'amortissement et des taux d'intérêt.

Si l'on tient compte de ce que la productivité de l'évaporateur solaire repose sur l'intensité et la durée de l'ensoleillement qu'il reçoit, son fonctionnement varie en fonction des perturbations diurnes et saisonnières qui doivent être prises en ligne de compte dans toute analyse des besoins et des coûts. En

Digitized by Google

chiffres ronds, la productivité typique d'un évaporateur solaire est commodément estimée de la manière suivante : 40 l/m^2/jour, un jour d'été sans nuages, avec des fluctuations saisonnières inférieures de moitié à celles enregistrées pendant les journées claires sous des latitudes allant de 15° à 45°. L'expérience montre donc qu'un évaporateur fournira 10.000 l/m^2 par an, avec quelques variations dépendant du climat et de la construction. La durée normale d'un évaporateur construit en béton, en verre ou d'un autre matériel durable est de 20 ans ou davantage, bien que d'autres évaporateurs soient construits avec un matériel moins solide requérant un examen périodique.

Si les évaporateurs solaires ne sont pas plus répandus, c'est surtout à cause du montant très élevé de l'investissement en capital requis et du coût très élevé de l'eau qui en est tirée. Durant ces dernières années, des évaporateurs solaires durables ont été mis sur le marché à raison de \$16-\$32/m^2 l'unité. Si un évaporateur solaire peut être construit pour \$10,75/m^2, y compris le matériel et la main-d'oeuvre, le rendement typique doit être de 80¢-\$1,05 par 1.000 l.

On peut comparer ces chiffres avec les coûts de l'eau douce venant d'une source naturelle : 1¢-5¢ par 1.000 l et ceux de l'eau dessalée dans des usines d'évaporation fonctionnant au pétrole qui sont d'environ 25¢ par 1.000 l. Il y a donc peu de chance que les grands évaporateurs entrent en compétition avec des usines de dessalement utilisant des sources d'énergie conventionnelles, à mois que le prix du pétrole n' accuse une forte hausse.

Néanmoins, le grand avantage de l'évaporateur réside dans le fait que l'on peut choisir des capacités très différentes. Là où la communauté ou l'industrie nécessite de faibles quantités d'eau, disons moins de 200.000 l par jour, l'évaporateur solaire peut se révéler plus économique que l'usine de dessalement conventionnelle qui, fournissant journellement de faibles quantités plutôt que des millions de litres d'eau, exige un investissement élevé par unité de rendement ; il en résulte que le coût de l'eau qui en est tirée peut être de plusieurs dollars pour 1000 gal. Ainsi donc, étant donné que le coût des usines solaires de dessalement semble être compétitif dans les installations de faible importance, on peut les utiliser a) dans les petites communautés où il est impossible d'obtenir de l'eau potable si ce n'est à un prix élevé ; b) ou pour certaines applications industrielles et commerciales qui exigent que tout soit traité dans une région où l'eau est saumâtre ; c) ou encore pour abreuver le bétail dans des régions où l'élevage est possible s'il existe une source d'eau. Les évaporateurs solaires ont été construits justement pour satisfaire ce genre de demande modeste[30].

Fiabilité (durée de vie et entretien)

La productivité des évaporateurs peut être prévue[29] dans le cas de ceux où les risques de pannes mécaniques ou de problèmes de corrosion sont minimes.

Les constructions déjà éprouvées utilisent du matériel standard et durable tel que le verre, le béton, l'asphalte et des métaux résistant à la corrosion[26], quoique l'on étudie maintenant des constructions qui contiennent en partie des matières plastiques[31]. La construction, l'entretien et le fonctionnement n'exigent ni grande compétence technique pour le maniement complexe de l'appareil, ni contrôle journalier. Bref, il existe des plans pour des évaporateurs solaires durables dont on peut faire usage en toute confiance.

Pour la plupart des constructions, on peut jusqu'à un certain point utiliser les matériaux et la main-d'oeuvre locaux[32].

Recherches et réalisations

Dans l'évaporateur solaire sous forme de bassin, l'appareil collecteur d'énergie solaire et celui de distillation sont groupés en un seul élément. La séparation de ces fonctions permettrait l'établissement de procédés régénérateurs ou répétitifs alimentés par l'énergie solaire. Ce processus dépend des progrès qui auront été réalisés dans la technologie du collecteur solaire (c'est-à-dire des "découvertes"). Des améliorations notables dans le rendement et dans le coût de production pourront permettre d'améliorer la construction des bassins. C'est dans ce domaine notamment qu'il serait d'une importance capitale de recourir à de nouveaux matériaux pourvus de propriétés uniques, aux matériaux locaux et à de nouveaux plans.

Les systèmes exploitant des sources d'énergie combinées, dans lesquelles l'énergie solaire fournie à l'évaporateur est complétée par la chaleur se dégageant par exemple de moteurs diesel ou à gaz fonctionnant par intermittence, peuvent réduire le coût de l'eau produite par l'évaporateur[33]. Les usines à fonctions multiples dans lesquelles la production de l'eau s'accompagne de son utilisation, sont aussi envisagées par exemple dans un système intégré de production d'énergie, d'eau et de produits alimentaires[34].

Finalement, on peut créer des systèmes à usages multiples produisant une combinaison d'eau, de sel et éventuellement d'électricité. Compte tenu du fait que le marché de ces produits est limité, ces systèmes pourraient avoir leur importance, mais seulement après un travail de recherche et de mise au point considérable.

Evaluation du système d'évaporation solaire

La liste des facteurs suivante devrait servir à orienter l'évaluation de la valeur respective de systèmes d'évaporation solaire en tant que systèmes destinés à satisfaire un besoin particulier en eau.

Climat. Si l'ensoleillement est bon, c'est-à-dire si le ciel est généralement clair, l'évaporation solaire peut être un procédé viable. La productivité des évaporateurs est directement liée à la radiation solaire reçue sur une surface horizontale.

Echelle des besoins. L'évaporation solaire semble pour le moment satisfaire les besoins en eau à une échelle relativement réduite, c'est-à-dire qu'elle produit moins de 200 m^3 par jour. Pour satisfaire une demande plus importante ou celle qui, prévoit-t-on, augmentera dans un proche avenir, d'autres procédés de dessalement s'avèrent plus économiques.

Site. En plus d'une réception complète du rayonnement solaire, l'appareil doit être installé à proximité des usagers. Il doit y avoir dans les environs des étendues d'eau saumâtre, des nappes d'eau souterraines ou de l'eau de mer. On devrait aussi envisager d'autres utilisations possibles du site.

Estimation de la capacité de l'évaporateur. Un évaporateur bien conçu, bien construit, situé dans un climat favorable, devrait fournir 1.000 l par m^2 par an. Ce rendement, comparé aux besoins en eau pour une année, permettra d'obtenir la superficie approximative nécessaire pour la construction de l'évaporateur.

Plan. L'on peut choisir un ou plusieurs plans ou l'élaborer en fonction des conditions locales, du matériel disponible et des aptitudes de la main-d'oeuvre locale.

Estimation du rendement mensuel. Une fois qu'un plan est choisi, le rendement mensuel d'eau distillée peut être estimé ou bien en fonction des données expérimentales obtenues pour d'autres évaporateurs fonctionnant dans d'autres régions ou par le biais de méthodes d'estimation comme celles qui sont décrites dans le *Manual of Solar Distillation*[28]. Ces rendements devraient être calculés à partir du volume principal des niveaux de rayonnement mensuels et des températures (la méthode la plus connue de données météorologiques pertinentes), tels que ceux qui sont donnés dans l'ouvrage : *World Distribution of Solar Radiation*[38].

Rôle des précipitations. Si les conditions environnantes et la législation le permettent, les eaux de pluie peuvent être recueillies sur les couvercles de verre et l'on peut en estimer la quantité d'après les données pluviométriques mensuelles (si les pluies ne varient pas trop) ou le minimum de pluie qui tombe chaque mois (si ces pluies ne varient pas trop) ou le minimum de pluie qui tombe chaque mois (si ces pluies varient) en appliquant un facteur raisonnable de récupération. Les eaux de pluie recueillies peuvent être ensuite ajoutées au rendement de l'évaporateur en vue d'arriver à une estimation de la production mensuelle d'eau utilisable provenant de l'évaporateur.

Besoins mensuels par rapport à la production. Une comparaison établie entre la distribution mensuelle de l'eau et les besoins en eau indiqueront s'il y

a lieu de construire des réservoirs d'eau, de modifier la capacité de l'évaporateur ou d'exploiter des sources supplémentaires.

Estimation des coûts. Sur la base des renseignements qui précèdent et des données appropriées concernant la conception des évaporateurs, les premiers coûts, la durée de fonctionnement, l'entretien et le fonctionnement, les taux d'intérêt locaux et autres facteurs économiques, le coût de livraison de l'eau à partir d'évaporateurs solaires peut être établi et comparé à d'autres options.

Autres considérations. D'autres facteurs qu'on peut définir quantitativement peuvent également avoir leur importance, à savoir : les facteurs sociologiques et individuels, la résistance au changement, la distance qui sépare les usagers des sources d'eau potable, la protection de distribution de l'eau, les subventions et les économies, le cas échéant.

En général, un programme de recherches et de réalisations additionnelles entraînerait une adaptation supplémentaire de la technologie existante aux besoins particuliers des pays en développement. Il faut mentionner parmi des adaptations une modification des plans, destinées à permettre l'utilisation du matériel local et des composantes manufacturées sur place. Des études de cette nature contribueraient à une meilleure utilisation des crédits affectés aux projets d'évaporation solaire, à augmenter le nombre des régions où ce système serait utile et, par conséquent, à résoudre les problèmes d'approvisionnement en eau, du moins pour les petites communautés jouissant d'un climat approprié.

PRODUCTION DU SEL

L'évaporation de l'eau de mer par l'énergie solaire est une méthode traditionnelle de dessalement. Dans plusieurs pays, ce procédé est encore très employé—sur une grande ou une petite échelle. Le concept de base est simple : dans les régions où l'évaporation se fait plus vite qu'il ne pleut, un bassin peu profond de saumure est exposé au soleil et l'eau s'évapore, provoquant la cristallisation du sel. L'évaporation solaire est utilisée dans plusieurs pays en développement, par exemple, en Inde, au Pakistan, au Mexique, en Colombie et au Chili. Ce procédé a acquis une grande importance dans l'industrie aux Etats-Unis, en Israël et ailleurs[36]. Les découvertes modernes ont porté sur une meilleure construction des bassins et l'amélioration des techniques de récupération du sel.

Il semble qu'il y ait peu de recherches encore à faire sur les procédés traditionnels d'évaporation solaire que ne puissent entreprendre les industries utilisant ces méthodes. On a suggéré toutefois que d'autres études sur les "bassins solaires" pourraient accroître la production de sel et de produits dérivés de l'énergie ou de l'eau distillée[37]. Les bassins solaires sont de grandes étendues

de saumure d'environ 1 m de profondeur dans lesquelles des couches verticales de concentrations de sel sont maintenues de façon à ce que les solutions les plus concentrées et les plus denses reposent au fond du bassin. La chaleur est recueillie au fond du bassin lorsque le fond noir absorbe le rayonnement solaire transmis par l'eau. En dépit de l'élévation de la température de la saumure au fond du bassin, sa gravité spécifique demeure plus élevée que celle au sommet si l'on peut maintenir une concentration suffisante. Dans ces conditions, le mélange de convexité est réduit au minimum et les couches inférieures de saumure, dont la température peut atteindre 80° à 90°C contre 25°C au sommet, peuvent être retirées du bassin et utilisées pour produire de l'électricité, alimenter la production de sel du fait de l'évaporation à effet multiple de la saumure, distiller l'eau, etc. Comme il faut maintenir la concentration des couches en raison de la montée progressive du sel, la surface doit être légèrement "lavée" avec de l'eau douce et de la saumure concentrée amenée par le fond.

Il faut reconnaître qu'un "bassin solaire" à usages multiples supposerait un apport considérable de capitaux et que l'utilisation du procédé et son application éventuelle présentent probablement moins d'attraits pour les pays en développement que pour les pays industrialisés.

SECHAGE DES RECOLTES PAR L'ENERGIE SOLAIRE

De tous les usages directs de l'énergie solaire, le séchage des récoltes est peut-être le procédé le plus ancien et le plus répandu. La technique habituelle consiste à épandre les produits à sécher en une mince couche sur le sol de façon à les exposer aux rayons du soleil et au vent. Le copra, les grains, le foin, les fruits et les légumes sont ainsi séchés dans plusieurs régions du monde, y compris les pays industrialisés. Durant ces dernières années, des innovations ont été introduites, notamment pour le séchage des fruits. Avec ce procédé, les fruits sont placés sur des étagères soigneusement disposées de façon à pouvoir en contrôler l'exposition aux rayons solaires et au vent et pour que la manutention en soit améliorée. On peut ainsi améliorer le contrôle de l'application du procédé et la qualité du produit.

Au cours des dernières années, le sens de l'expression "séchage solaire" s'est élargi : il indique le procédé par lequel les produits agricoles sont séchés non pas par exposition directe aux rayons du soleil—et partant au vent, à la pluie, aux insectes et aux oiseaux—mais par exposition à de l'air chauffé par l'énergie solaire dans des installations mieux protégées. Ce procédé devient particulièrement avantageux lorsqu'on a à traiter des fruits doux, particulièrement vulnérables aux insectes, car la concentration du sucre augmente durant l'assèchement.

Une grande partie des fruits et des légumes secs produits dans le monde entier est encore traitée par assèchement solaire. Il ne fait pas de doute que ce procédé est le moyen le moins cher et le plus simple de sécher la récolte dans des régions abondamment ensoleillées, où le climat de la saison suivant la moisson est caractérisé par une humidité relativement basse et des précipitations faibles ou nulles. Dans le cas du bois vert—où l'exposition directe au soleil a tendance à déformer et à gauchir le bois et dans les régions tropicales humides, on peut se servir d'un four chauffé par de l'énergie solaire. Le coût de ce procédé n'a pas encore été évalué.

Si la récolte doit être conservée dans des entrepôts, le séchage doit lui assurer une teneur en humidité de 12 à 15 pour cent par unité de poids. L'état hygrométrique relatif de l'air qui sera en équilibre avec celui de la récolte varie, d'une récolte à l'autre, de 48 à 60 pour cent pour les fruits[38], les grains, et le foin[39]. Une réduction marquée de l'hygrométrie relative de l'air peut être obtenue avec une hausse minimale de la température et la variation de température requise pour entraîner une modification hygrométrique est fournie par des tableaux psychrométriques standards. Le séchage adéquat de la récolte peut donc être effectué dans des climats humides par une hausse de la température de l'air circulant sur les produits à séchér.

Techniques actuelles (disponibles d'ici cinq ans)

Bien que les sécheurs de récoltes à énergie solaire ne soient pas encore fabriqués commercialement, les essais réalisés au cours des vingt dernières années ont permis l'élaboration de plusieurs systèmes depuis l'appareil utilisant de l'air chauffé à l'énergie solaire dans des sécheurs plus ou moins conventionnels jusqu'à celui où l'on combine le séchage direct et le séchage par air en plaçant les produits à sécher sur des plaques de collecteurs—sécheurs. Dans le premier cas, différents modèles ont été conçus aux Etats-Unis[39], en Turquie[40,41,42], au Canada[43,44,45], au Brésil[46], et en Australie[47]. De tels appareils ont été construits et utilisés avec succès en Inde[48] et à la Trinité et Tobago[49,50].

Dans les pays en développement, les cultivateurs qui ne disposent que de quelques moyens techniques et de faibles capitaux devraient être en mesure d'utiliser les sécheurs solaires. L'équipement devrait être aussi simple et peu coûteux que possible. Des matériaux locaux et de la main-d'oeuvre relativement inexpérimentée peuvent suffire pour la construction de différents modèles de sécheurs sans aide extérieure. Comme leur utilisation est saisonnière et de courte durée, les sécheurs de récoltes doivent être adaptés à une variété de récoltes qui arrivent à maturité à différentes époques et pourront être séchées successivement avec les mêmes installations. Construits et lancés sur le marché, ces sécheurs devront être bien moins coûteux que les collec-

teurs solaires types, de façon que le coût puisse être amorti sur une période relativement courte.

En raison de tous les facteurs mentionnés, l'évaluation des avantages économiques potentiels du séchage des récoltes par énergie solaire devra se faire cas par cas. Elle dépendra essentiellement du volume de la récolte à sécher et des conditions atmosphériques de la saison. Il a été démontré que l'addition d'un appareil de chauffage solaire à un système de séchage à air non chauffé peut réduire le temps de séchage de 50 à 75 pour cent. Avec ces deux systèmes, le coût du sécheur solaire est largement compensé par l'économie réalisée au moyen du ventilateur résultant de la moindre puissance électrique requise. Dans le cas du séchage du bois en Australie, une analyse économique basée sur les modèles et les matériaux actuels a démontré que le chauffage solaire coûte un peu plus que les systèmes de chauffage conventionnels.

Recherches et réalisations

La mise au point des systèmes de chauffage solaire pourrait très bien profiter des recherches menées sur la combinaison collecteurs-sécheurs et des systèmes de chauffage à air par plaques et de stockage d'énergie destinés à fournir de l'air chaud aux sécheurs. Les recherches portant sur la conception et la régulation de ces procédés pour des récoltes particulières ou d'autres matériaux à sécher pourraient permettre aux pays en développement de procéder à des applications qui à leur tour permettraient de mieux exploiter les ressources alimentaires.

PRODUCTION D'ELECTRICITE

L'énergie solaire exploitée pour la production d'énergie, que ce soit sous forme d'électricité ou d'énergie mécanique, a fait l'objet de vastes recherches en Russie, aux Etats-Unis, en France et en Israël[51]. Outre le procédé photovoltaïque qui sera analysé au chapitre suivant, les efforts déployés en vue de la production d'électricité avec des moteurs thermiques sont les plus répandus. Tous ces efforts ont été plus ou moins fonction des méthodes de collection et de concentration de l'énergie solaire incidente. Une grande variété de collecteurs solaires ont été utilisés dans le but de produire de la vapeur dans de nombreux ensembles expérimentaux d'eau ou autre, laquelle a été ensuite employée dans différents moteurs pour produire de l'électricité ou une énergie mécanique. La plus grande unité de ce genre fut une usine construite en Egypte en 1913 qui produisait 37 kW[52].

La plupart des travaux ont été orientés vers l'utilisation de réflecteurs servant à concentrer l'énergie solaire dans un petit récepteur chaudière,

permettant d'atteindre une plus haute température que celle normalement possible avec un collecteur plat. On peut ainsi obtenir la vapeur sous forte pression pour la production d'électricité ou, grâce à un équipement bien choisi, une chaleur très forte destinée à traiter des produits chimiques et métallurgiques. Des recherches ont été faites sur différentes méthodes de concentration : paraboloïdes (bassins plats), cylindres paraboliques (baquets), etc.[53]. Un plan examiné d'abord en Russie et maintenant à l'étude aux Etats-Unis porte sur toute une série de miroirs plats érigés sur le sol et disposés de façon à réfléchir les rayons du soleil sur une chaudière à vapeur à haute pression. La chaudière est située au sommet d'une tour élevée munie d'un turbogénérateur à la base[54].

Des travaux de recherche et de réalisation destinés à la production solaire d'électricité dans des régions moins industrialisées ont été réalisés en Russie, en Afrique et dans une certaine mesure, en Israël. Il faut signaler en particulier plusieurs appareils de pompage solaire construits par les Français en Afrique occidentale et d'après les plans de Girardier[55] et une installation analogue au Mexique. Un exemple de ces installations est reproduit à la Figure 9. Des chauffe-eau plats fournissent de l'eau chaude à une chaudière dans laquelle le propane est vaporisé et de laquelle la vapeur est envoyée à un moteur à mouvement alternatif. Plusieurs appareils de 1 à 3 kW sont actuellement en service. Le présent rendement global inférieur à 1 pour cent pourrait être fortement augmenté par une amélioration du plan. Si les coûts de l'élec-

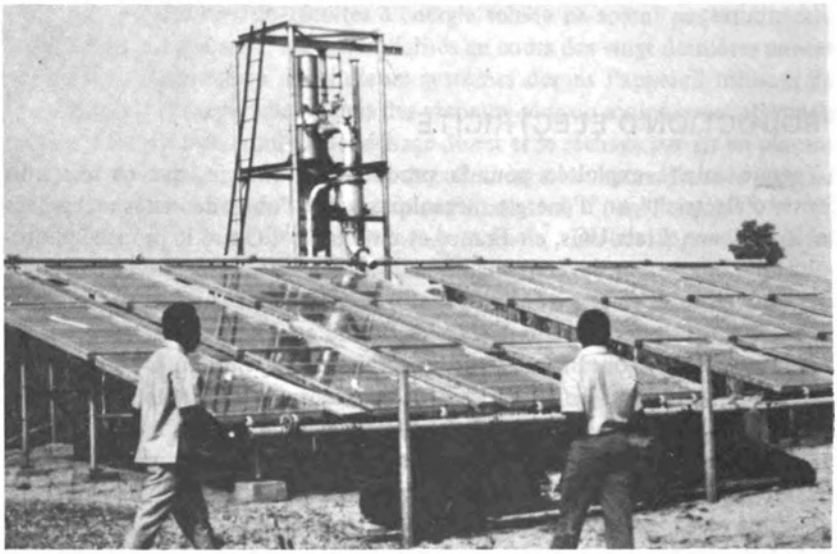


FIGURE 9 Station solaire de pompage en Afrique. (Plaque collectrice, moteur Rankine à fluide organique, un de ceux construits au début des années 1970) [Girardier, Réf. 55]

Digitized by Google

tricité produite par ce système sont élevés, une comparaison avec les appareils diesel ne montrent cependant pas une grande différence, lorsque la durée du moteur diesel est réduite par le manque d'entretien et que le personnel généralement affecté aux réparations fait défaut dans les régions écartées.

Le programmes réalisés par la Russie présentent de nombreux modèles de concentrateurs solaires expérimentaux de 5 m de diamètre et d'appareils électrogènes d'une puissance de 1 à 3 kW[5 6]. Des moteurs Rankine à vapeur et un moteur Stirling ont été utilisés à titre d'essai conjointement avec ces concentrateurs. Par comparaison, l'installation et l'entretien de ces systèmes exigeraient une forte compétence technique.

Le coût des appareils de production d'énergie solaire est un des principaux facteurs qui s'opposent à leur utilisation; une application économique exigerait un plan à grande échelle, une utilisation économique de l'équipement ou un emploi dans des situations où les seules autres options seraient l'usage de générateurs à faible capacité d'un coût élevé, de courte durée et exigeant un carburant coûteux.

D'autres travaux de recherche seront décrits à l'Annexe 4.

REFERENCES

1. Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization. 1964. *Solar water heaters, principles of design, construction and installation*. Division of Mechanical Engineering, Circular No. 2. Victoria, Australia: Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization.
2. Duffie, J A., and Beckman, W. A. 1974. *Solar energy thermal processes*. New York: John Wiley and Sons.
3. Tanishita, I. 1970. Present situation of commercial solar water heaters in Japan. Paper presented at International Solar Energy Society Conference, 2-6 March 1970, Melbourne, Australia.
4. Beckman, W. A., and Duffie, J. A. 1974. Solar heating and cooling of buildings. In *The energy crisis and energy from the sun*. Symposium on Solar Energy Utilization, 20th Annual Meeting, Institute of Environmental Sciences, 30 April 1974, Washington, D.C. Mt. Prospect, Illinois: Institute of Environmental Sciences.
5. Löf, G. O. G. 1964. Use of solar energy for heating purposes: Space-heating. In *Proceedings of the United Nations Conference on New Sources of Energy: Solar Energy, Wind Power and Geothermal Energy, 21-31 August 1961, Rome, Italy*. Vol. 5: *Solar energy II*, pp. 114-139. U.N. Document No. E/Conf.35/6. New York: United Nations.
6. Engebretson, C. D. 1964. The use of solar energy for space heating: MIT solar house IV. In *Proceedings of the United Nations Conference on New Sources of Energy: Solar Energy, Wind Power and Geothermal Energy, 21-31 August 1961, Rome, Italy*. Vol. 5: *Solar energy II*, pp. 159-177. U.N. Document No. E/Conf.35/6. New York: United Nations.
7. Löf, G. O. G.; El Wakil, M. M.; and Chiou, J. P. 1964. Design and performance of domestic heating system employing solar heated air–the Colorado solar house. In *Proceedings of the United Nations Conference on New Sources of Energy: Solar*

Energy, Wind Power and Geothermal Energy, 21-31 August 1961, Rome, Italy. Vol. 5: *Solar energy II*, pp. 185-197. U.N. Document No. E/Conf.35/6. New York: United Nations.

8. Yanagimachi, M. 1964. Report on two and a half years' experimental living in Yanagimachi solar house II. In *Proceedings of the United Nations Conference on New Sources of Energy: Solar Energy, Wind Power and Geothermal Energy, 21-31 August 1961, Rome, Italy.* Vol. 5: *Solar energy II*, pp. 233-247. U.N. Document No. E/Conf.35/6. New York: United Nations.
9. Bliss, R. W. 1964. The performance of an experimental system using solar energy for heating, and night radiation for cooling a building. In *Proceedings of the United Nations Conference on New Sources of Energy: Solar Energy, Wind Power and Geothermal Energy, 21-31 August 1961, Rome, Italy.* Vol. 5: *Solar energy II*, pp. 148-158. U.N. Document No. E/Conf.35/6. New York: United Nations.
10. Hay, H. R. 1973. Energy technology and solarchitecture. *Mechanical Engineering* 95(11):18-22.
11. Tybout, R. A., and Löf, G. O. G. 1970. Solar house heating. *Natural Resources Journal* 10(2):268.
12. Löf, G. O. G., and Tybout, R. A. 1973. Cost of house heating with solar energy. *Solar Energy* 14:253-278.
13. Bahadori, Mehdi N. 1973. A feasibility study of solar heating in Iran. *Solar Energy* 15:3-26.
14. Adler, S.; Levite, G.; and Tabor, H. 1964. The Altenkirch solar-cooled house. In *Proceedings of the United Nations Conference on New Sources of Energy: Solar Energy, Wind Power and Geothermal Energy, 21-31 August 1961, Rome, Italy.* Vol. 6: *Solar energy III*, pp. 60-65. U.N. Document No. E/Conf.35/7. New York: United Nations.
15. Trombe, F.; Robert, J. F.; Cabanet, M.; and Sesolis, B. 1975. Some performance characteristics of the CNRS solar houses. Paper presented at the International Solar Energy Society Conference, July 28-August 1, Los Angeles, California.
16. Chung, R.; Duffie, J. A.; and Löf, G. O. G. 1963. A study of a solar air conditioner. *Mechanical Engineering* 85:31.
17. Ward, D. S., and Löf, G. O. G. 1975. Design and construction of a residential solar heating and cooling system. *Solar Energy* 17:13.
18. Löf, G. O. G., and Tybout, R. A. 1974. The design and cost of optimized systems for residential heating and cooling by solar energy. *Solar Energy* 16:9-18.
19. Dunkle, R. V. 1965. A method of solar air-conditioning. *Mechanical and Chemical Engineering Transactions*, Institute of Engineers, Sydney, Australia MC1(1):73-78.
20. Baum, V. A.; Kakabaev, A.; Khandurdiev, A.; Klychiaeva, O.; and Rakhmanov, A. 1973. Utilisation de l'énergie solaire dans les conditions particulières des régions à climat torride et aride pour la climatisation en été. In *Proceedings of the International Congress. The Sun in the Service of Mankind, 2-6 July 1973*, UNESCO House, Paris, pp. EH-96:1-13. Washington, D.C.: Research Applications Directorate, U.S. National Science Foundation.
21. Chinnappa, J. C. V. 1962. Performance of an intermittent refrigerator operated by a flat-plate collector. *Solar Energy* 6(4):143.
22. Hay, H. R., and Yellott, J. I. 1969. Natural air conditioning with roof ponds and movable insulation. *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Transactions* 75 (Part I):165-177.
23. _____. 1970. A naturally air conditioned building. *Mechanical Engineering* 92(1):19-25.

24. Williams, D. A.; Chung, R.; Löf, G. O. G.; Fester, D. A.; and Duffie, J. A. 1958. Cooling systems based on solar refrigeration. *Refrigeration Engineering* 66:33.
25. Sargent, S. L., and Beckman, W. A. 1968. Theoretical performance of an ammonia-sodium thiocyanate intermittent absorption refrigeration cycle. *Solar Energy* 12:137.
26. Trombe, F., and Foex, M. 1961. Production de glace à l'aide de l'énergie solaire. In *Applications thermiques de l'énergie solaire dans le domaine de la recherche et de l'industrie*. Les Comptes-rendus des Colloques Internationaux du Centre National de la Recherche Scientifique, Montlouis, 23-28 June 1958. Paris: Centre National de la Recherche Scientifique.
27. Kakabaev, A.; Klychiaeva, O.; and Khandurdiev, A. 1972. Refrigeration capacity of an absorption solar refrigerator plant with flat glazed solution regenerator. *Applied Solar Energy (English translation of "Geliotekhnika")* 8(1-2):90.
28. Talbert, S. G.; Eibling, J. A.; and Löf, G. O. G. 1970. *Manual on solar distillation of saline water*. Office of Saline Water, Research and Development Progress Report No. 546. Washington, D.C.: U.S. Department of the Interior.
29. United Nations Economic and Social Affairs. 1970. *Solar distillation*. U.N. Document No. ST/ECA/121. New York: United Nations.
30. Morse, R. N., and Read, W. R. W. 1968. A rational basis for the engineering development of a solar still. *Solar Energy* 12:5.
31. Hay, H. R. 1973. Plastic solar stills: Past, present, and future. *Solar Energy* 14:393-404.
32. Lawand, T. A. 1968. *Engineering and economic evaluation of solar distillation for small communities*. Technical Report No. MT-6. Ste. Anne de Bellevue, Quebec, Canada: Brace Research Institute, McGill University.
33. Proctor, D. 1973. The use of waste heat in a solar still. *Solar Energy* 14(4):433-449.
34. Jensen, Merle H., and Eisa, Hamdy M. 1972. Controlled-environment vegetable production; results of trials in Puerto Peñasco, Mexico, 1968-1970. Tucson: University of Arizona, Environmental Research Laboratory.
35. Löf, G. O. G.; Duffie, J. A.; and Smith, C. O. 1966. *World distribution of solar radiation*. Engineering Experiment Station, Report No. 21. Madison: University of Wisconsin.
36. Spiegler, K. S. 1955. Solar evaporation of salt brines in open pans. In *Solar energy research*, F. Daniels and J. A. Duffie, eds., p. 119. Madison: University of Wisconsin Press.
37. Tabor, H., and Matz, R. 1965. Solar pond status report. *Solar Energy* 9:177.
38. Szulmayer, W. 1973. Thermodynamics of sun-drying. In *Proceedings of the International Congress. The Sun in the Service of Mankind, 2-6 July 1973, UNESCO House, Paris*, pp. V-24:1-10. Washington, D.C.: Research Applications Directorate, U.S. National Science Foundation.
39. Buelow, Frederick H. 1964. Drying crops with solar heated air. In *Proceedings of the United Nations Conference on New Sources of Energy: Solar Energy, Wind Power and Geothermal Energy, 21-31 August 1961, Rome, Italy*. Vol. 5: *Solar energy II*, pp. 267-272. U.N. Document No. E/Conf.35/6. New York: United Nations.
40. Akyurt, M., and Selçuk, M. K. 1973. A solar drier supplemented with auxiliary heating systems for continuous operation. *Solar Energy* 14:313-320.
41. Selçuk, M. K. 1967. The final report of the solar fruit drier. *COMPLES Bulletin* (Cooperation Mediterranéenne pour l'Energie Solaire, Marseilles) (12):91-101.
42. Selçuk, M. K.; Ersay, Ö.; and Akyurt, Mehmet. 1973. Development, theoretical analysis and performance evaluation of shelf type solar driers. Paper presented at

the Winter Annual Meeting of the American Society of Mechanical Engineers, 11-15 November 1973, Detroit, Michigan.

43. Lawand, T. A. 1965. A description of two simple solar agricultural dryers. *COMPLES Bulletin* (Coopération Méditerranéenne pour l'Energie Solaire, Marseille) (9):51-56.
44. _____. 1966. A solar-cabinet dryer. *Solar Energy* 10(4):158-164.
45. _____. 1966. *How to make a solar cabinet dryer for agricultural products.* Leaflet L.6. Ste. Anne de Bellevue, Quebec, Canada: Brace Research Institute, McGill University.

    Disponible en arabe (Brochure 47) et en espagnol (Brochure L.8).

46. Ghosh, B. N. 1973. A new glass-roof dryer for cocoa beans and other crops. In *Proceedings of the International Congress. The Sun in the Service of Mankind, 2-6 July 1973, UNESCO House, Paris*, pp. V-30:1-17. Washington, D.C.: Research Applications Directorate, U.S. National Science Foundation.
47. Read, W. R. W.; Choda, A.; and Cooper, P. I. 1973. A solar timber kiln. In *Proceedings of the International Congress. The Sun in the Service of Mankind, 2-6 July 1973, UNESCO House, Paris*, pp. V-28:1-10. Washington, D.C.: Research Applications Directorate, U.S. National Science Foundation.
48. Kapoor, S. G., and Agrawal, H. C. 1973. Solar dryers for Indian conditions. In *Proceedings of the International Congress. The Sun in the Service of Mankind, 2-6 July 1973, UNESCO House, Paris*, pp. V-29:1-11. Washington, D.C.: Research Applications Directorate, U.S. National Science Foundation.
49. Headley, O. St. C., and Springer, G. F. B. 1973. A natural convection solar crop drier. In *Proceedings of the International Congress. The Sun in the Service of Mankind, 2-6 July 1973, UNESCO House, Paris*, pp. V-26:1-10. Washington, D.C.: Research Applications Directorate, U.S. National Science Foundation.
50. Satcunanathan, Suppramaniam. 1973. A crop drier utilizing a two pass solar air heater. In *Proceedings of the International Congress. The Sun in the Service of Mankind, 2-6 July 1973, UNESCO House, Paris*, pp. V-27:1-17. Washington, D.C.: Research Applications Directorate, U.S. National Science Foundation.
51. Tabor, H., and Bronicki, L. 1954. Small turbines for solar energy power package. In *Proceedings of the United Nations Conference on New Sources of Energy: Solar Energy, Wind Power and Geothermal Energy, 21-31 August 1961, Rome, Italy.* Vol. 4:68-81. U.N. Document No. E/Conf.35/5. New York: United Nations.
52. Jordan, R. C., and Ibele, W. C. 1955. Mechanical energy from solar energy. In *Proceedings of the World Symposium on Applied Solar Energy, 2-5 November 1955, Phoenix, Arizona*, pp. 81-101. Menlo Park, California: Stanford Research Institute.
53. Zarem, A., and Erway, D. 1963. *Introduction to the utilization of solar energy.* New York: McGraw Hill Book Co.
54. Baum, V. A.; Aparisi, R. R.; and Garf, B. A. 1956. High-power solar installations. *Teploenergetika* 3(6):31-39. (In Russian)
55. Girardier, Jean-Pierre; Alexandroff, M. G.; and Alexandroff, J. M. 1973. Les moteurs solaires et l'habitat pour les zones arides: Réalisations actuelles et perspectives. In *Proceedings of the International Congress. The Sun in the Service of Mankind, 2-6 July 1973, UNESCO House, Paris*, pp. E-82:1-10. Washington, D.C.: Research Applications Directorate, U.S. National Science Foundation.
56. Starodubtsev, S. V.; Umarov, G. Ya.; and Kordub, N. V. 1965. A 2.7 meter diameter vacuum film solar concentrator. *Applied Solar Energy (English translation of "Geliotekhnika")* 1(1):16.

Dispositifs photovoltaïques

Les cellules solaires, généralement fabriquées sous forme de films minces ou de plaquettes, sont des dispositifs semi-conducteurs qui transforment entre 3 pour cent à environ 30 pour cent de l'énergie solaire incidente en courant électrique direct dont l'indice d'efficacité est fonction de l'intensité du spectre d'éclairage, de la conception de la cellule solaire, des matériaux utilisés et de la température. Une cellule solaire fonctionne comme une pile à faible tension ($\simeq$0,5 volt) dont la charge est continuellement restituée en proportion de l'incidence de l'éclairage. La connection entre ces cellules couplées en séries parallèles permit de construire des "panneaux" solaires à haute tension et d'une capacité pouvant atteindre plusieurs kilovolts. Combinées avec un dispositif de stockage de l'énergie et un équipement permettant l'utilisation de l'électricité, ces cellules peuvent être utilisées comme partie intégrante d'un système global de conversion d'électricité solaire. Après avoir été mises au point sous une forme commode en 1955, elles ont servi principalement à fournir de l'électricité aux engins spatiaux bien qu'elles aient eu des applications terrestres spécialisées.

L'extraordinaire simplicité du système solaire photovoltaïque (Figures 10 et 11) semble en faire une source d'énergie très commode qui pourrait recevoir des applications terrestres tant dans les pays industrialisés que dans les pays en développement. Les appareils photovoltaïques possèdent les avantages suivants : absence de pièces mobiles, détérioration très lente des cellules si elles sont adéquatement scellées, possibilité de systèmes modulaires d'une puissance allant de quelques watts à plusieurs mégawatts, enfin extrême simplicité du maniement. Les coûts de réalisation et de fabrication de plus en

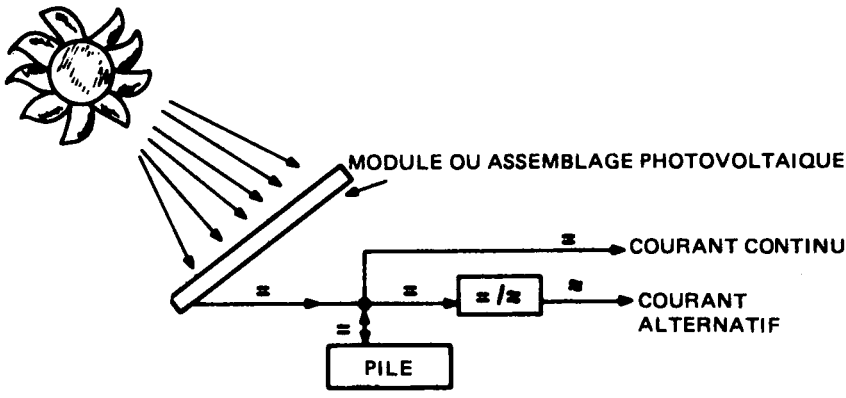


FIGURE 10 Système photovoltaïque simplifié.

plus élevés des appareils solaires destinés aux engins spatiaux ont cependant découragé, du moins pour le moment, toute tentative sérieuse visant une application terrestre de cette technique en dépit du potentiel considérable de ces systèmes. Un système complet de cellules solaires pour un engin spatial coûte entre $500.000/kWe (en moyenne) pour le laboratoire spatial (10 kWe) Skylab et plusieurs millions de dollars le kilowatt pour les premiers appareils de l'engin Mariner. Un tel appareil est représenté en Figure 12 où l'engin Marine IX est muni de quatre grands panneaux fournissant 400 W de courant continu avec un éclairage solaire incident de 690 W/m^2 (orbite de Mars).

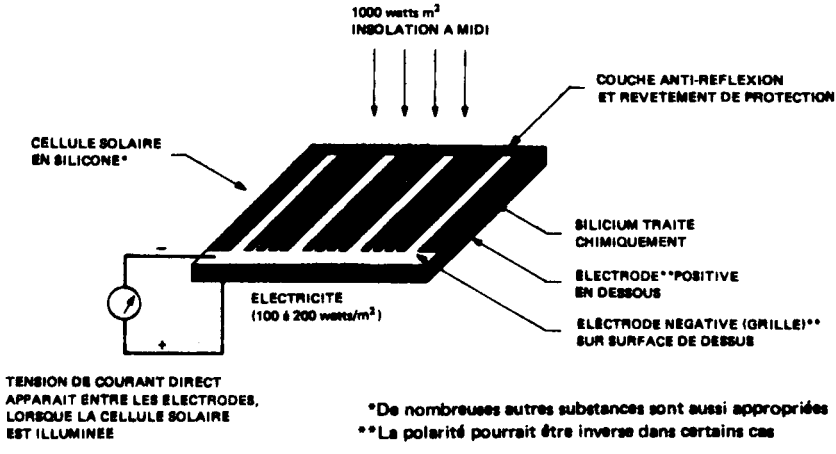


FIGURE 11 Conversion directe de la lumière du soleil en électricité—représentation simplifiée.

Il est actuellement établi que, grâce aux progrès de la technologie et des techniques appropriées de production de masse, le coût de cet équipement solaire pourra être réduit au début ou au milieu des années 80, à tel point qu'un système complet—à savoir conversion solaire, stockage, utilisation de l'électricité et transmission/distribution—pourrait faire concurrence (pour ce qui est des coûts et de la durée du cycle) à d'autres réseaux énergétiques à grande échelle. Ce système pourrait même être utilement appliqué sur une échelle réduite dans des régions rurales éloignées.

Des programmes de grande envergure pour le développement de dispositifs photovoltaïques à des fins commerciales sont en cours aux Etats-Unis, en Allemagne, au Japon et ailleurs. Grâce aux nouvelles inventions des dernières années, ces systèmes permettent d'établir des prévisions à partir de données concrètes. Parmi les progrès récents, il faut citer la production continue de ruban de silicium approprié aux cellules solaires, l'accroissement de l'efficacité et de la stabilité des cellules solaires CdS et le développement de concentrateurs peu coûteux à grande ouverture (Collecteur Winston)[1].

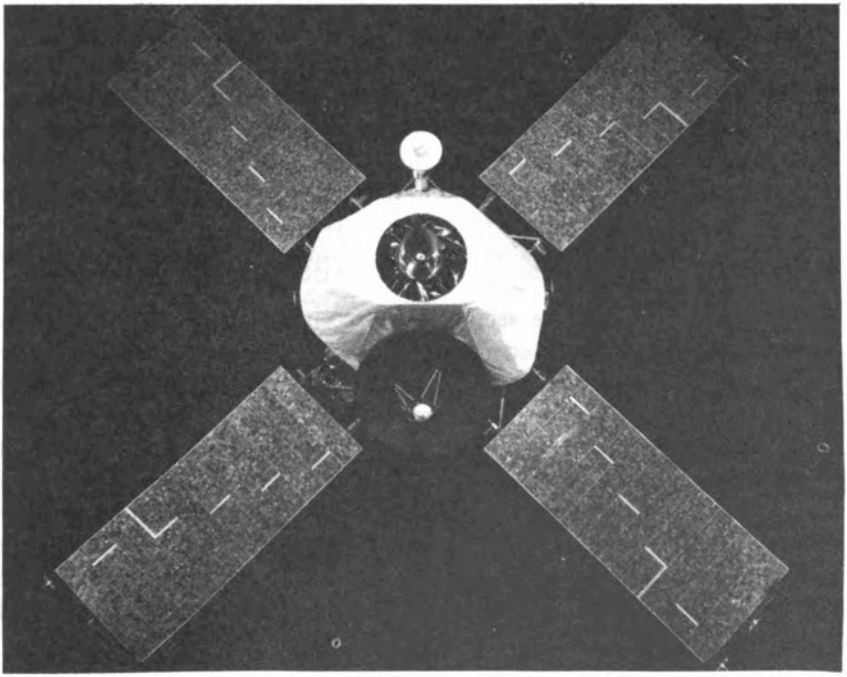


FIGURE 12 L'engin spatial Mariner, muni de quatre panneaux de cellules solaires en silicone.

Digitized by Google

PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Le fonctionnement de la cellule solaire est basé sur l'effet photovoltaïque, c'est-à-dire la production de porteurs de charge dans un élément par l'absorption d'énergie à partir de la radiation ionisée incidente. Les élements qui assurent le déroulement optimum du processus sont les semi-conducteurs, substances classées entre les conducteurs et les isolants. Ils se caractérisent par leurs électrons de valence qui ne peuvent pas être librement modifiés ou devenir conducteurs de courant comme les métaux, mais sont normalement limités par une configuration d'électrons doubles entre les atomes dans le cristal. Pour les semi-conducteurs cependant, la gamme des niveaux d'énergie normalement occupée par les électrons de valence est suffisamment proche de celle des niveaux d'énergie disponibles pour les électrons conducteurs pour que, par l'absorption énergétique du photon, l'électron puisse franchir l'écart entre la bande de valence et celle de conduite pour devenir vecteur de courant électrique. Le vide qui est créé (trou) dans le lien qui unit la paire d'électrons laissée peut être comblé par un électron en provenance d'un assemblage voisin, qui a l'effet d'une charge positive, ou "trou," allant dans la direction opposée à celle de la trajectoire des électrons.

Pour que l'électricité résultant de la création d'électrons doubles par radiation ionisante soit utilisable, trois conditions doivent être remplies. Premièrement, l'effectif des porteurs assortis de courant créé doit dépasser le nombre normalement enregistré à une température donnée. Deuxièmement, l'élément doit atteindre un certain niveau homogène intrinsèque lui permettant de maintenir des charges opposées séparées jusqu'à ce qu'elles puissent être réunies dans un circuit extérieur. Troisièmement, la distance moyenne de diffusion (durée) pour des trous et des électrons avant leur enchaînement doit être plus grande que celle du "point de captage," c'est-à-dire l'absence d'homogénéité.

L'inhomogénéité est une section du dispositif qui sépare les différents éléments, selon la nature du conducteur qui prédomine dans la conduction de l'électricité : des semi-conducteurs "n" si le conducteur est négatif (électrons) et "p" s'il est positif (trous). La caractéristique "p" ou "n" peut être transférée à un semi-conducteur en l'incorporant à des quantités minimes de treillis de cristal d'un atome contenant un électron de plus ou de moins que chaque atome matriciel contribuant aux assemblages de paires d'électrons avec ses voisins*. Dans le cas du silicium par exemple, quatre électrons de valence composent ces assemblages. En lui ajoutant des atomes à trois électrons de charge, tels que le bore et le gallium dans n'importe quel treillis, l'élément

*On y parvient généralement par diffusion à partir de la surface à une température élevée ou par implantation d'ions à faible température.

absorbeur accepte un électron en vue de compléter l'assemblage avec ses voisins, fournissant ainsi un trou comme porteur de courant et créant une région type p. D'autre part, le phosphore, l'arsenic ou l'antimoine par exemple, contenant cinq électrons de valence, agiront comme des électrons fournisseurs dans les régions de silicium et de type de n.

Les trois types de fonction p–n que l'on retrouve dans les dispositifs semi-conducteurs constituent la barrière de métal semi-conducteur, l'homo-embranchement et l'hétéro-embranchement. On voit un exemple du prèmier cas dans la galène en "spirale métallique" utilisée dans les premiers récepteurs de radio à cristal; l'homo-embranchement est un embranchement p–n dans le semi-conducteur et l'hétéro-embranchement est un embranchement entre deux semi-conducteurs différents.

Bien que la construction en soit facile, les dispositifs d'embranchement du métal semi-conducteur (barrière de Schottky) (Figure 13) n'ont guère pu être utilisés parce que, en tant que cellules solaires, leur rendement est faible; la portion du spectre solaire qu'ils utilisent est plus petite que celle des autres types; ils sont également desservis par le fait que toute radiation sur le métal ne fait qu'élever la température. A la suite d'essais récents, ces dispositifs, dont l'efficacité a été accrue (de 10 à 15 pour cent), ont cependant bénéficié d'un certain intérêt en raison de leur coût peu élevé.

La plupart des découvertes en matière de cellules solaires ont été faites avec des dispositifs à homo-embranchement et hétéro-embranchement. La Figure 14 schématise les caractéristiques de base des cellules solaires.

Substances et configurations possibles

Il existe littéralement des douzaines de substances, utilisées seules ou en combinaison, qui possèdent les propriétés semi-conductrices requises pour

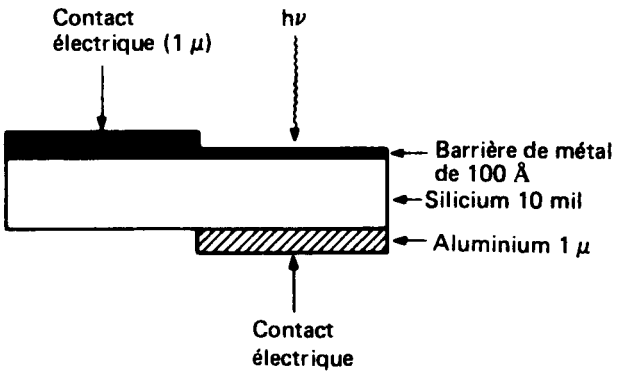


FIGURE 13 Composition de la cellule solaire à barrière Schottky (schéma libre).

une conversion très efficace (>0,10) de la radiation solaire en électricité. Un bon nombre de ces propriétés ont été étudiées pour que ces substances puissent être utilisées comme cellules solaires commerciales. Trois de ces substances, le silicium, le sulfure de cadmium et l'arséniure de gallium—ont été utilisées avec succès dans les engins spatiaux, tandis que pour d'autres les recherches en sont encore au stade expérimental. Le Tableau 1 donne une description partielle de ces recherches et des stades atteints.

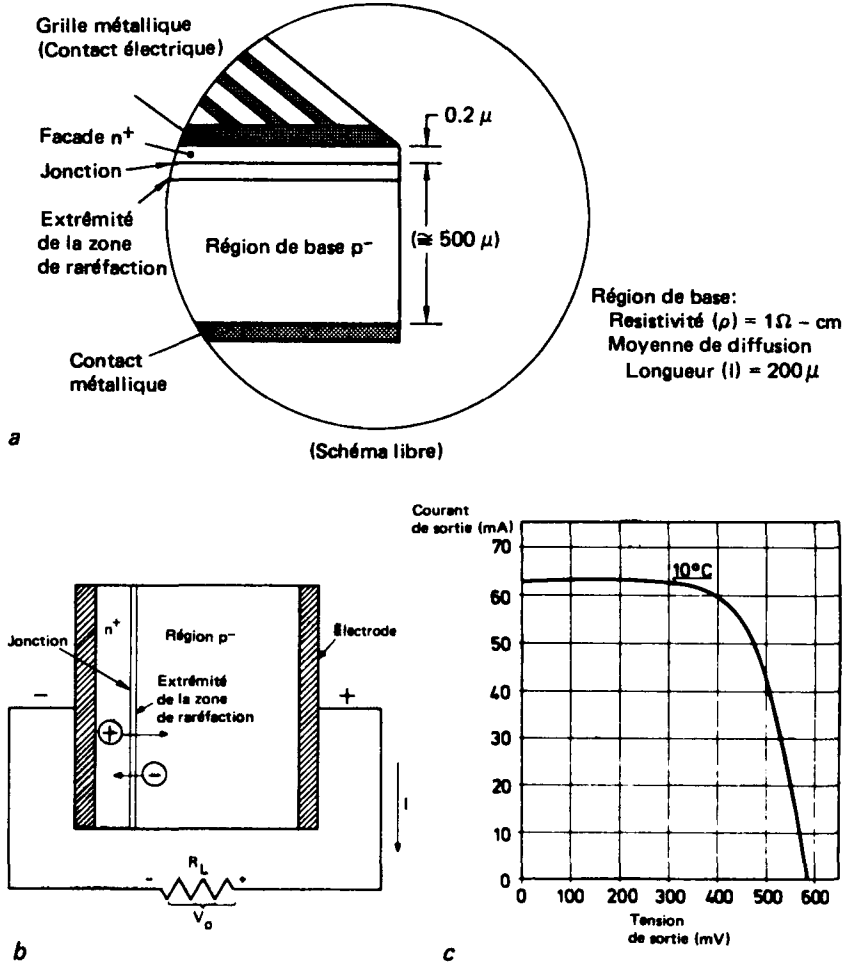


FIGURE 14 Eléments propres à des cellules de jonction solaires. *a*, représente les éléments d'une cellule solaire type n^+/p. *b*, représente une cellule solaire ensoleillée à charge externe. *c*, représente une cellule solaire à éléments I-V.

En plus des substances et des combinaisons possibles, il existe un grand nombre de configurations et de procédés permettant de les obtenir. Les configurations comprennent l'utilisation du matériel de base au moyen de films épais et minces (silicium et sélénium), des variations dans l'embranchement, y compris éventuellement des cellules d'embranchement "verticales" destinées à permettre un fonctionnement à haute tension, d'éléments ternaires tels que GaAlAs aux pour assurer une efficacité accrue et l'utilisation d'éléments de raccordement gradué, également pour obtenir une efficacité supérieure à celle qui est déjà possible avec les éléments de raccordement. Les diverses possibilités sont décrites en détail dans les ouvrages actuellement publiés[2].

Parmi les procédés utilisés pour former l'embranchement de semi-conducteurs, on peut citer la diffusion à températures élevées, l'évaporation pour former une barrière Schottky à la surface du semi-conducteur (comme le silicium), la croissance chimique épitaxiale de couches (silicium, GaAs ou GaAlAs) et l'implantation d'ions. Des substances de base peuvent être constituées par une croissance de cristal unique au moyen de méthodes telles que la croissance de corps dendritiques, la croissance Czochralski et une méthode de production de ruban appelée EFG (croissance de film à limite) (voir plus bas "Techniques actuelles"). Des films minces peuvent être créés par crépitement, par évaporation, par filtrage à la soie et par l'application d'une "courroie" de métal.

Ces exemples ne font qu'illustrer les nombreuses combinaisons des substances, des structures des cellules et des procédés de fabrication possibles. Bien que les recherches théoriques indiquent que la combinaison de plus d'une douzaine de substances peut fournir un fort rendement de conversion et que certains procédés de fabrication (tels que EFG et la formation de films minces) peuvent mener à la construction de cellules intéressantes plus économiquement, la mise au point d'une combinaison pratique presque parfaite de ces cellules prendra probablement près de dix ans et coûtera peut-être $100 millions ou davantage. De la sorte, les coûts de réalisation peuvent se chiffrer à près d'un milliard de dollars. Cependant, si un niveau adéquat de financement est maintenu et que des personnes de l'industrie, des universités et d'autres centres continuent à participer aux activités, la réalisation de systèmes de cellules solaires terrestres rentables pourra se concrétiser.

EXPLOITATION PASSEE ET COURANTE DES DISPOSITIFS PHOTOVOLTAIQUES TERRESTRES

Depuis l'invention de la cellule de silicium en 1955, l'on a enregistré en gros une centaine de différentes applications terrestres pour les systèmes de conversion énergie solaire photovoltaïque, couvrant des expériences scientifiques

TABLEAU I. Substances appropriées à la fabrication de cellules solaires terrestres

Substance	Efficacité[a] (Rendement)	Etat d'avancement[b] des recherches	Type[c]	Mise sur le marché[d] dans 0-5 ans	5-10 ans
AlSb	(e)	Expérimental	III-V	non	probable
InP	,05	Expérimental	III-V	non	probable
GaP	,03	Expérimental	III-V	non	probable
GaAs (Al)	,16	Expérimental	III-V	probable	probable
GaAs ($Ga_xAl_{1-x}As$)	≃0,25	Expérimental	III-V	non	probable
$CdS(Cu_2S)$	,05-,08	Réalisation avancée[f]	II-VI	probable	probable
CdTe	,05-,06	Réalisation avancée	II-VI	non	probable
SiC	,03	Expérimental	IV-VI	non	peu probable
Si	,15-,18	Commercialisé	Elémentaire	oui	
ZnSe	(e)	Possibilité envisagée	II-VI	non	probable
$CuInS_2$	(e)	Possibilité envisagée	$II-III-VI_2$	non	peu probable
$CuInSe_2$	(e)	Possibilité envisagée	$II-III-VI_2$	non	peu probable
$AlInS_2$	(e)	Possibilité envisagée	$III-III-VI_2$	non	peu probable
Zn_3P_2	(e)	Possibilité	II_3-V_2	non	probable
Cu_2O	(e)	Possibilité envisagée	II_2-VI	non	probable

[a]Efficacité des dispositifs telle qu'elle est mesurée dans des conditions atmosphériques de vide (MA0; voir note page 103) à 1400 W/m^2 de radiation solaire incidente (i.e. avec distribution du spectre inchangée par l'absorption atmosphérique ou la diffusion, qui sont les caractéristiques d'un milieu spatial) et d'une température cellulaire d'environ 23°C.

[b]"Expérimental" se réfère aux cellules qui ont été fabriquées en quantités restreintes dans des laboratoires de recherches. "Réalisation avancée" indique des dispositifs fabriqués en grandes quantités dans des conditions qui rappellent plus ou moins la production industrielle. Le mot "commercialisé" porte sur des dispositifs qui sont disponibles commercialement et techniquement, et exploitables par des communautés rurales.

[c]Les chiffres romains indiquent les rubriques des éléments.

[d]Les estimations des délais de commercialisation sont fondées sur les opinions d'un certain nombre d'experts rapportée par des publications récentes. Comme la mise au point sur le plan commercial a récemment bénéficié d'un financement important principalement grâce à l'Administration pour les recherches et les réalisations énergétiques (ERDA), ces estimations pourraient s'avérer trop prudentes.

[e]L'efficacité théorique de ces dispositifs sont de l'ordre de 10-20 pour cent dans des conditions MA0 de 23° C. D'après Loferski[3], ces substances seraient les plus importantes pour des recherches supplémentaires portant un conversion à une système photovoltaïque à rendement élevé.

ainsi que des applications fonctionnelles par l'industrie ou par l'Etat. Des installations à rendement maximum de quelques watts à plusieurs kilowatts ont été construites en Afrique, en Amérique du Sud, au Mexique, aux Etats-Unis, au Canada, en Europe, au Japon, en Asie du Sud-Est et au Moyen-Orient. Ces installations ont fourni de l'électricité aux phares et aux balises, aux postes de radios, aux émissions sur ondes ultra-courtes et aux chaînes de relais sans fil. Ces constructions facilitent également la navigation autour des plates-formes de forage au large des côtes, le fonctionnement de stations météorologiques, des appareils de télévision éducative télécommandés, des cabines téléphoniques d'autoroutes pour les appels d'urgence, des signaux d'avertissement pour les aéroports, des centrales téléphoniques de commande pour la gestion des forêts. (Quelques installations sont représentées sur les Figures 15 et 16.) Actuellement la commercialisation des dispositifs photovoltaïques se chiffre à environ 100 kWe (maximum) et se répartit entre les fabricants japonais, américains et européens (français, anglais et allemands) (Annexe 3).

Prototypes et systèmes au stade expérimental

Les catégories d'application de systèmes photovoltaïques destinés à des exploitations terrestres portent sur des essais scientifiques et des démonstrations, des applications quasi-commerciales de prototypes ainsi que des applications entièrement commerciales.

C'est en 1955 que commencèrent l'utilisation expérimentale et les démonstrations de cellules solaires lorsque les Laboratoires Bell et la Compagnie des téléphones Bell installa à Americus, en Géorgie[4], un réseau téléphonique rural alimenté par l'énergie solaire. Le réseau fonctionna 6 mois environ, à titre de démonstration technique et pour les besoins de la publicité. En 1973, des capteurs photovoltaïques (CdS) et thermiques furent intégrés dans un laboratoire/résidence à l'Université de Delaware[5] dans le but d'examiner la nature des systèmes thermiques solaires électriques et résidentiels rattachés à un réseau local. A l'Institut de technologie de la Californie, des savants du département de géologie utilisent le surplus de panneaux solaires d'engins spatiaux (Ranger et Mariner), modifiés de façon à pouvoir être protégés des intempéries, pour alimenter les stations scientifiques géologiques en Californie et au Mexique[6]. La Société Mitre (McLean, Virginie) met sur pied un système solaire à électricité et à hydrogène de 1 kW en vue de faire un démonstration de l'utilisation de l'électricité produite par l'énergie solaire,

---

(f) Bien que les cellules de sulfure de cadmium existent sur le marché commercial, leur fonctionnement est si irrégulier et si peu compris que, du point de vue de leur utilisation en milieu rural, on devrait les considérer comme de la technologie de pointe.

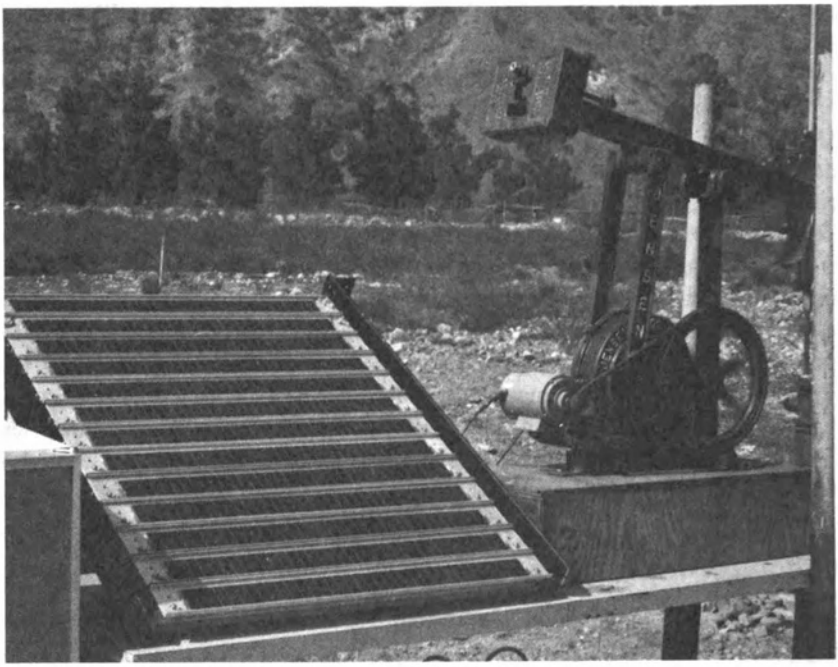


FIGURE 15 Pompe à eau actionnée par une photopile au silicone. L'illustration montre l'un des quatre panneaux nécessaires à l'actionnement du moteur de 1/4 cheval qui fait fonctionner la pompe. Le dispositif mesure 91,4 x 99 cm et produit un courant continu de 4 ampères et 12 volts. [Avec l'autorisation de Spectrolab, Inc.]

alliée à l'hydrogène électrolytique et à un conducteur énergétique secondaire[7]. Ces applications étaient surtout scientifiques et l'on n'a pas envisagé l'exploration des marchés qui pourraient exister sous peu pour les applications voltaïques, bien que les travaux en cours à l'Université de Delaware puissent aboutir à une évaluation du système combinant des capteurs solaires photovoltaïques et thermiques susceptibles d'être mis au point.

D'autre systèmes expérimentaux ont été installés dans le désert chilien dans le cadre d'un project conjoint réalisé par l'université du Chili/RTC (la RTC Radiotechnique-Compelec, France), en Iran (à l'Université Pahlavi à Shiraz), en France, en Afrique, en Russie, en Inde, au Japon, en Angleterre et en Allemagne.

Les dispositifs à vocation commerciale et quasi-commerciale sont ceux qui ont d'abord été réalisés sous forme de prototypes, pour que l'on puisse déterminer l'economie de fonctionnement qu'ils présentent par rapport aux autres systèmes énergétiques actuellement exploités. Ces applications étaient censées répondre à une demande d'énergie de 1 à 100 W, de même qu'aux cas où les coûts de remplacement des piles, du transport de carburants, ou de la création

Digitized by Google

de nouvelles lignes de courant électrique s'avèrent trop onéreux. Ces réalisations incluent, par exemple, les radios-phares téléguidés, les postes émetteurs, les amplificateurs micro-ondes, les stations de relais et les appareils de guidage pour la navigation installés sur les plates-formes de forage en mer. Un certain nombre d'installations réalisées en prototypes sont devenues permanentes, à l'issue d'une période d'activité satisfaisante.

Les exemples dans ce domaine incluent la réalisation de la première exploitation d'un prototype de cellule solaire téléguidée au Japon. Ce type de cellule solaire fournissait 150 MHz VHF à une station de relais du Mont Shinobu[8] au Japon et aux établissements de télécommunications de Motorola du Département des forêts de la Californie durant les premières années des années 60[6]. Dans ces deux cas, la mise en place définitive des installations a été précédée d'un essai de prototypes.

TECHNIQUES ACTUELLES (DISPONIBLES D'ICI CINQ ANS)

Dans le cadre de ce rapport, on entend par systèmes commercialisés, les dispositifs qui ont été réalisés en quantité industrielle par une société donnée,

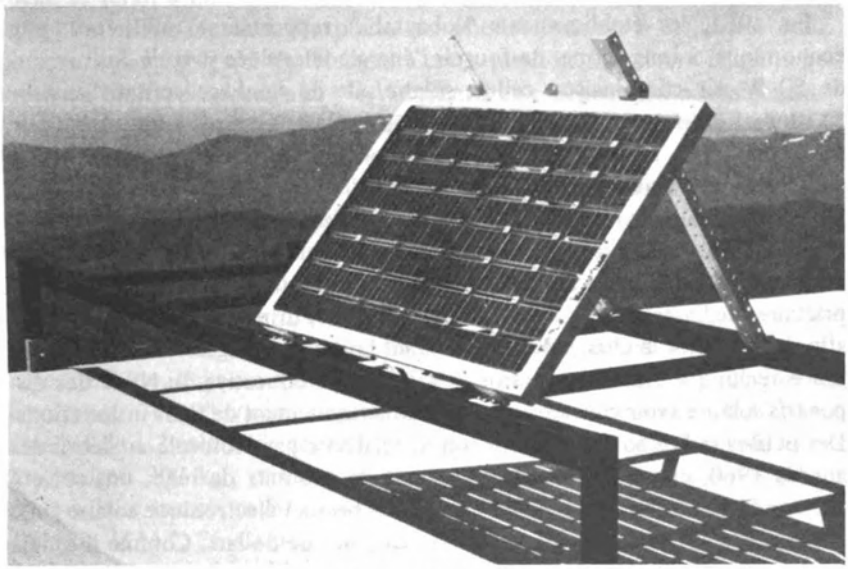


FIGURE 16 Cellules solaires au silicone utilisées dans les services de communications. (Panneau photovoltaïque utilisé par le U.S. Bureau of Land Management (Bureau de la gestion des terres des Etats-Unis) pour actionner une station de relais radio de très haute fréquence située sur le Mont Jack au Névada. Ce dispositif mesure 91,4 cm x 61 cm et produit un courant continu de 2,5 ampères et 12 volts.) [Avec l'autorisation de Spectrolab, Inc.]

Digitized by Google

et par applications commerciales celles qui ont été achetées par des organisations du fait que l'option solaire était la seule alternative rentable, compte tenu du coût annuel. On peut caractériser le marché commercial actuel pour les systèmes photovoltaïques terrestres comme étant celui où l'emploi de ces systèmes sur une base rentable est justifié par une combinaison de facteurs tels qu'une grande fiabilité, un entretien minimal ou nul, l'absence de combustible et un fonctionnement silencieux pour des puissances inférieures à 1 KWe (maximum).

Ces caractéristiques propres aux systèmes photovoltaïques ne sont pas nécessairement avantageux par rapport aux systèmes énergétiques conventionnels s'il est possible d'assurer aisément le ravitaillement en carburant par des transports à pied, à dos d'animaux (chevaux), par Jeep, par hélicoptère, etc., et si les piles sont remplaçables ou peuvent être installées tous les ans, ou encore lorsqu'il est possible d'installer des câbles électriques ou d'effectuer l'insonorisation requise. Chacun des éléments est fonction des coûts, de l'application particulière qu'on en fait et du lieu d'exploitation. Il existe donc certains cas où les éléments propres aux systèmes photovoltaïques se traduisent directement par des avantages économiques. (Dans ce cas, les économistes diraient que le marché qui en assure la commercialisation fonctionne normalement.)

En 1961, les établissements Kobayashi[8] rapportaient qu'il était plus économique, à long terme, de fournir l'énergie téléguidée jusqu'à des niveaux de 50 W par combinaison cellule solaire/pile de stockage coûtant environ $130/watt de pointe, que de poser des câbles électriques sur 1 km. A ce jour, Spectrolab, Inc. a vendu plus de 100 dispositifs pour la fourniture d'électricité aux feux de navigation et de balise des derricks au large des Etats-Unis[9]. Plusieurs états, y compris la Californie, le Nevada et l'Oregon, négocient actuellement l'achat de dispositifs photovoltaïques destinés au fonctionnement de stations de relais radiophoniques et autres opérations; des propriétaires de bateaux de plaisance se procurent des dispositifs photovoltaïques afin de maintenir la charge de piles pendant les longs voyages; en outre, l'assistance technique française fournit à la télévision éducative du Niger des dispositifs solaires (voir ci-dessous) pour le fonctionnement de leurs installations. Des petites radios solaires on été commercialisées par Motorola au début des années 1960, et, pour les consommateurs de produits de luxe, une société allemande vient de mettre sur le marché un briquet électronique solaire (pile chargée à gouttes) qui coûte plusieurs centaines de dollars. Comme il a déjà été mentionné, la demande mondiale des dispositifs en question, destinés à des applications commerciales et à l'industrie aérospatiale, s'élève à quelques 100 kWe (maximum) par an et au prix actuel des dispositifs photovoltaïques, on s'attend à ce que cette demande triple au cours des trois prochaines années[10].

Parmi les divers dispositifs photovoltaïques réalisés récemment, seules les piles solaires à base de silicium sont devenues des produits courants. (Voir

tableau 1.) Les cellules CdS sont utilisées par l'industrie spatiale aux Etats-Unis et en France; les cellules GaAs furent exploitées par l'Union Soviétique dans le cadre de leurs activités d'exploration solaire. Toutefois, les cellules au silicium sont les seuls appareils fabriqués en quantité industrielle qui soient sûrs, stables, durables et dont le fonctionnement est suffisamment connu pour que les propriétés puissent en être prévues et pour que les caractéristiques électriques puissent y être incorporées.

Les dispositifs dont il est question dans le présent rapport sont commercialisés par des fabricants aux Etats-Unis, au Japon, en Allemagne de l'Ouest, en France et en Angleterre. Les fabricants sont disposés à fournir soit les modules individuels de cellules solaires au silicium, bien encapsulés dans des étuis solides, ou des dispositifs complets comprenant les piles et l'équipement de conditionnement énergétique.

La plupart des dispositifs et systèmes actuellement sur le marché ont été réalisés et utilisés dans un but précis, dans les cas où les ressources énergétiques conventionnelles n'étaient pas exploitables et lorsque de modestes besoins en énergie se sont révélés critiques pour les opérations militaires et commerciales. Leur exploitation dans les régions rurales des pays en développement s'avère trop coûteuse, sauf dans la mesure où un besoin particulier ou crucial se ferait sentir. Un sommaire des données relatives à la fabrication de dispositifs et de matériel d'exploitation photovoltaïques a été inclus dans l'annexe 3 pour ceux qui s'intéressent à cette question. Le présent chapitre ne donne qu'un exposé sommaire ; les fabricants eux-mêmes sont probablement la meilleure source de rensignements sur les applications pratiques de ces dispositifs dans diverses régions.

Signalisation solaire à partir de stations téléguidées aux Etats-Unis. En 1973, la Tidelands Signal Corporation de Houston au Texas a mis au point un dispositif de navigation, un système de balises, dont un dispositif solaire au silicium, fabriqué par la Solar Power Corporation (Massachusetts). Ce système fut installé sur une plate-forme de forage au large de la côte du Golfe du Texas. Le réseau de balises comprend un feu anti-brouillard de 3,2 km et 4 lampes de 8 km. Leur consommation d'énergie est d'environ 25 amp-hr/jour x 12 volts soit 300 Whe/jour. Auparavant, ce réseau était alimenté par 40 piles primaires de 1,2 volts, soit des piles primaires de 3.300 amp/hr. Le poids total était environ 900 kg ; et ces piles étaient remplacées tous les ans. La génératrice solaire incorpore 80 modules photovoltaïques (1,5 W maximum sous insolation MA1*, 25°C) pour un dispositif de 1,22 m x 1,52 m). Selon les données existantes, il semble qu'au prix de revient unitaire, ce dispositif coûte

*Le rapport "masse d'air" (MA) est le rapport entre la distance parcourue par la lumiére dans l'atmosphère et la longueur de son parcours dans l'atmosphère quand la source de lumière est au zénith. Ainsi, dans le cas considéré ici, MA1 implique que le soleil est en plein midi.

environ $20/au Watt maximum. On a pu en outre estimer qu'à de tels prix les dispositifs terrestres (emballés, prêts pour l'installation) peuvent faire concurrence aux piles primaires et secondaires sur les marchés traditionnels déjà desservis par ce genre d'équipement[11]. Le rapport sur le système en question estime que "les photopiles solaires/piles secondaires semblent faire nettement concurrence à l'équipement traditionnel, si l'on en juge d'après les coûts pour une durée de vie complète, bien que qu'on ne dispose pas encore de données numériques précises."

Le Lewis Research Center de la National Aeronautics and Space Administration (NASA) et la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) travaillent conjointement sur un projet visant la conception, la réalisation et l'installation d'un certain nombre de systèmes solaires pour le fonctionnement de stations de contrôle atmosphérique téléguidées[12,13]. Deux installations, l'une en Virginie (Sterling) et l'autre en Californie (Mammoth Mountain), ont été construites en 1973 et la construction d'autres stations est envisagée. Pour les essais précédant leur application commerciale, les dispositifs solaires ont été fabriqués par NASA/Lewis à base de cellules commerciales composées de 48 (6 x 8) cellules circulaires au silicium et fournissant chacune 3 W (MA1) par module. Les dispositifs de chacune de ces installations comportent 20 modules à rendement maximum de 60 W et sont encapsulés dans des feuilles d'éthylène propylène à base de fluor (FEP).

Télévision alimentée par photo-pile solaire au Niger. Ce système est un des rares exemples d'application documentée de l'exploitation de dispositifs photovoltaïques dans un pays en développement[13]. Bien que des programmes semblables en matière de télévision éducative au service des écoles rurales aient été mis en oeuvre ou soient actuellement en cours d'exécution dans d'autres pays en développement (la Côte d'Ivoire, le Brésil et l'Inde, par exemple) aucune de ces applications ne semble avoir nécessité l'utilisation de cellules solaires comme source d'énergie.

La télévision scolaire du Niger (TVSN), créée en 1966, est un programme destiné à améliorer le niveau de l'enseignement primaire dans ce pays. Ce système d'éducation télévisée vise en premier lieu les écoles primaires situées dans les régions non-électrifiées. La réception est assurée par l'utilisation de récepteurs de télévision conçus spécialement pour le fonctionnement dans des climats extrêmement chauds ou froids. Ces appareils sont transistorisés. Ils recevront des émissions sur une longueur d'onde de 61 cm (492 MHz) et fonctionnent sur des piles de 35 W à 34 volts c.c. (±15 pour cent). Comme pour le devis de 2.000 heures en moyenne établi pour chaque pile, on a estimé qu'une heure de réception télévisée coûte 1,38 Frs par appareil de réception.

Dans le but de trouver une source d'énergie plus économique, les services techniques de la TVSN et l'Office de l'Energie Solaire de Niamey ont installé,

en 1968, un panneau solaire expérimental destiné à alimenter le téléviseur d'une école située près de Niamey. L'expérience consistait à démontrer qu'un téléviseur pouvait être alimenté par l'énergie solaire à Niamey durant toute l'année scolaire (d'octobre à juin). A la suite d'une étude d'application effectuée par l'ORTF (Office national de la radio-télévision française), six autres installations ont été mises en place en 1972, et en 1973 quelque 800 étudiants dans 22 classes suivaient des cours diffusés par télévision solaire depuis le centre de production situé à Niamey.

Etant donné les résultats encourageants de cette expérience, le gouvernement du Niger a décidé d'instaurer un réseau de télévisions solaires destiné à fournir des programmes d'enseignement à 80 pour cent de la population d'ici 1985[13].

Fiabilité (Durée de vie et entretien)

Les dispositifs photovoltaïques n'ont pas de pièces démontables et les mécanismes de base propres aux appareils photovoltaïques ont une durée de vie mesurée en milliers d'années pour les appareils au silicium. (Cette durée de vie est donc fonction du taux auxquel les atomes d'impureté qui forment la jonction p-n se diffusent à travers une couverture de cristal, provoquant la dégradation de cette jonction.) On a élaboré des techniques qui visent à encapsuler des cellules solaires au silicium dans des vitres de silicium transparent qui fourniraient une isolation excellente contre le choc et protègeraient les appareils du milieu ambiant. Il est établi que plus cette encapsulation est hermétique, plus la durée de vie du dispositif se rapprochera de celle du matériel de construction de base.

Une telle efficacité peut être cruciale dans le cas de certains dispositifs, surtout quand ceux-ci sont particulièrement avantageux du point de vue économique et recèlent des possibilités de développement rapide et continuel. En général, les nouvelles inventions ne sont pas immédiatement acceptées et ne sont adoptées qu'à la fin d'une longue période d'essais et d'expériences[14].

Dans le cas de dispositifs utilisant des cellules solaires suffisamment élaborées, l'entretien nécessaire à un fonctionnement très efficace (de l'ordre d'une défaillance pour 10 ans d'opération) sera probablement assez limité et peu coûteux. Il comprendra notamment la protection des surfaces transparentes contre l'abrasion et les nettoyages périodiques que nécessitent la surface et, peut-être, les connexions électriques. Les modules pourraient être conçus de manière à ce que l'entretien soit limité à des nettoyages espacés. Un certain nombre de systèmes photovoltaïques ont fonctionné plus de 10 ans sans nettoyage et sans dégradation visible en dépit d'une pollution industrielle relativement forte, comme dans le cas de l'Aéroport de Cleveland, par exemple.

L'entretien des cellules solaires ne nécessite que très peu de main-d'oeuvre. En dehors des compétences et du matériel normalement requis par l'entretien des piles, la surface du dispositif solaire n'exige qu'un lavage périodique à l'eau et—quelquefois au savon avec un chiffon—afin de maintenir l'appareil en bon état. Ces appareils n'exigent donc aucune infrastructure de soutien pour l'entretien et la réparation, ni aucune formation spécialisée pour le personnel d'entretien, ni aucun outillage spécial. (Ces avantages sont à comparer à l'outillage, à la formation des techniciens et aux pièces détachées, nécessaires au fonctionnement des groupes électrogènes les plus simples.)

Coût

L'économie des systèmes énergétiques à grande échelle actuellement exploités dans les pays industrialisés (et à un moindre degré dans les pays en développement) diffère sensiblement de l'économie d'exploitation énergétique sur une petite échelle des pays en développement. Toutefois, il faudra estimer le montant de l'investissement nécessaire dans l'un et l'autre cas avant d'essayer de calculer les coûts d'exploitation définitifs de l'énergie fournie au consommateur final par ces systèmes. Les coûts d'exploitation d'un système de conversion d'énergie comprennent plusieurs éléments en plus de l'investissement en capital nécessaire au module de conversion solaire. Ces investissements ou dépenses initiales incluent le prix des modules-éléments des dispositifs, des structures de soutien et d'orientation, de la tuyauterie (en cas de réfrigération), des piles, des invertisseurs, des dispositifis de conditionnement énergétique ainsi que le système de distribution électrique. D'autres dépenses d'investissement comprendraient l'achat de pièces détachées, d'outils, de produits pour le nettoyage des surfaces et pour la protection contre la corrosion (le cas échéant) et, probablement la mise en place d'une infrastructure de soutien, y compris des moteurs à combustion interne meilleur marché en plus des génératrices et parfois l'utilisation de carburant. D'autres dépenses se rapporteront à l'emballage et au transport des divers éléments jusqu'au site, aux redevances et droits d'importation et à la main-d'oeuvre pour l'assemblage et le fonctionnement du système. Le dépenses supplémentaires comprendront san doute la création d'une infrastructure de soutien locale pour l'achat de pièces detachées, la formation du personnel aux techniques de fonctionnement du matériel, la rédaction et la publication de manuels d'utilisation et autres coûts occasionnés par des facteurs locaux tels que la nécessité de mesurer la quantité d'électricité utilisée par chaque membre d'une communauté. Les dépenses d'ordre social comprendront les indemnités ou fonds destinés au recyclage ou à la réaffectation de commerçants dont l'unique source de revenus était la distribution de kérosène ou d'un autre carburant et qui ont été partiellement ou totalement remplacés par l'exploitation de l'énergie solaire. A titre d'hypothèse, une liste des ces éléments figure au Tableau 2.

TABLEAU 2. Eléments des coûts d'un système photovoltaïque

Coût en capital	Coûts d'exploitation
Equipement	*Equipement*
Modules de conversion solaires, y compris structures de soutien mécaniques, transfert calorifique, (actif ou passif), mécanismes d'orientation, concentrateurs, etc.	Pièces détachées pour remplacer les composants usagés ou endommagés
Piles	Remplacement des piles (3 à 5 ans) et autres pièces endommagées par la corrosion et autres formes de dégradation; Moteurs après 3 ans
Mécanismes de conditionnement (inverseurs, régulateurs d'intensité, stabilisateurs de courant, transformateurs, etc.)	Outils, manuels, etc., continuellement nécessaires et fragiles ou fongibles (ou à remplacer par suite de vol, de vente ou pour d'autres raisons)
Mécanismes de transmission locale, y compris câbles, prises, connexions, contacts, relais, etc.	
Transport	*Entretien et fonctionnement*
Emballage pour d'éxpédition	Main-d'oeuvre d'entretien, coûts éventuels pour protection nocturne
Transport de l'usine aux pays les moins développés (dans le cas de composants qui ne peuvent être produits localement)	Main-d'oeuvre pour le fonctionnement des systèmes, y compris le mode de fracturation ou d'autres moyens permettant de répartir localement le coût du système
Transport jusqu'au site	
Redevances	*Coût en capital*
Droits d'importation	Intérêts sur les capitaux empruntés pour l'achat des systèmes
Impôts	
Imprévus	
Soutien Local	*Taxes locales et autres frais*
Pièces détachées	Taxes et redevances locales éventuelles
Outils	
Manuels	
Formation	
Installation des dispositifs	*Carburants*
Coût du terrain	Dépenses en carburants pour le système de soutien éventuellement nécessaire pour ramener les risques de pannes du matériel solaire à des niveaux supportables.
Main-d'oeuvre et matériel nécessaire à l'installation	
Infrastructure pour l'entreposage des piles, de l'équipement de conditionnement d'énergie, etc.	

Enfin, comme dans le cas de n'importe quel investissement, l'investissement en capital et les coûts d'exploitation demeurent des facteurs essentiels à l'estimation générale des coûts afférents à l'exploitation énergétique. Dans le cas du système photovoltaique où les coûts d'exploitation sont fonction du montant de l'investissement en capital destiné à l'installation du système, les taux d'intérêt appliqués aux prêts revêtent une importance particulière puisque le taux d'amortissement sera presque arithmétiquement proportionnel au taux d'intérêt.

On peut déterminer avec précision et sur la base du coûts unitaires des éléments du dispositif fini, le prix unitaire des cellules. Les coûts effectifs de l'énergie produite par le dispositif en question sont fonction du rendement de la cellule, de la température, de l'intensité d'illumination, de la longueur d'onde, des facteurs d'insolation et autres variantes écologiques. Dans la mesure où l'exploitation efficace de ces cellules dépend de l'intégration des modules, il conviendra de déterminer les coûts d'exploitation sur la base du rendement de ces modules et non des cellules. Le prix unitaire actuel des cellules solaires au silicium s'élève à $10.000 par rendement kWe de pointe, (à savoir $40.000-$60.000 par kWe moyen) ; le prix d'un dispositif complet (avec ou sans pile ou conditionneur d'énergie—puisque ces éléments ne coûtent pas cher) est situé entre $30.000 et $70.000 par kWe de pointe (jusqu'à $120.000 et plus une production moyenne d'énergie). La production de dispositifs ou de modules solaires à des prix intéressants pour l'exploitation rurale dans les pays en développement (c'est-à-dire à raison de $1.000/kWe en moyenne), dépendra des réductions de coûts importants que l'on pourra réaliser dans la productions des "flancs" des semi-conducteurs et de leur adaptation à la cellule finie. Elle sera en outre fonction des techniques de jonction de cellules qui auront été perfectionnées ainsi que de l'efficacité des pièces de contact, de connexion, de couverture pour l'assemblage final du module ou du dispositif en question.

De toutes les diverses techniques actuellement envisagées, une seule semble pouvoir, dans le cas des "flancs" de cellules finies, réduire les coûts dans des proportions suffisantes pour que ceux-ci soient inférieurs à $1.000/kWe d'ici les 5 prochaines années. Cette technique actuellement commercialisée par la Mobil Tyco Solar Energy Corporation de Waltham, au Massachusetts, vise la production d'un ruban au silicium continu de qualité supérieure (libre de toute impureté ou d'imperfection dans les lattis) pour la fabrication de cellules solaires à haut rendement de conversion (en dessus de 10 pour cent) dans des conditions normales. Ce procédé est connu sous le nom de EFG ou (Edge-Defined Film Growth Technique). Il consiste à plonger une "graine" de cristal de silicone dans un bain de silicone liquide chauffée et à l'étirer en film par découpage capillaire (voir Figure 17) pour en obtenir un ruban. (Un prototype de dispositif cellulaire fabriqué avec ce matériel est illustré à la

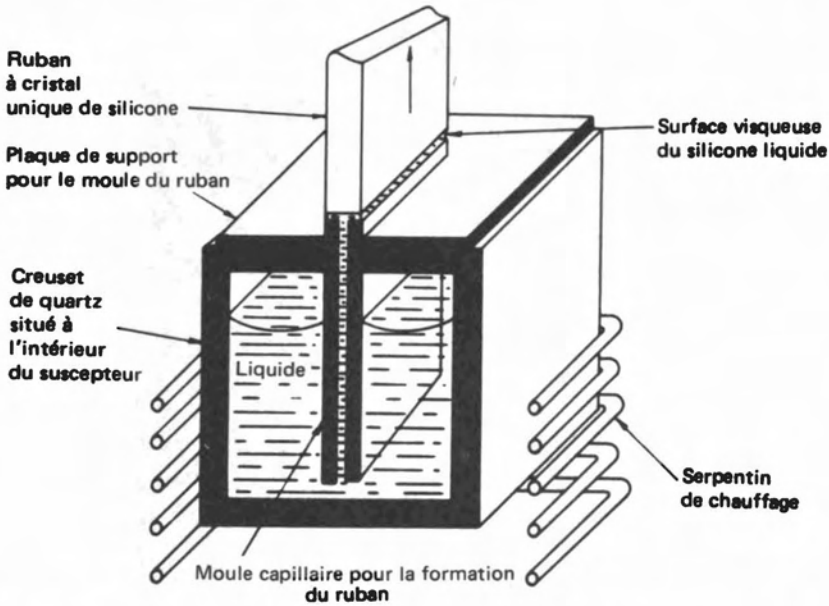


FIGURE 17 Schéma de la formation du ruban de silicone pour cellules solaires [par procédé EFG, Edge Defined Film Growth (développement de la surface visqueuse à partir des surfaces latérales)] par moule capillaire. [Avec l'autorisation de Mobil Tyco Solar Energy Corporation]

Figure 18.) Des rubans mesurant 2,54 cm de largeur et de 0,2 mm d'épaisseur sont continuellement étirés à raison de 2,5 à 3,7 cm à la minute ; ils mesurent jusqu'à 24 m de long. On a estimé la production de cellules solaires valant $165 le kWe (rendement maximum, MA1 10 pour cent de rendement, 0,1 mm d'épaissuer) ou entre $500 et $800 par kW moyen[15]. Ces estimations sont fondées sur l'hypothèse des économies censées découler de la réduction dans la perte de silicium utilisé pour la fabrication (coefficient 2) ; de la réduction plus poussée (coefficient 3) du contenu de silicium due à l'ajustement de l'épaisseur de la feuille ; et la diminution (coefficient 3) du coût du silicium, due au nouveau procédé de transformation. De surcroît, on envisage la possibilité de réduire de manière significative les dépenses de fabrication, grâce à l'utilisation de collecteurs solaires capables de concentrer la lumière dans une zone beaucoup plus large de la cellule, et, partant, d'accroître la zone de rendement de la cellule solaire. La Figure 18 illustre le prototype d'une cellule solaire construite avec un ruban au silicium. Ce type de ruban est actuellement réalisé à des fins d'exploitation commerciale.

Il convient de noter qu'au stade actuel de développement et en raison des dislocations découvertes dans les lattis du ruban, il n'est pas encore possible

Digitized by Google

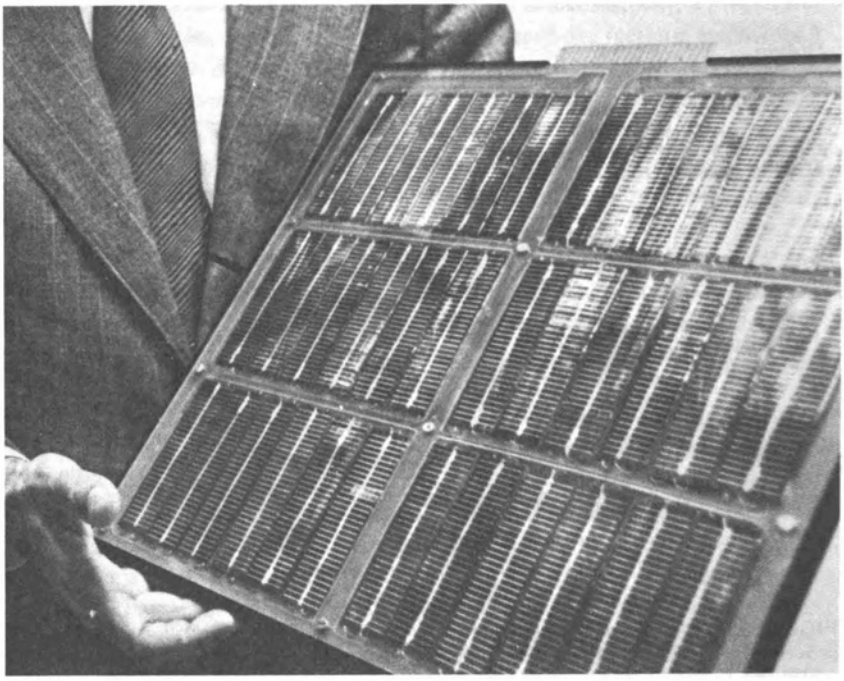


FIGURE 18 Pile photovoltaïque terrestre (prototype) fabriquée avec un ruban de silicone EFG. [Avec l'autorisation de Mobil Tyco Solar Energy Corporation]

d'obtenir les rendements prévus (10 à 20 pour cent) dans les conditions actuelles de fabrication des cellules solaires par diffusion directe et à base de rubans au silicium. On a toutefois obtenu de tels rendements, à l'aide d'une couche épitaxiale de silicium appliquée au ruban EFG et d'une jonction formée dans la couche en question*.

D'autres techniques de mise au point d'un procédé de fabrication peu coûteux pour la production de dispositifs solaires actionnés par des photopiles au silicium ont été examinées en détail par Wolf[17]. Parmi les techniques examinées par ce dernier, il convient de noter la génération de feuilles polycristallines de silicium par roulage ou extrusion suivie d'une recristallisation grâce à de nouveaux développements de feuilles par zones flottantes.

*Des publications récentes indiquent, par exemple, qu'on a obtenu un coefficient de conversion de 10 pour cent avec cellule à ruban EFG sur laquelle a été formée une couche épitaxiale de silicium de 30μ, alors que dans le cas du seul ruban le coefficient n'était que de 6,2 pour cent.

Digitized by Google

RECHERCHES ET REALISATIONS

Bien que la réalisation de dispositifs solaires actionnés par des photopiles au silicum coûtant en moyenne moins de $1,000 kWe ont fait l'objet de discussions dans les alinéas précédents, il s'avère extrêmement difficile de se prononcer sur l'avenir de ces dispositifs pour les cinq ou dix années à venir. Il semble toutefois probable que d'ici 1985, ces dispositifs seront commercialisés à $500/kWe en moyenne, mais leur mise au point avant cette période dépend dans une large mesure de l'intérêt qu'on y portera et de la demande commerciale sur le plan mondial.

L'intégration de cellules solaires à des concentrateurs optiques a déjà été l'objet de recherches dans le passé. L'avantage qui pourrait découler de la réduction de la zone de la cellule nécessaire au rendement électrique voulu serait une diminution des besoins cellulaires de l'ordre de 4 à 10 ; il semblerait donc avantageux d'encourager la réalisation d'économies par la mise au point de nouveaux procédés de fabrication. Cela est particulièrement vrai pour les situations où l'on dispose d'une eau de réfrigération capable de maintenir la température du silicium au-dessous du niveau où il pourrait affecter le rendement de la cellule. (A une température de 200°C, le rendement maximum théorique est réduit d'environ 5 pour cent sur une limite maximum théorique de 22 pour cent à 25°C.)

Des substances autres que le silicium s'avèrent particulièrement appropriées à la fabrication de cellules solaires à rendement élevé, qui pourraient être commercialisées d'ici une dizaine d'années (Tableau 1). Néanmoins, il est difficile de se prononcer sur les possibilités de réalisation d'un système de fabrication qui les rendrait rentables dans les pays en développement. L'arsenite de gallium est une substance particulièrement intéressante en raison de sa disposition d'induits particulière qui résulte de l'absorption de la lumière du soleil incidente à une profondeur d'environ 1-2μ (comparée à 100-200 μ pour le silicium), ce qui réduit la quantité de substance à employer par unité de fabrication, réduction impossible dans le cas du silicium. On pourrait peut-être ainsi compenser partiellement son prix d'achat élevé. En outre, en raison de ses propriétés électroniques, le GaAs comporte un rendement théorique plus élevé que le silicium, sa disposition d'induits (1,35 eV) étant plus proche du maximum d'absorption solaire (moyenne d'énergie photon $\simeq$ 1,5 eV) que celle du silicium (1,1 eV). Cette substance maintient son rendement élevé même à des températures très élevées, et, partant, rend plus prometteuse l'exploitation potentielle des concentrateurs*. Donc, la

*Bien qu'il existe plusieurs autres substances à disposition d'induits similaires autres que le GaAs, qui pourraient tout aussi bien remplacer le silicium, les industries on cherché à améliorer la production de l'arsénite de gallium plus que celle de toute autre substance.

combinaison de facteurs tels que des feuilles plus minces, des zones réduites et un rendement plus élevé (pouvant atteindre 19,1 pour cent plus un facteur de concentration de 1735)[18] –font de l'arsenite de gallium une substance qui pourrait faire concurrence au silicium pour la fabrication de cellules solaires. Toutefois, comme son coût le rend difficilement accessible, il ne pourra devenir un produit de fabrication que dans la mesure où la demande à l'échelon mondial est suffisante.

EXPLOITATION DES SYSTEMES PHOTOVOLTAIQUES DANS LES PAYS EN DEVELOPPEMENT

L'attrait des systèmes photovoltaïques pour les pays en développement est, dans une large mesure, fonction de l'incidence économique de l'investissement en capital et des frais d'exploitation. Dans certains cas, on pourrait envisager l'assistance d'organismes d'aide bilatérale tels que l'Agence Américaine pour le développement international (U.S.A.I.D.) ou un organisme international tel que le Programme des Nations unies pour le développement (PNUD) ou la Banque Internationale pour la reconstruction et le développement (la Banque Mondiale). Dans d'autres pays, ces fonds pourraient provenir des intéressés eux-mêmes. Il serait nécessaire d'analyser en détail les services connexes ou dérivés de l'énergie (en particulier de l'énergie électrique) dans divers milieux sociaux et géographiques avant d'évaluer le marché potentiel ouvert aux dispositifs énergétiques solaires (sauf dans la mesure où les coûts des systèmes en question soient suffisamment réduits et justifient leur exploitation en tant que système d'option viable et rentable pour l'instauration de réseaux énergétiques à grande échelle). La nature et la dimension des divers marchés situés dans les pays en développement dépendront des coûts d'installation des systèmes photovoltaïques ainsi que de la valeur des coûts attribuables aux services dérivés de l'électricité. Une partie de l'analyse requise serait une évaluation économique de la valeur attribuée aux éléments suivants, particuliers aux systèmes photovoltaïques :

- Haute précision ;
- Besoins d'entretien minimum ;
- Ne nécessite pas de carburants ;
- Rendement maximum intermittent, sans stockage, rendement continu avec stockage ; et
- Modularité (c'est-à-dire que lorsqu'un élément tombe en panne, le reste du système continue à fonctionner, ce qui n'est pas le cas des génératrices).

La précision et les modalités d'entretien du système ont fait l'objet d'un examen précédent. Les systèmes photovoltaïques ont l'avantage de ne dé-

pendre d'aucun carburant pour leur fonctionnement, de même que les autres options techniques examinées dans le cadre du présent rapport. La nature intermittente de leur rendement (avec ou sans stockage) est une autre caractéristique qu'ils partagent avec plusieurs de ces techniques. La modularité des systèmes photovoltaïques est toutefois inhabituelle et mérite une attention particulière.

La modularité des systèmes photovoltaïques permet aux usagers d'en acquérir l'expérience grâce à un investissement modeste. C'est là un aspect crucial pour la dissémination rapide de toute invention[14]. Lorsque des investissements considérables sont nécessaires à l'exploitation de nouvelles techniques, ces dernières pourraient n'être jamais acceptées, car il n'y aurait que rarement l'occasion de les essayer dans des conditions de risques financiers acceptables. Les systèmes se développent à mesure que la communauté locale s'enrichit et les éléments des systèmes pourraient être conçus pour permettre la création de réseaux de distribution locaux à mesure que les réseaux voisins s'étendent et deviennent contigus. Le chargement des systèmes de distribution s'accroîtra en progression relative avec le rendement, ce qui garantit l'amortissement éventuel de l'investissement. Finalement, l'adoption d'un système modulaire signifie que peu d'éléments risquent de tomber en panne et que le système continuera à fonctionner. Les pièces détachées sont toujours faciles à obtenir et sont peu coûteuses.

REFERENCES

1. Winston, Roland. 1974. Principles of solar concentrators of a novel design. *Solar Energy* 16:89-95.
2. Voir, par exemple :
   a. *Photovoltaics specialists conference: Conference records*. 1972-1975 eds. New York: Institute of Electrical and Electronic Engineers.
   b. *The Photovoltaic power and its applications in space and on earth*. 1973. Special volume of the *Proceedings. International Congress of The Sun in the Service of Mankind, 2-6 July 1973, UNESCO House, Paris*. Bretigny-Sur-Orge, France: Centre National d'Etudes Spatiales.
   c. *Proceedings of the Symposium on the Material Science Aspects of Thin Film Systems for Solar Energy Conversion, 20-22 May 1974, Tucson, Arizona*. U.S. National Science Foundation, RANN–Research Applied to National Needs, Document No. NSF-RA-N-74-124. Tucson: University of Arizona, Optical Science Center.
   d. *Workshop proceedings. Photovoltaic Conversion of Solar Energy for Terrestrial Application, 23-25 October 1973, Cherry Hill, New Jersey*. 2 vols. U.S. National Science Foundation, RANN–Research Applied to National Needs, Document Nos. Vol. I: NSF-RA-N-74-013A, Vol. II: NSF-RA-N-74-013B. Pasadena: California Institute of Technology, Jet Propulsion Laboratory.

3. Loferski, J. 1974. Some problems associated with semiconductor materials for large scale solar energy conversion. In *Proceedings of the Symposium on the Material Science Aspects of Thin Film Systems for Solar Energy Conversion, 20-22 May 1974, Tucson, Arizona*, p. 237. U.S. National Science Foundation, RANN–Research Applied to National Needs, Document No. NSF-RA-N-74-124. Tucson: University of Arizona, Optical Science Center.
4. Pearson, G. 1964. Applications of photovoltaic cells in communications. In *Proceedings of the United Nations Conference on New Sources of Energy: Solar Energy, Wind Power and Geothermal Energy, 21-31 August 1961, Rome, Italy*, Vol. 4:236-241. U.N. Document No. E/Conf.35/5. New York: United Nations.
5. Böer, K. W. 1973. The solar house and its portent. *Chemical Technology* (July): 394-400.
6. Costoque, E., and Vivian, H. 1969. *Solar energy rechargeable power systems*. Jet Propulsion Laboratory Document No. 650-681. Pasadena: California Institute of Technology, Jet Propulsion Laboratory.
7. Johnson, Augustus. 1975. Communication personnelle.
8. Kobayashi, M. 1964. Utilization of silicon solar batteries. In *Proceedings of the United Nations Conference on New Sources of Energy: Solar Energy, Wind Power and Geothermal Energy, 21-31 August 1961, Rome, Italy*, Vol. 4:229-235. U.N. Document No. E/Conf.35/5. New York: United Nations.
9. Rosenblatt, A. I. 1974. Energy crisis spurs development of photovoltaic power sources. *Electronics* 47(7):99-111.
10. Ralph, E., and Wolf, M. 1975. Communication personnelle.
11. Kelly, B. P.; Eckert, J. A.; and Berman, E. 1973. Investigation of photovoltaic applications. In *The photovoltaic power and its applications in space and on earth*, pp. 511-518. Special volume of the *Proceedings. International Congress of the Sun in the Services of Mankind, 2-6 July 1973, UNESCO House, Paris*. Bretigny-Sur-Orge, France: Centre National d'Etudes Spatiales.
12. Forestieri, A. F. 1973. Photovoltaic terrestrial applications. *Workshop Proceedings. Photovoltaic Conversion of Solar Energy for Terrestrial Application, 23-25 October 1973, Cherry Hill, New Jersey*, Vol. II: 150-152. 2 vols. U.S. National Science Foundation, RANN-Research Applied to National Needs, Document No. NSF-RA-N-74-013 B(Vol. II). Pasadena: California Institute of Technology, Jet Propulsion Laboratory.
13. Polgar, S. 1973. Alimentation de téléviseurs par photopiles pour la télévision scolaire du Niger. Paper presented at the International Solar Energy Society Conference, 2-6 July 1973, Paris.
14. Rogers, Everett M., and Shoemaker, F. Floyd. 1971. *Communication of innovations–a cross cultural approach*. 2d ed. New York: Free Press.
15. Mlavsky, A. I. 1974. Ribbon growth of silicon. In *Proceedings of the Symposium on the Material Science Aspects of Thin Film Systems for Solar Energy Conversion, 20-22 May 1974, Tucson, Arizona*, pp. 71-83. U.S. National Science Foundation, RANN-Research Applied to National Needs, Document No. NSF-RA-N-74-124. Tucson: University of Arizona, Optical Science Center.
16. D'Aiello, R. V.; Robinson, P. H.; and Kressel, H. 1975. Epitaxial silicon solar cells. *Technical digest*. Abstract of papers presented at the Annual Meeting of International Electron Devices, 1-3 December 1975, Washington, D.C., pp. 335-338. New York: Institute of Electrical and Electronic Engineers.

17. Wolf, M. 1974. Methods for low cost manufacture of silicon solar arrays. Paper 74-WA/Ener-4. New York: American Society of Mechanical Engineers.
———. 1975. Cost goals for silicon solar arrays for large scale terrestrial applications–update 1974. *Energy Conversion*, Oxford, England 14:49-60.
———. n.d. Progress in new low cost processing methods. Philadelphia: University of Pennsylvania.
18. James, Lawrence W. 1975. III-V compound heterojunction solar cells. *Technical digest*. Abstract of papers presented at the Annual Meeting of International Electron Devices, 1-3 December 1975, Washington, D.C., pp. 87-93. New York: Institute of Electrical and Electronic Engineers.

DEUXIEME PARTIE

EMPLOIS INDIRECTS DE L'ENERGIE SOLAIRE

L'énergie éolienne

On considère le vent comme "le principal moyen terrestre capable de capter, asservir et conserver l'énergie solaire"[1]. Naturellement, le vent trouve ses origines dans les différences de température atmosphérique dues au soleil, qui, à leur tour, provoquent les variations de pression. Le vent constitue le mécanisme de dispersion, sous forme d'énergie cinétique, du potentiel d'énergie accumulé dans ces différences de pression.

Pendant des milliers d'années, on s'est servi de l'énergie éolienne pour propulser bateaux et navires ou faire tourner les moulins à vent qui réduisent l'effort physique imposé à l'homme. Le moulin à vent est une invention qui date des premiers temps de l'histoire[2]. Nous avons la preuve que les anciens Egyptiens utilisaient déjà les moulins à vent en 3600 A.C. pour pomper l'eau destinée à l'irrigation de leurs champs arides et pour moudre le grain. Les premiers Perses moulaient le grain au moyen de moulins à vent entoilés et à axe vertical. Les Européens ont importé cette technique d'Orient et ont probablement été les premiers à utiliser les moulins à vent à axe horizontal, vers le 12ème siècle. C'est surtout ce dernier type qui a évolué d'abord à cause de sa faible vitesse de rotation et de la plus grande efficacité de l'arbre horizontal. Jusqu'au 19ème siècle, le métier de constructeurs de moulins à vent était très répandu et on construisait des moulins pouvant fonctionner sans défaillance pendant des siècles, sous réserve de remplacer la voilure tous les quinze ou vingt ans.

Traditionnellement, les populations rurales utilisaient les éoliennes surtout aux fins suivantes :

- Pour pomper l'eau destinée à des fins domestiques telles que : abreuver le bétail et arroser les cultures ;

- Pour accomplir les travaux agricoles tels que la mouture du blé, le battage, le sciage du bois et le broyage de la canne à sucre ;
- Pour des applications particulières telles l'adduction d'eau salée aux salines ; et plus récemment,
- Pour la production d'électricité.

Au niveau du village, les formes classiques de moulin à vent constituent, dans de nombreuses sociétés, une technologie familière et bien établie. Au cours des dernières années, certaines organisations aussi bien dans les régions industrialisées que dans les régions en voie de développement, ont essayé de combiner l'énergie éolienne et des techniques plus avancées pour parvenir à des formes susceptibles d'être utilisées dans des communautés rurales. Les travaux de plusieurs organisations aux Etats-Unis et au Canada sont signalés dans ce rapport, mais cette liste n'est pas limitative et les exemples n'y figurent que pour illustrer le genre de travail réalisé dans ce domaine.

En Asie, l'expérience en matière de moulins à vent remonte aux temps les plus anciens ; on ne mentionnera ici que quelques exemples caractéristiques. L'éolienne horizontale semble avoir été introduite en Chine à l'époque des Song (960-1280)[3]. Elle a évolué par la suite vers un modèle très différent, de type persan, en utilisant pour les ailes le principe de la voile lattée, empruntée à la jonque. En République populaire de Chine, on emploie d'ordinaire l'éolienne pour l'irrigation de petites étendues, par entraînement d'un système de chaînes à godets. Les éoliennes sont toujours construites avec des matériaux locaux—bambous et bois—et en général par l'utilisateur lui-même, bien qu'à une certaine époque, elles aient pu être construites par des artisans pour leurs clients. Avec des modifications mineures, on peut utiliser le même appareil pour broyer les haricots ou le riz, pour l'écossage des récoltes, ainsi que pour le pompage.

En Thaïlande, pour la circulation de l'eau, on utilise depuis de nombreuses années de simples éoliennes de construction locale, avec des tiges de bambou ou de bois pour soutenir les voiles. Plus récemment, on a introduit un type d'éolienne à hélice bipale en bois. Ici, l'eau est élevée au moyen d'une série de godets fixés sur une courroie sans fin appelée "water ladder" (élévateur d'eau). Les godets ramassent l'eau dans un puits peu profond et l'élèvent au sommet de la roue. Chaque godet, tour à tour, renverse en redescendant, son contenu dans un chenal en bois. L'eau est alors hissée vers le haut de cet "élévateur d'eau" vers un point plus élevé que le niveau du sol et coule vers les cultures par des rigoles creusées dans le sol. Cet élévateur consiste en une série de plateaux en bois montés sur une chaîne sans fin, entraînée mécaniquement par l'éolienne. Les plateaux s'emboîtent étroitement dans un chenal de bois incliné et peuvent ainsi "râcler" l'eau et l'entraîner vers l'extrêmité supérieure du chenal à un mètre de hauteur environ (Figure 19).

L'éolienne telle qu'on la connaît dans l'Ouest, dérive des moulins à eau dont le mécanisme est fondamentalement celui d'un moulin à eau renversé. Malheureusement, aucune étude ancienne ne subsiste, étant donné qu'en ce temps-là les pièces étaient construites grandeur nature, sur le sol de l'atelier,

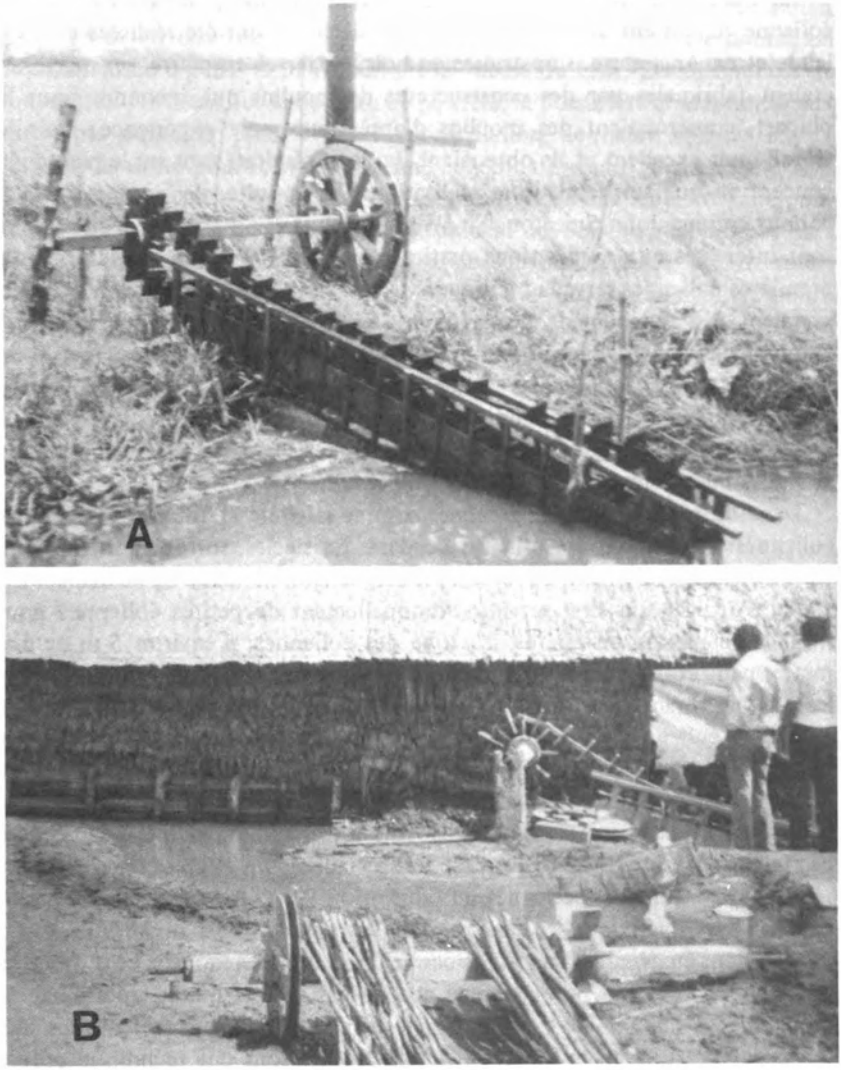


FIGURE 19 Elévateur d'eau entraîné par une éolienne—Thaïlande. [Avec l'autorisation de W. Heronemus]
a, Arbre et système d'entraînement d'un élévateur d'eau utilisé dans les salines près de Samut Songkhram. *b*, Elévateur d'eau thaï mû par une éolienne bipale.

Digitized by Google

d'après des gabarits, comme on le fait encore aujourd'hui. La puissance en HP sur l'arbre de ces éoliennes était de l'ordre de 55 (41 kW) pour une vitesse de vent de 28 km/h[4]. Il est intéressant de noter qu'avec la construction quadripale courante, le rapport entre la vitesse à la circonférence et la vitesse du vent était en général très faible.

En Europe, les machines les plus anciennes conçues pour utiliser la force éolienne remontent aux 12ème et 13ème siècles et ont été réalisées en Hollande et en Angleterre. Construites en bois, en fer et en pierre, ces machines étaient fabriquées par des constructeurs de moulins qui, inconnus pour la plupart, construisaient des moulins d'après leur seule expérience. Mais le travail était excellent et ils obtenaient de bons résultats tant sur le plan de la conception que sur celui de la réalisation. Par la suite, des ingénieurs bien connus comme John Smeaton, Sir William Cubitt et Sir Williams Fairbairn se sont intéressés aux applications pratiques des éoliennes. En Angleterre, ces premières éoliennes servaient à moudre le blé, alors que les moulins hollandais servaient à l'assèchement de certaines régions. Plus tard, en Angleterre, l'emploi des éoliennes pour le pompage de l'eau dans les Fens–Norfolk et Suffolk–s'est généralisé. Les agriculteurs russes ont utilisé des éoliennes similaires pendant des centaines d'années ; au cours des dernières années l'Union Soviétique a fait un gros effort pour mettre au point des éoliennes de grandes dimensions pour produire de l'électricité.

Dans de nombreuses îles grecques comme la Crète et Rhodes, de simples éoliennes à voiles ont été utilisées pendant des siècles, surtout pour le pompage de l'eau. (La Figure 20 représente une version moderne de ce dispositif.)

Au Portugal, on s'est servi traditionnellement de petites éoliennes pour irriguer de petites propriétés. La roue des éoliennes, d'environ 5 m de diamètre, peut être construite en métal et montée sur une tour très basse. Dans les régions rurales, on utilise le système à godets pour l'irrigation. Dans les villes, les éoliennes sont généralement installées sur le toit des maisons et servent à élever l'eau d'une citerne située au sol jusqu'aux citernes sur les toits, lorsque la pression est insuffisante dans le circuit de distribution locale et ne permet pas à cette eau de parvenir à la hauteur voulue. Les pompes destinées à cet emploi sont d'un modèle à diaphragme, simples et compactes.

Aux Etats-Unis, les éoliennes de fabrication locale formaient, au début du siècle, un spectacle familier, surtout dans les régions arides du Middle West[5]. Elles étaient en général construites par des gens dont les moyens économiques étaient limités et qui n'avaient que peu ou pas accès à l'infrastructure technologique et industrielle dont le développement était déjà très avancé aux Etats-Unis à ce moment-là. Etant donné qu'elles sont une technique propre aux régions rurales, réalisées avec des matériaux locaux et peu coûteux, et qu'elles dépendent de l'ingéniosité des agriculteurs du monde entier, il semble utile de consacrer quelques lignes à leur description ; ces techniques sont toujours valables.

Parmi les éoliennes construites par les agriculteurs pour leur propre utilisation, les plus répandues sont les suivantes :

Eolienne jumbo. L'éolienne jumbo est une sorte de roue à aubes actionnée par le vent de la même manière que la roue à aubes à demi-immergée est entraînée par l'eau (voir "Energie Hydraulique," p. 144). On peut en voir le fonctionnement et la construction sur la Figure 21. Son rendement variait entre 15 et 40 pour cent suivant le modèle et, pour un modèle donné, on obtenait jusqu'à 1 HP (750 W) suivant la vitesse du vent. Les différences de conception portaient sur le nombre de palettes, la possibilité d'adaptation aux bâtiments existants pour éviter la construction de l'abri (Figure 22) et l'emploi de voiles pour former l'éolienne hélicoïdale jumbo (Figure 23).

Eolienne manège. Ce modèle, qui est le résultat d'une tentative faite pour augmenter la dimension et partant le rendement des éoliennes en bois, est une sorte de manège à axe vertical. La formule consistait en une série de volets mobiles qui entouraient la roue et pouvaient être disposés de manière à abriter du vent les aubes lors de leur trajet "retour". Une fois les volets fermés, l'éolienne ressemblait à un cylindre clos. La Figure 24 représente une version

FIGURE 20 Eolienne à voilure. [Avec l'autorisation de Brace Research Institute. Eolienne et pylône concus par Windworks]

Digitized by Google

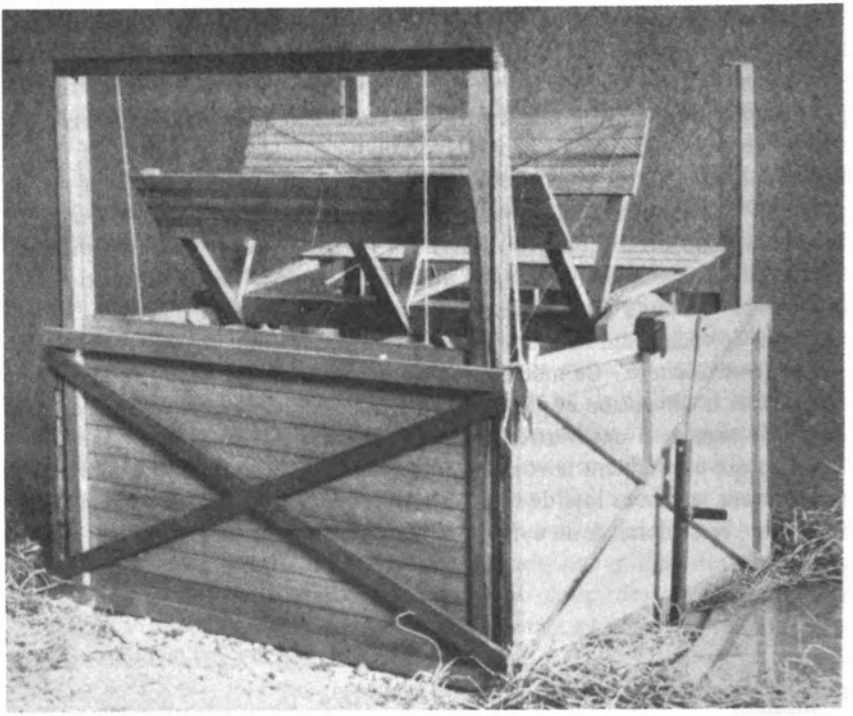


FIGURE 21 Modèle d'éolienne jumbo avec coupe-vent (ou volet d'arrêt). [Source: Barbour, Réf. 5]

munie d'un volet pouvant s'orienter automatiquement suivant les variations de la direction du vent sous l'influence du gouvernail mobile dont il est solidaire. Les plus gros modèles des éoliennes manèges étaient en général placés près du sol. Les modèles plus petits étaient montés sur de simples tours de bois (Figure 25).

Eolienne "hache d'armes". Cette éolienne, montée sur une tour de bois, consistait en un certain nombre de bras, 4, 6, 8 ou davantage, qui portaient chacun une aube en forme d'éventail. Ces bras étaient fixés sur un arbre horizontal. En regardant l'appareil de profil lors de son fonctionnement, celui-ci ressemblait à une série de haches d'armes en train de taillader à droite et à gauche, d'où le nom.

Ici encore la construction était simple et bon marché, comme le montre la Figure 26.

La Figure 27 représente une éolienne en "haches d'armes" entraînant une scie passe-partout. Elle est munie d'un frein à main pour le contrôle de la vitesse. Les éoliennes en "haches d'armes" sont des mécanismes robustes, pouvant fournir un travail utile avec un entretien minimum. Par exemple,

Digitized by Google

l'éolienne de la Figure 28 construite par un agriculteur du Nebraska, peut pomper 3520 l à l'heure dans un puits de 13 m de profondeur lorsqu'elle est propulsée par un vent de 21,7 km/h, ce qui correspond à un rendement de 0.17 HP (125 W) de travail utile.

Eolienne hollandaise. Comme son nom l'indique, il s'agit d'une version d'un moulin très répandu en Hollande, qui sous sa forme traditionnelle consiste en 4 bras entoilés et lattés, en forme d'éventail, fixés sur un axe horizontal. Il est monté sur une structure pivotante permettant à l'axe de s'orienter dans la direction du vent. Les modifications qu'y ont apportées les agriculteurs du Middle West américain consistaient à porter le nombre de bras à 6 ou 8, à remplacer la voilure par du bois et à monter l'éolienne sur les bâtiments de ferme existants.

Outre les modèles décrits, il existait plusieurs types de turbines de conception beaucoup plus raffinée, par exemple les pales à pas variables, nécessitant des matériaux qu'on devait acheter.

Alors que les éoliennes artisanales étaient assez courantes, on rencontrait partout l'éolienne de fabrication commerciale lorsqu'il s'agissait de pompage d'eau et de production d'électricité ; elle est devenue rapidement un spectacle familier dans toute l'Amérique rurale. Des milliers d'éoliennes de ce type sont

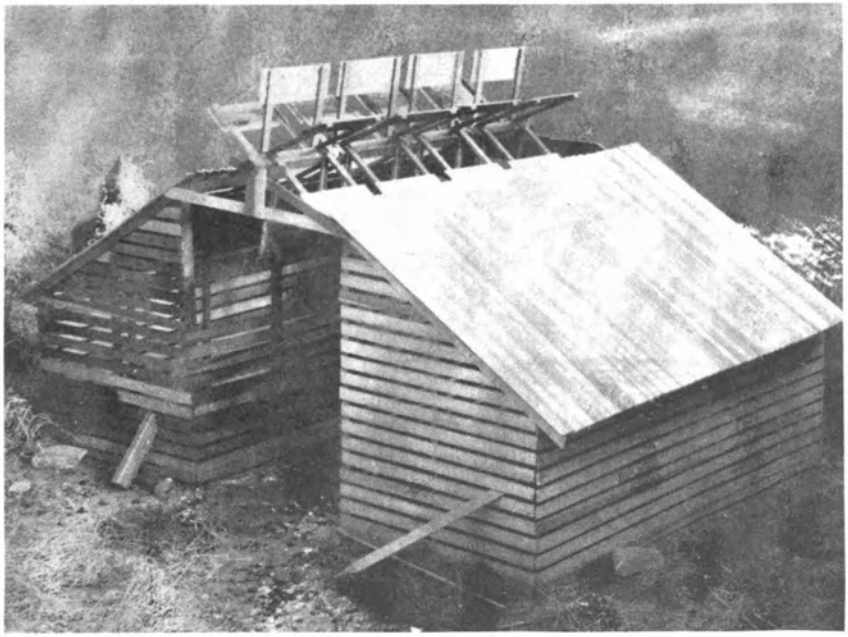


FIGURE 22 Série d'éoliennes jumbo montées au sommet d'un silo à maïs ou d'un abri. [Photo de maquette. Source : Barbour, Réf. 5]

Digitized by Google

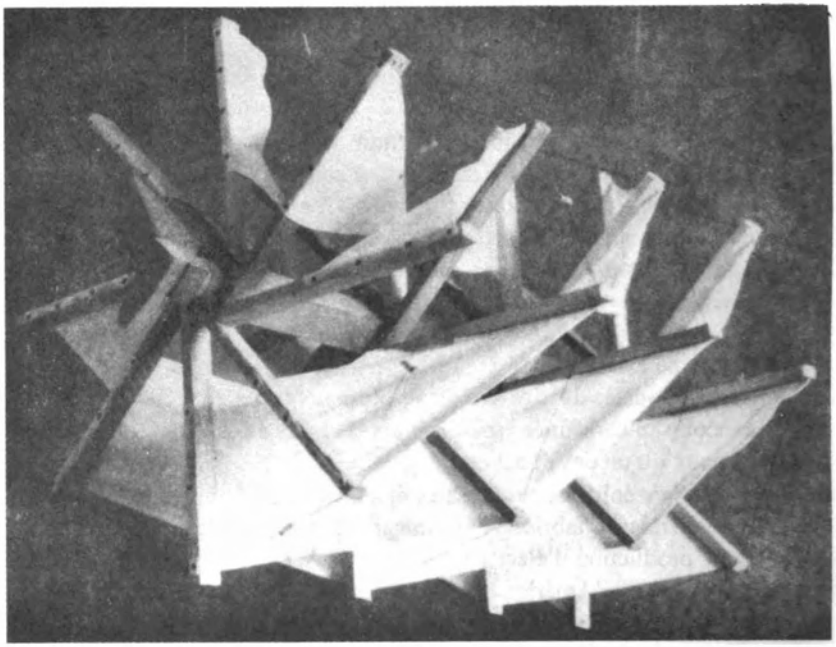


FIGURE 23 Modèle d'éolienne hélicoïdale jumbo avec toiles et bras haubannés avec du fil de fer torsadé. [Source : Barbour, Réf. 5]

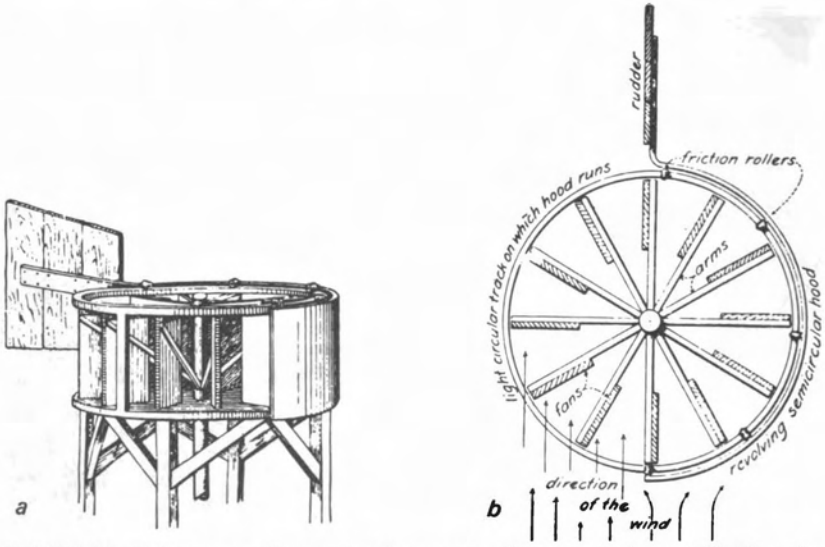


FIGURE 24 Eolienne modèle manège à capotage. [Source : Barbour, Réf. 5] *a*, Vue représentant le capot semi-circulaire monté sur des galets et actionné par un gouvernail de grande dimension. *b*, Coupe horizontale.

Digitized by Google

FIGURE 25 Petite éolienne du type manège, près de Lincoln, Nebraska. [Source : Barbour, Réf. 5]

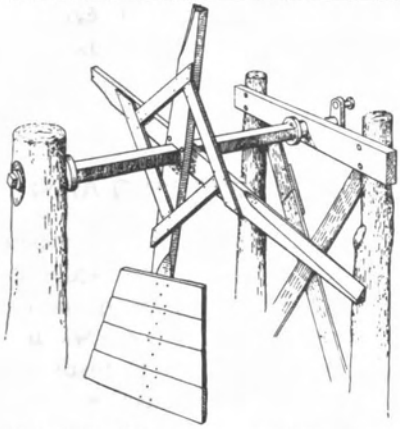


FIGURE 26 Pièces mobiles d'une éolienne du type "haches d'armes" à quatre pales dans la ferme de Matthew Wilson, Overton, Nebraska. [Source : Barbour, Réf. 5]

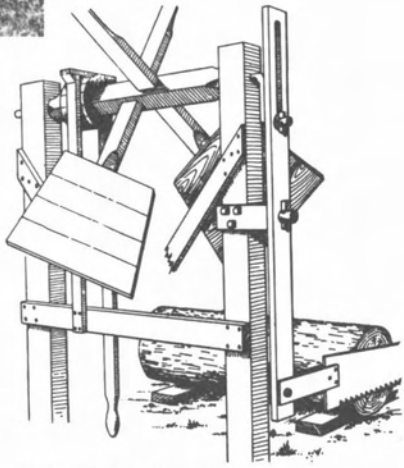


FIGURE 27 Eolienne du type "haches d'armes" actionnant une scie passe-partout, construite par A. G. Tingley, Verdon, Nebraska. [Source : Barbour, Réf. 5]

Digitized by Google

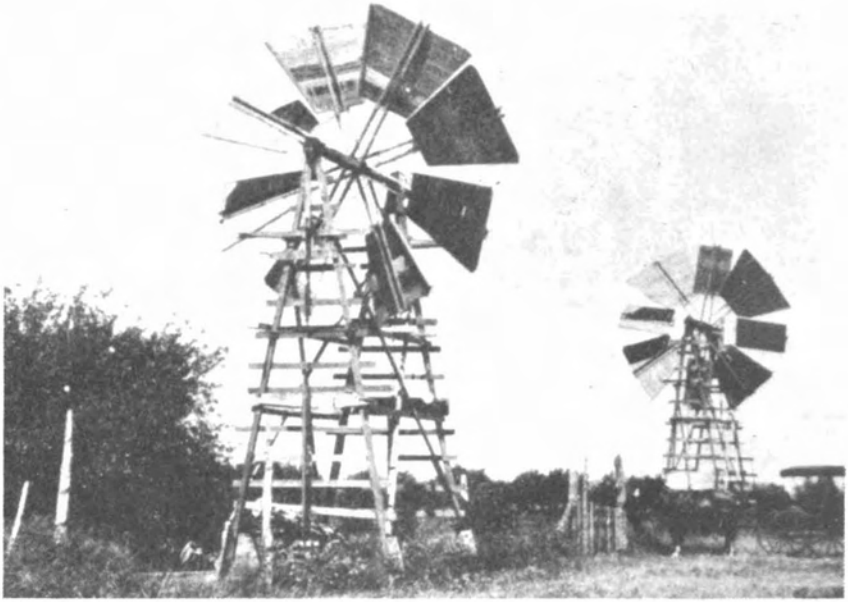


FIGURE 28 Pompes à éolienne dites à haches d'armes. [Source : Barbour, Réf. 5]

encore utilisées pour le pompage de l'eau dans les fermes, surtout pour abreuver le bétail. Les génératrices électriques actionnées par des éoliennes telles que celles de Jacobs Wind Electric Plant satisfaisaient de toute évidence les besoins des communautés rurales et connaissent un renouveau aux Etats-Unis.

TECHNIQUES ACTUELLES (DISPONIBLES D'ICI CINQ ANS)

Les eóliennes sont toujours parfaitement adaptées aux applications en milieu rural quand il s'agit d'obtenir une force motrice. Pour leur construction et leur installation, elles utilisaient des matériaux, de la main d'oeuvre et des sources d'énergie disponibles sur place. Au village, les fabricants qui les construisaient et les habitants qui les utilisaient contrôlaient tout le processus. Toutefois, lorsqu'on envisage d'employer l'éolienne pour la production d'électricité, la technologie nécessaire dépasse celle que l'on peut s'attendre à trouver dans toutes les zones rurales. Non seulement l'équipement doit pourvoir fournir, commander et distribuer l'électricité, mais les connaissances concernant l'adaptation des caractéristiques de fonctionnement de la génératrice

Digitized by Google

FIGURE 29 Eolienne type à roue "américaine". *a*, Eolienne Baker. [Avec l'autorisation de Heller-Aller Co.] *b*, Eolienne Dempster. [Avec l'autorisation de Dempster Industries, Inc.]

aux propriétés de l'éolienne demandent une certaine compétence technique. Bien qu'il soit possible de trouver une telle compétence dans de nombreuses localités, il peut être utile d'étudier les systèmes déjà disponibles. C'est pour cette raison que l'étude suivante porte sur certains modèles actuels commercialisés.

Technologie disponible aux Etats-Unis. Avant l'électrification rurale, il existait des douzaines de fabricants de pompes aéromotrices et de génératrices électriques aux Etats-Unis. Si nos renseignements sont exacts, deux seulement continuent de fabriquer des pompes aéromotrices et construisent tous deux des éoliennes de type roue en éventail "américaine" à ailettes multiples. Ces pompes sont surtout utilisées dans les pâturages de l'Ouest pour fournir l'eau au bétail. La Compagnie Heller-Aller* construit des systèmes utilisant des roues de 1 m 83 à 3 m 66 de diamètre, augmentant par fraction de 0 m 61. Dempster Industries fabrique des roues à ailettes (Figure 29) d'un diamètre de 1 m 83 à 2 m 44. Les deux systèmes comportant une pompe cylindrique alternative qui fournit plusieurs centaines de gallons par heure suivant la profondeur du puits, le diamètre du cylindre de la pompe et la vitesse du vent. Le prix des appareils Heller-Aller (aux Etats-Unis) est compris entre 400 et 1200 dollars (tour non comprise) ; les prix de la Cie Dempster basés sur des éoliennes de mêmes dimensions sont compris entre 460 et 2000 dollars.

*Les détails sur les éoliennes fabriquées actuellement figurent dans l'annexe 5.

Digitized by Google

Encore récemment, une seule compagnie aux Etats-Unis fabriquait des génératrices aéromotrices. Le "Wincharger" qui depuis plusieurs années est un des aspects familiers de la campagne (Figure 30) est encore fabriqué par Dyna Technology qui produit couramment un modèle de 12 volts destiné à la recharge de batteries. Le prix normal de ce système comprenant l'éolienne, la génératrice, le régulateur, les commandes, le frein à main et une tour de 3 m, est d'environ 450 dollars aux Etats-Unis, batterie non comprise. Ce système produit 200 W pour une vitesse de vent maximum de 30 km/h et représente un prix initial de $2.220/kW.

Récemment, pour faire face au problème de la pénurie de carburant, plusieurs compagnies américaines ont mis sur le marché des systèmes de génératrices aéromotrices. La plupart de ces compagnies vendent des machines fabriquées en Europe ou en Australie, alors que d'autres produisent des proto-

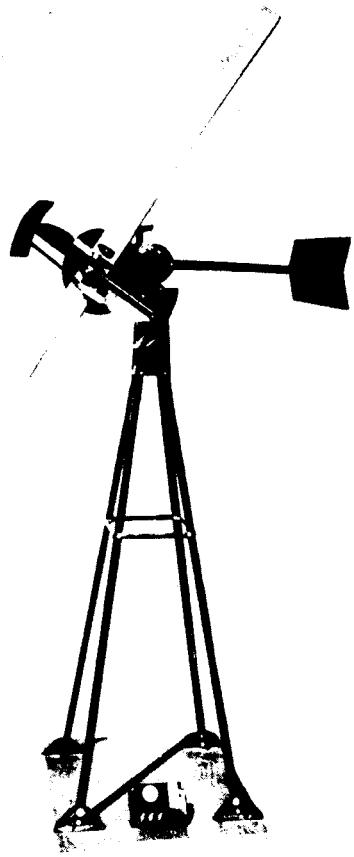


FIGURE 30 "Wincharger" [Avec l'autorisation de Dyna Technology, Inc.]

types, en quantités relativement réduites, basées sur les variations de conception des hélices, des génératrices ou des alternateurs, bien que dans la plupart des cas le prix de ces systèmes fasse douter qu'ils puissent être économiquement utilisés dans les villages des pays en voie de développement, sans compter les problèmes que posent les pièces de rechange, l'entretien et les réparations. Il est utile d'en dresser la liste, étant donné que l'augmentation de la demande pourrait réduire le prix de revient tout en permettant de simplifier la fabrication. Les informations qui ont pu être recueillies jusqu'à maintenant figurent à l'annexe 6.

Le projet d'appareil qui pourrait être mis en vente dans 5 ans est une innovation à la fois dans le cas de l'éolienne et dans celui du système électrique. De plus, le système est conçu pour permettre la construction de tous les éléments dans les pays en voie de développement. Une roue à ailettes multiples (Figure 31) a été conçue suivant le principe de la roue de bicyclette dans laquelle la jante et le moyeu sont maintenus en place par des rayons métalliques. Les ailettes profilées sont en tôle d'aluminium enroulée sur chaque paire de rayons voisins. Leur pas est déterminé par la position des rayons sur la jante. Ces appareils sont bien plus légers que les structures conventionnelles ; deux compagnies ont commencé à construire ce type de turbine aéromotrice pour faire partie du système générateur d'électricité. La Compagnie américaine American Wind Turbine Co.* fabriquera sous peu un moulin à entraînement périphérique au lieu d'une boîte à engrenage. Ce dispositif permet d'augmenter le rendement de 40 pour cent. Il peut fournir du courant alternatif ou du courant continu de fréquence constante arbitraire, indépendamment de la vitesse du vent ou de la vitesse de l'axe de la génératrice. On y parvient en modulant l'excitation du champ d'un petit alternateur à haute fréquence (c'est-à-dire grande vitesse) et en transformant le courant de sortie modulé en courant continu ou alternatif avec un simple circuit à semi-conducteurs. Le fonctionnement du système est analogue à la "détection" de la modulation d'amplitude de l'audio-fréquence conventionnelle. Dans le cas d'une porteuse radio-fréquence, la fréquence de l'onde porteuse varie suivant les variations de vitesse de l'axe de l'alternateur, mais aussi longtemps que la vitesse du vent se maintient au-dessus d'un certain minimum, le circuit de filtrage élimine les composants haute fréquence et fournit une puissance de sortie qui ne dépend que de la modulation de fréquence[6]. L'emploi d'un alternateur à haute vitesse présente l'avantage supplémentaire d'une grande puissance de sortie pour une taille donnée et s'avère plus apte au nouvel entraînement périphérique tel qu'il est conçu à l'heure actuelle. Le prix de ce genre d'appareil n'est past encore connu.

*Des détails sur les moulins à vent en cours de réalisation sont donnés dans l'annexe 6.

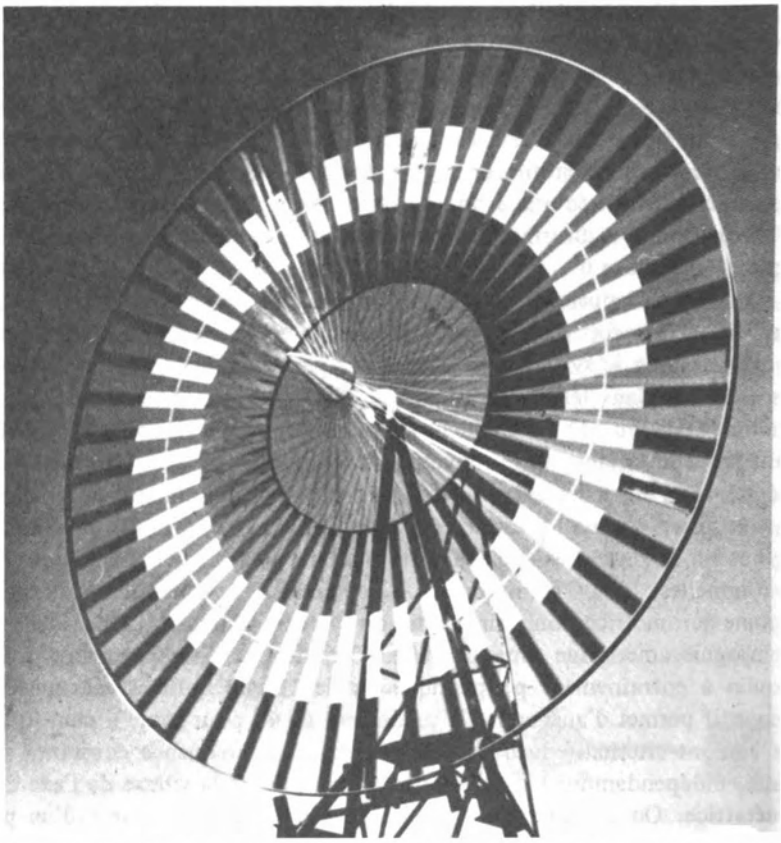


FIGURE 31 Turbine "en roue de bicyclette". [Avec l'autorisation de *Popular Science*, © 1974, Times-Mirror Magazines, Inc.]

La compagnie American Energy Alternative, Inc. fait un emploi plus conventionnel de ce genre de turbine dans un prototype de système à courant continu avec les modèles pouvant fournir 1.500 à 5.000 W. On s'attend à ce que le prix par kW (aux Etats-Unis) varie de 1.500 dollars environ pour le modèle de 1,5 kW à 600 dollars environ pour le système le plus grand (5 kW).

Un autre système encore à l'état de prototype, prévu pour être fabriqué par Independent Power Developers comporte une hélice tripale et fournit du courant continu de 24 à 240 volts d'une puissance nominale de 15-18 kW. Le prix estimé de l'ensemble complet, tour non comprise, est d'environ $8.500 ou entre $500 et $600 le kW.

La technologie en Europe. Les génératrices et les pompes aéromotrices couramment disponibles en Europe proviennent de nombreux fabricants. La firme française Aérowatt fabrique 5 modèles de génératrices (Figure 32) de

Digitized by Google

capacités allant de 24 W à 4,1 kW, pour une vitesse de vent de 26 km/h. Leur équipement, capable de fournir un rendement maximum pour des vitesses de vent raisonnables, est toutefois très onéreux, allant de 2000 dollars pour le plus petit à 20.000 dollars pour le plus grand modèle (prix aux Etats-Unis). La firme italienne Domenico Sperandio fabriquerait sept modèles de génératrices aéromotrices allant de 100 à 1000 W, mais on n'a aucun autre détail à l'heure actuelle. Elektro GmbH, en Suisse, fabrique des alternateurs aéromoteurs modèles mono et triphasé allant de 50 W à 5 kW (Figure 33). Les prix compris entre $1.020 et $3.840 (aux Etats-Units) pour le système de base les font paraître meilleur marché que les machines Aérowatt, mais représentent néanmoins un investissement qui dépasse les possibilités de la plupart des villages. Enfin, la firme de la République fédérale d'Allemagne Maschinenfabrik Ludwig Bening fabrique 3 modèles d'éoliennes à hélices, destinées à actionner des pompes alternatives. Les moulinets à 3, 4, et 5 pales peuvent être reliés à une variété de pompes pour fournir un débit oscillant entre 2600 l par jour pour une hauteur de 16 m avec un vent de 10 km/h et 14.500 l par jour d'une hauteur de 7 m avec un vent de 54,5 km/h (par période de 24 heures, ceci équivaut à une marge de rendement d'environ 5-12 W). Le prix est d'environ $2.530 pour l'ensemble complet y compris la pompe et la tour haubannée. Cette firme fabrique également une génératrice aéromotrice qui fournit 24 à 400 W, suivant la vitesse du vent, un courant continu de 24 volts

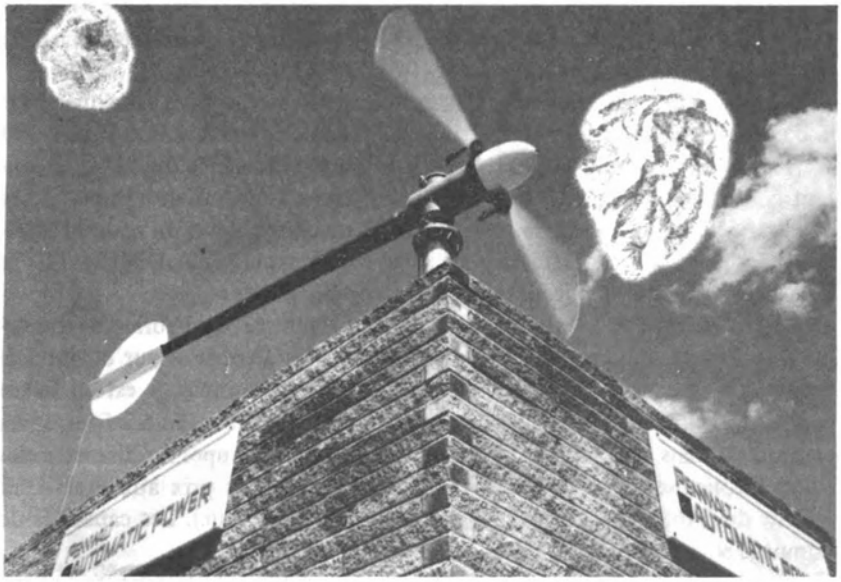


FIGURE 32 Génératrice "Aerowatt". [Avec l'autorisation de Pennwalt/Automatic Power]

Digitized by Google

FIGURE 33 Générateur Elektro. [Avec l'autorisation de la société Elektro GmbH]

et dont les prix varient de $200 à $3.330 (à la sortie d'Allemagne) suivant le modèle de la tour.

La technologie en Australie. Les génératrices aéromotrices fabriquées par la compagnie Dunlite Electrical Co. sont de deux modèles, 1.000 W et 2.000 W (Figure 34). Le plus petit modèle utilise une génératrice de 12 volts courant continu, la plus grande une génératrice courant continu de 115 volts. Les deux modèles comportent un inverseur permettant d'obtenir un courant alternatif de 115 volts (60 Hz). Les prix en sont respectivement de $1.729 et $2.805 (aux Etats-Unis), tour et batteries non comprises.

La technologie en Amérique Latine. En Argentine, la Fabrica de Implementos Agricolas fabrique des pompes alternatives à éolienne sur un modèle fabriqué autrefois aux Etats-Unis (Figure 35). Cette compagnie est en fait le concessionnaire de la firme américaine Aermotor qui continue à fournir les ensembles, mais ne fabrique plus ni l'éolienne ni la pompe. Le diamètre des roues d'éolienne varient entre 1 m 83 et 4 m 88. Les prix aux Etats-Unis varient de $465 à $4.235 (non compris le prix de la tour). Les capacités de pompage sont identiques à celles des éoliennes Dempster.

La technologie en Afrique du Sud. P. Andrag & Sons, Ltd., sont les concessionnaires Sud-Africains de Aermotor. Ils fabriquent les éoliennes Aermotor

Digitized by Google

de 2,5 m et 3 m qui entraînent des pompes à eau. Ces appareils sont vendus en Afrique du Sud à $620 et $950 respectivement : éolienne, boîte d'engrenage et tour à 4 montants inclus.

Faibilité et Prix de Revient

La technologie ne répond que partiellement à la question posée, à savoir : quelle est la fiabilité de la puissance fournie par le vent, et quel est le prix de revient de cette énergie? Tout d'abord, il n'est pas possible d'exploiter avec une éolienne tout le potentiel d'une zone de vent donnée. La puissance dans une zone d'air en mouvement est proportionnelle au produit de la surface perpendiculaire de ce courant d'air et du cube de sa vitesse. On peut en déduire que la fraction maximum de cette puissance fournie par une éolienne atteint 59.3 pour cent. Du point de vue pratique, les aéromoteurs à axe horizontal fournissent moins de 70 pour cent de ce maximum théorique, c'est-à-dire qu'elles parviennent à employer moins de 42 pour cent de la puissance du vent et les machines à axes verticaux sont encore moins efficaces.

En second lieu, bien que le vent soit une source d'énergie gratuite et inépuisable, il ne souffle que par intermittence et, lorsqu'il souffle, sa vitesse peut être trop faible pour permettre à l'éolienne de fournir de la puissance, ou trop élevée pour que la mécanique conçue pour des vents moyens puisse lui résister. Dans une revue préparée pour l'Organisation pour l'alimentation et

FIGURE 34 Générateur Dunlite. [Avec l'autorisation de Dunlite Electrical Co. Pty. Ltd.]

Digitized by Google

FIGURE 35 Pompe à éolienne Aermotor. [Avec l'autorisation de Aermotor/Braden Industries, Inc.]

l'agriculture (FAO), Golding décrit le problème de la façon suivante : "à chaque point donné de la surface de la terre, le vent à un certain moment peut atteindre une vitesse comprise entre 0 et 125 miles à l'heure, soit 56 m/seconde ou davantage. Même les endroits les plus venteux sont parfois soumis à des orages accompagnés de vents très violents. D'une part, on ne peut donc compter, d'une façon absolue, sur l'énergie que procure le vent à un certain moment, quelle que puisse être la force du vent en un lieu donné, et, d'autre part, on ne peut réduire en deça d'un certain point la résistance mécanique d'une éolienne destinée à une région relativement calme. Néanmoins, on a plus de chances d'obtenir la puissance à un moment donné à l'endroit très venteux qu'on en a d'avoir une machine, érigée en ce lieu, qui doive supporter assez fréquemment des efforts mécaniques considérables"[7].

Digitized by Google

Enfin, le prix d'une éolienne, qu'elle entraîne une pompe, une génératrice ou une meule ou bien qu'elle soit utilisée à d'autres fins, peut être évalué d'après le prix de revient des composants ou—en général de façon plus réaliste—d'après la quantité d'énergie utile fournie. Cette évaluation dépend fortement de la vitesse moyenne du vent en cours d'année et naturellement de la vitesse minimum du vent à laquelle l'appareil commence à produire de l'énergie utile. En général, la vitesse minimum est d'environ 6 mph ou 2,4-3 m/sec. Les fabricants ont l'habitude de donner les rendements en fonction de vitesses de vent "théoriques" qui se situent généralement aux environs de 6,5-7 m/sec, quoique certaines génératrices de grande dimension soient conçues pour de plus grandes vitesses. La quantité d'énergie utile produite dépend aussi de l'habileté de l'utilisateur lorsqu'il s'agit d'exploiter l'énergie au moment même où elle est produite. Dans presque toutes les parties du monde le vent souffle à des époques irrégulières et si on ne peut ni utiliser l'énergie au moment où le vent la produit ni la stocker jusqu'au moment où on veut l'utiliser-comme c'est le cas pour l'énergie électrique dans des batteries ou pour l'eau pompée dans une citerne surélevée par exemple—l'utilité d'un système aéromoteur, même bien conçu, risque d'être très faible. Il est donc essentiel d'obtenir des informations sur la vitesse moyenne des vents régnants dans le lieu choisi, y compris des renseignements concernant la durée de la saison pendant laquelle le vent souffle à une vitesse supérieure à un minimum donné. Les courbes calculées à partir des données vitesse/durée servent à calculer le potentiel d'énergie réel que contient le vent en un lieu donné et au besoin le rendement annuel d'énergie. Il n'est possible d'obtenir de tels renseignements sur les vents que sur place, mais, plus souvent qu'on ne pense, on peut en obtenir suffisamment par l'intermédiaire du service national météorologique ou de l'Organisation Météorologique Mondiale, afin de déterminer la fiabilité du vent. On peut obtenir le détail des calculs à partir de références standard comme celles de Golding (Références 4 et 7).

Du point de vue mécanique, les éoliennes qui font l'objet de ce chapitre, sont de loin beaucoup plus fiables que les moteurs consommant des carburants fossiles. Outre qu'elles ne dépendent pas d'un carburant, elles ne nécessitent qu'un minimum d'entretien (généralement un graissage et une vérification annuels suffisent) et rarement des réparations. Certains modèles autorégulateurs ne nécessitent aucune surveillance même en cas de vents extrêmement violents.

Le prix d'un groupe aéromoteur dépend essentiellement du modèle et de la hauteur de la tour sur lequel il est monté. La majeure partie de la dépense est constituée par la tour, qui dépend à son tour du modèle et du matériau rentrant dans sa fabrication. Etant donné que les qualités de la tour sont fonction des circonstances locales, tant pour la conception que pour le matériau, il est impossible d'en déterminer le prix dans le cadre de ce chapitre ; celui-ci

doit être determiné pour chaque situation, suivant les spécifications données par le fabricant des diverses éoliennes.

REALISATION LOCALE

L'emploi de la technologie locale pour la conception, la construction et l'installation des éoliennes dépend des connaissances, de la spécialisation du personnel et du matériau disponible localement. Mis à part les machines de fabrication locale les plus simples et de moindre efficacité traitées précédemment, les améliorations locales pour l'installation des modèles commerciaux ainsi que d'autres facteurs pourraient contribuer à la réduction du prix des systèmes aéromoteurs.

On peut trouver en divers endroits des Etats-Unis et du Canada des informations techniques détaillées concernant plusieurs éoliennes de fabrication domestique. Certains de ces plans étaient destinés spécialement à la fabrication locale dans les pays en voie de développement. D'autres, sans avoir été conçus à des fins spéciales, peuvent s'adapter dans certains cas à de telles situations.

On peut obtenir les renseignements en ce qui concerne la première catégorie auprès des deux organisations suivantes : Volunteers in Technical Assistance (VITA) aux Etats-Unis ; et l'Institut de recherches Brace, au Canada*. VITA fournit les plans de plusieurs types d'éoliennes, par exemple, une éolienne construite avec des pièces d'automobiles de récupération y compris un pont arrière, un régulateur de tension et une génératrice ou alternateur. Le moulinet lui-même est contitué par une roue en éventail modifiée. Les pales se mettent automatiquement en drapeau si la vitesse du vent augmente, et il est prévu pour être fabriqué localement. Plusieurs options sont prévues et l'appareil complet fournit de 500 W à 3 kW ; le prix des matériaux varie suivant la valeur et la disponibilité des pièces de récupération de voiture sur le marché local. La main d'oeuvre, le montage et la mise en place peuvent être assurés sur place.

L'Institut de recherches Brace dispose d'un certain nombre de documents traitant de la construction des éoliennes dans les pays en voie de développement. Des documents donnent les détails nécessaires à la construction d'un système de 10 HP (7,5 kW), basé sur l'emploi d'un moulinet tripale de 9 m 80 de diamètre monté sur un pont arrière de camion. L'ensemble complet, y compris la tour, est destiné à être construit localement en utilisant le plus possible des moyens locaux. Brace fournit également le mode de construction

*VITA, 3706 Rhode Island Avenue, Mt. Rainier, Maryland, 20822 USA; Brace Research Institute, Macdonald College, McGill University, Ste. Anne de Bellevue, Quebec, Canada.

d'un moulin entoilé de 7,6 m de diamètre, d'une tour de 12,8 m en bois et les plans du rotor aéromoteur Savonius, système monté verticalement, à section en S, conçue à l'origine dans les années 1920 par l'ingénieur finlandais S. J. Savonius. Le rotor Savonius a eu beaucoup de succès chez les constructeurs locaux, car il peut être construit à partir de fûts de pétrole coupés dans le sens de la longueur* (Figure 36).

Plusieurs sources donnent les renseignements sur la deuxième catégorie d'appareils, c'est-à-dire ceux qui sont conçus pour être construits aux Etats-Unis, surtout à la suite de l'inquiétude croissante concernant la raréfaction des carburants fossiles. Il existe actuellement des plans détaillés concernant certains de ces modèles**. Le groupe de travail n'a pas encore étudié les plans pour déterminer s'ils sont réalisables avec les matériaux facilement disponibles dans les pays en voie de développement ; ils ne sont mentionnés que pour que le technicien interessé puisse s'en inspirer.

Il faut souligner que le matériau et les connaissances nécessaires à la construction de la tour existent dans la plupart des communautés rurales. Dans les régions rurales des Etat-Unis, par exemple, on suppose depuis longtemps que même si un agriculteur achète une éolienne, il construit en général la tour lui-même. Les catalogues des fabricants contiennent souvent les plans détaillés de construction de la tour (certains exemples figurent à l'annexe 7). Il ne faut toutefois pas oublier que la production des machines aéromotrices nécessite l'achat de nombreuses pièces : le matériel de commande, les alternateurs, les génératrices et un certain nombre de pièces comme les roulements et les balais, qui ne sont pas fabriqués dans le pays en voie de développement mais sont nécessaires à l'achèvement de l'appareil.

RECHERCHES ET REALISATIONS

Avec le regain d'interêt que suscite cette technologie ancienne, les idées non encore exploitées, telles que le rotor à axe vertical Darrieus† (Figure 37), reprennent de l'actualité. De plus, de nombreuses idées nouvelles se font jour,

*Un emploi intéressant du rotor Savonius réside en une pompe centrifuge conçue par le Professeur John D. Isaacs (Institution d'océonographie Scripps) qui utilise une tuyauterie verticale rotative, à bras horizontal en guise de pompe.

**Par exemple : 1) les plans d'un moulinet "sous le vent" tripale de 4 m ou 5 m 50 couplé à un alternateur d'automobile peuvent être obtenus chez Helion, Box 4301, Sylmar California 91342 USA ; 2) Les plans pour un moulinet tripale à pas variable couplé à une génératrice d'automobile, à une batterie et un inverseur de courant peuvent être obtenus chez Sencenbaugh Wind Electric, P.O. Box 11174, Palo Alto, California 94306, USA.

†Inventé par J.G.J.M. Darrieus et bréveté pour la première fois en 1927, le rotor caténaire a été par la suite bréveté aux Etats-Unis, en 1931. (US 1.935.018, 8 déc.).

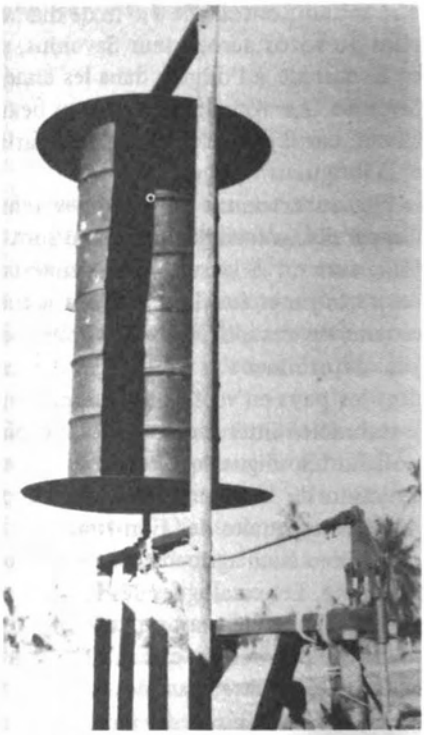


FIGURE 36 Eolienne à rotor Savonius, Sri Lanka. [Avec l'autorisation de Brace Research Institute]

de même que certains prototypes d'appareils qui représentent autant d'efforts qui contribuent à la réalisation de ces projets[8].

Bien qu'une nouvelle organisation ait récemment été formée* pour coordonner certaines de ces activités, elle constitue surtout une organisation commerciale qui s'occupe de la fabrication aux Etats-Unis. Etant donné l'importance que pourraient revêtir ces techniques pour les zones rurales des pays en voie de développement, il faudrait constituer une organisation de recherches et de réalisations avec de multiples appuis et un personnel international travaillant de concert avec les instituts régionaux. Cette organisation se tiendrait au courant des théories et des études nouvelles, de l'essai de nouveaux prototypes mis au point partout dans le monde et laissant entrevoir des applications possibles dans les pays en voie de développement. Le personnel d'une telle organisation, secondé par des consultants qualifiés, doit pouvoir fournir un programme coordonné et rationnel d'exploitation de l'énergie du vent, basé non seulement sur l'évaluation de nouveaux projets dans l'ensemble du

*American Wind Energy Association, 21243 Grand River, Detroit, Michigan 48219, USA.

Digitized by Google

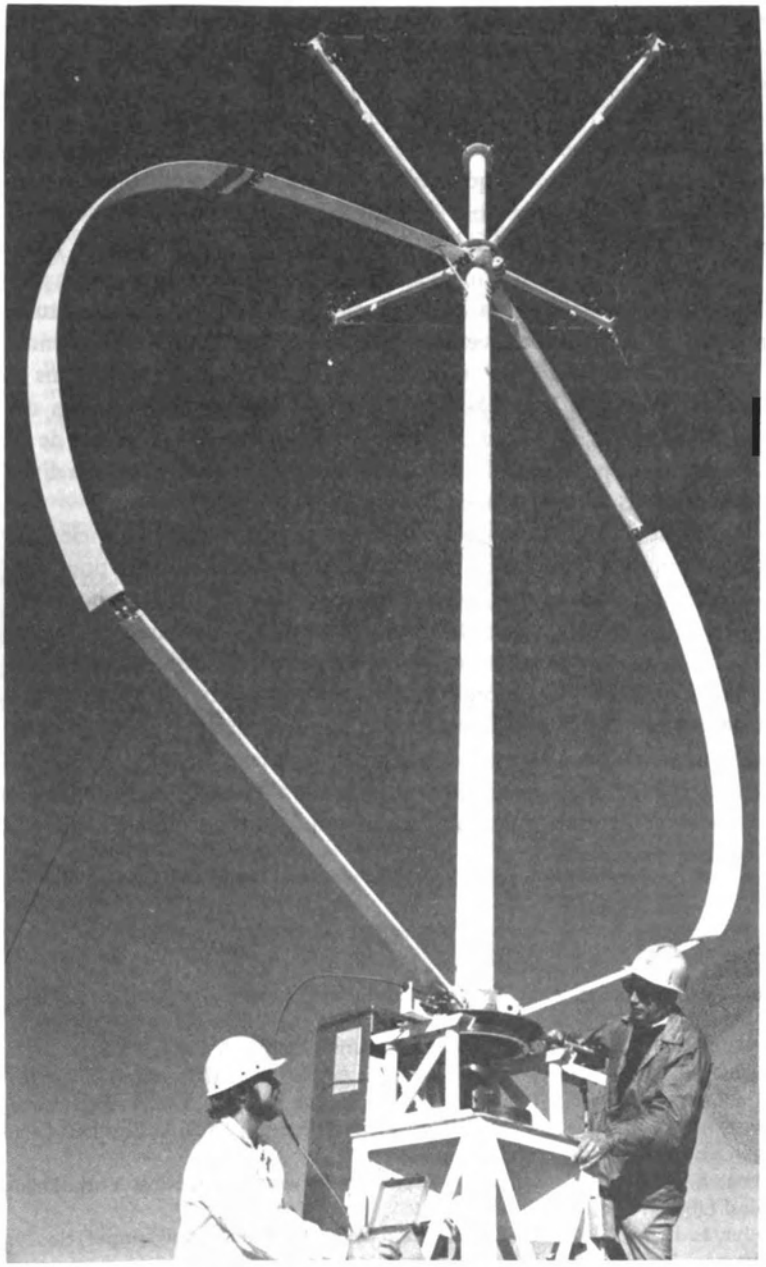


FIGURE 37 Turbine à vent à axe vertical (Rotor Darrieus). [Avec l'autorisation de Sandia Laboratories/ERDA]

Digitized by Google

domaine concernant les sources d'énergie de remplacement, mais aussi sur leurs propres recherches et réalisations. (Pour le moment, la plupart des études sont peu ou mal coordonnées.)

On a récemment fourni à l'Agence pour le développement international (A.I.D.) une étude sur l'énergie du vent en Thaïlande, qui constitue un excellent exemple du genre de travail qu'une telle organisation internationale pourrait réaliser pour les pays en voie de développement[9]. Un compte rendu détaillant deux projets d'éoliennes pouvant satisfaire les besoins de l'agriculteur thaï et faisant ressortir l'augmentation sensible de la production agricole (à la suite de l'amélioration de l'irrigation) est le résultat d'une étude, faite sur place, par un expert en technologie du vent. Les systèmes d'éoliennes proposés, 6 et 12 m de diamètre, sont conçus pour s'adapter aux moyens de fabrication existants. Ils sont également essentiellement indépendants des importations étrangères en ce qui concerne les matériaux ou les pièces de rechange, y compris la pompe, et le prix de revient se trouve à la portée d'une famille agricole typique en Thaïlande.

En maintenant et en encourageant le développement de l'art ancien des éoliennes, on pourrait faire naître quelques idées révolutionnaires pour couvrir les besoins en énergie des zones rurales. Parallèlement aux nouveaux projets en matière de rotors, des tours de conception économique doivent faire partie d'un projet global du système aéromoteur; sinon, pour un prix donné, l'amélioration de la conception des rotors semblerait inutile. Le premier pas necessaire semble être la création d'une organisation centrale dotée d'un personnel compétent orienté vers le développement, travaillant en collaboration avec des organismes régionaux de recherches et de réalisations, et investi du pouvoir de mettre au point un matériel nouveau bien adapté aux besoins locaux.

REFERENCES

1. Fuller, R. Buckminster. 1974. Energy through wind power. *The New York Times* January 17.
2. Lanoy, H. 1944. *Les aéromoteurs modernes.* Paris: Girardot & Cie.
3. Needham, J. 1965. "Power-sources and their employment (III), wind force; the windmill in east and west." In *Science and Civilization in China.* Vol. 4: *Physics and physical technology, part II: Mechanical Engineering*, pp. 55-568. London: Cambridge University.
4. Golding, E. W. 1956. *Generation of electricity by windpower.* New York: Philosophical Library.
5. Barbour, E. H. 1899. *Wells and windmills in Nebraska.* Water-supply paper, No. 29, Washington, D.C.: U.S. Geological Survey.

   Excellente étude de la technologie des éoliennes américaines au début du siècle–malheureusement épuisée. La plus grande partie de la documentation sur les éoliennes des fermes aux Etats-Unis est tirée de cette source. Voir aussi Davidson, J.

B., and Chase, L. W. 1908. *Farm machinery and farm motors*. New York: Orange Judd Co.

6. Allison, H. J.; Ramakumar, R.; and Hughes, W. L. 1972. A field modulated frequency down conversion power system. Rapport presenté à la réunion de 1972, IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers). *Transaction on Industry Applications* IA9(2):220-226.
7. Golding, E. W. n.d. *Windmills for water lifting and the generation of electricity on the farm*. Agricultural Engineering Branch, Land and Water Development Division, Informal Working Bulletin, No. 17. Rome: Food and Agriculture Organization.
8. Un des aspects les plus intéressants en cours de développement est le projet d'un générateur de tourbillons. Dans ce projet, on interpose une surface triangulaire entre le montant et le vent, avec un angle d'attaque de 10 à 15°. Dans les tourbillons de "vent d'aval" ainsi créés, la vitesse totale du vent peut être augmentée par le coefficient 2. On peut profiter de cet effet de trois manières : a/ pour augmenter le rendement d'une éolienne donnée pour une vitesse donnée (la puissance varie suivant le cube de la vitesse du vent); b/ on peut réduire la dimension du rotor en fonction de la puissance qu'on en exige pour une vitesse de vent donnée, ou c/ pour utiliser le vent à des vitesses inférieures à celles qui seraient normalement nécessaires aux génératrices aéromotrices pour commencer à fournir de l'énergie. Augmentateur de tourbillons pour la conversion de l'énergie fournie par le vent. Sforza, Pasquale M. 1975. Vortex augmentor concepts for wind energy conversion. In *Proceedings of the Second Workshop on Wind Energy Conversion Systems, 9-11 June 1975, Washington, D.C.*, Frank R. Eldridge, ed., pp. 433-442, U.S. National Science Foundation, RANN-Research Applied to National Needs, Document No. NSF-RA-N-75-050, McLean, Virginia: The Mitre Corporation.
9. Heronemeus, W. E. 1974. *A survey of the possible uses of windpower in Thailand and the Philippines*. Prepared for the U.S. Agency for International Development, Office of Science and Technology. Amherst, Massachusetts: University of Massachusetts, Department of Civil Engineering.
10. Merriam, Marshall F. 1972. Windmills for less developed countries. *Technos* (April-June) 9-23.

    Egalement disponible : *Is there a place for the windmill in the less developed countries?* Technology and Development Institute Working Paper Series, No. 20. Honolulu: East-West Center.

    Ce rapport contient une bonne discussion sur les éoliennes et une analyse économique utile.

L'énergie hydraulique

Bien que l'on puisse utiliser l'énergie hydraulique directement comme force motrice, ou indirectement par l'hydro-électricité, le débat dans ce chapitre porte sur les applications hydro-électriques et en fait ressortir l'importance universelle. Les applications mécaniques directes sont incluses dans le rapport avec les sujets auxquels elles se rapportent, et sont traitées séparément.

La puissance hydraulique provient d'un potentiel d'énergie accumulé sous la forme d'une réserve d'eau placée à une certaine hauteur (en charge). Cette énergie est convertie en énergie mécanique à l'intérieur d'une turbine qui, à son tour, la transforme en énergie électrique au moyen d'une génératrice électrique rotative.

La puissance théorique que peut fournir une réserve d'eau en charge est égale au poids de l'eau qui s'écoule en un temps donné multiplié par sa hauteur de chute (hauteur de charge). On considère cette puissance soit en chevaux-vapeur, soit en kilowatts suivant les constantes mathématiques employées.

La puissance réelle obtenue est naturellement inférieure à la puissance théorique. On la calcule en multipliant la puissance théorique par divers facteurs représentant l'efficacité de chaque élément du système hydro-électrique. Ces éléments comprennent :

- Le système amenant l'eau à la turbine (canal, conduites d'amenée d'eau, raccords et vannes) ;
- La turbine et ses tuyauteries de fuite (tube d'aspiration) ;
- La génératrice électrique ; et

- Tout moyen indirect de couplage entre la turbine et la génératrice (engrenage ou courroie).

La résistance totale de ces éléments interposés réduit la puissance théorique d'un facteur de 0,6 à 0,8.

Ces procédés de transformation d'énergie et les moyens de les réaliser représentent une technologie éprouvée dont les paradigmes sont bien établis et dans lesquels aucune modification inattendue n'est survenue depuis plus de 50 ans.

Au début de ce siècle, il existait plusieurs centaines de constructeurs de petites turbines hydrauliques aux Etats-Unis. Aujourd'hui il n'en reste qu'un qui offre une ligne complète de petites turbines de série. On attribue cette situation au fait que l'énergie hydraulique à petite échelle a été supplantée par 1) le moteur à combustion interne, 2) le moteur à vapeur, et 3) le prolongement de lignes électriques partant des grandes centrales vers les régions rurales.

Dans plusieurs pays européens et en Chine, toutefois, la fabrication d'unités de basse chute d'eau et de faible puissance semble être très active, bien que limitée. L'ouvrage *Water Power Development* de Mosonyi (1960), en particulier, consacre un chapitre aux centrales miniatures produisant moins de 100 kW[1].

SYSTEMES D'ENTRAINEMENT HYDRAULIQUES FONDAMENTAUX

Suivant l'ordre historique et leurs séquences de développement, les systèmes fondamentaux d'entraînement hydrauliques sont :

- les roues à augets en-dessus ; à augets en-dessous et les roues de côté ;
- les roues à cuve ; et
- les turbines.

En général, les *roues à aubes* tournent dans un plan vertical et se distinguent des turbines, en ce que la pression de l'eau ne varie pas lorsqu'elle passe dans les vannes de la roue à augets en-dessous, ni dans les augets de la roue à augets en-dessus, ou celles des roues de côté.

La roue à augets en-dessus (Figure 38) porte des augets à sa périphérie, qui se remplissent d'eau en haut de leur mouvement de rotation et qui se vident en arrivant en bas. Bien qu'avec ces roues on puisse obtenir un rendement de 80 pour cent, avec la vitesse réduite et le peu d'énergie fournie par rapport à leur dimension, elles ne pouvaient fonctionner si le niveau d'aval montait. C'est pourquoi, en même temps que les roues de côté et roues à augets en-dessous peu efficaces, elles sont tombées en désuétude. Une roue à augets en-dessus fonctionnerait encore en Nouvelle-Angleterre. Elle y sert à moudre

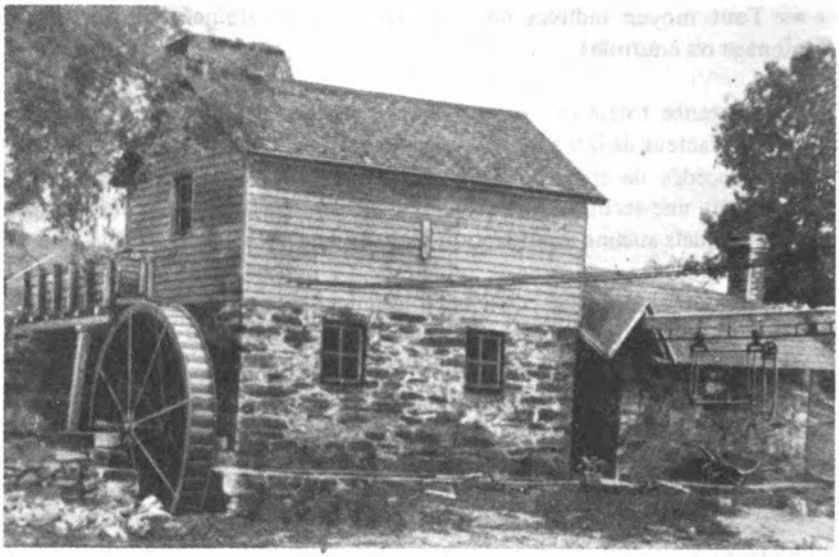


FIGURE 38 Roue à augets en dessus. [D'après : "Water Power on the Farm," Bulletin No. 60, Fitz Water Wheel Co., Hanover, Pennsylvania, 1923]

le grain, fabriquer du cidre et produire de l'électricité. Elle a été fabriquée par la compagnie Fitz Water Wheel de Hanover, Pennsylvania, aujourd'hui disparue. Elle mesure 3,96 m de diamètre et 1 m 83 de large et développerait 30 HP(22,4kW) à 8 tours minute.

La roue de côté (ou roue hydraulique de poitrine) emploie des godets comme la roue à augets en-dessus, sauf qu'elle reçoit l'eau à hauteur du rayon. Son rendement est voisin de 60 pour cent.

La roue à augets en-dessous (Figure 39) est souvent appelée "roue dans le courant" (current wheel), car elle reçoit son impulsion sous l'effet du courant de l'eau qui frappe les aubes droites ou incurvées. Son rendement maximum atteint 20 pour cent, mais cette valeur exige que les roues comportent des flasques latéraux pour réduire l'effet des tourbillons, ou que la roue reçoive l'eau dans un caniveau à peine plus large que la roue elle-même (une amélioration romaine datant du 3ème siècle après J.-C.).

La roue à cuve, une variante de la roue à augets en-dessous, fonctionne dans un plan horizontal. Un chenal ouvert ou couvert y amène l'eau d'une hauteur d'environ 3 m pour qu'elle frappe perpendiculairement les aubes plates calées à un certain angle. Son emploi était très repandu dans les régions montagneuses de l'Europe (Scandinavie, Alpes, Balkans) pour la mouture du grain. Dans les Îles Shetland, la roue à cuve servait couramment pour les moulins à grains. Elles étaient souvent construites tout en bois ; leur rendement atteignait 20 pour cent.

Digitized by Google

Une roue à cuve a fonctionné à Cilleyville, New Hampshire, de 1910 à 1960 et servait à moudre le grain pour l'alimentation des volailles. Sa roue de 2 m 14 de diamètre, tournait sur un axe d'acier de 12 cm 7 et recevait l'eau d'une chute de 1 m 83 par un caniveau couvert de section carrée, cerclé de fer, de 0 m 61. La Compagnie Ganz de Budapest fabrique une version moderne de la roue à cuve[1].

La turbine à eau diffère de la roue à aubes en ce que le courant d'eau est forcé à travers les passages constitués par les ailettes ou augets de la turbine. Les ailettes sont conçues de façon à ce que l'eau pénètre uniformément et s'échappe avec une vitesse et une force minimes, après avoir transmis la plus grande partie de son énergie cinétique au rotor.

Il existe trois types courants de turbines classées suivant le nom du fabriquant et des promoteurs. Ce sont, suivant l'ordre chronologique de leur apparition :

1. Francis (réaction, admission totale)
2. Pelton (impulsion, admission partielle)
3. Hélice (réaction, admission totale)
   a. Nagler (ailettes fixes)
   b. Kaplan (ailettes à pas variable)

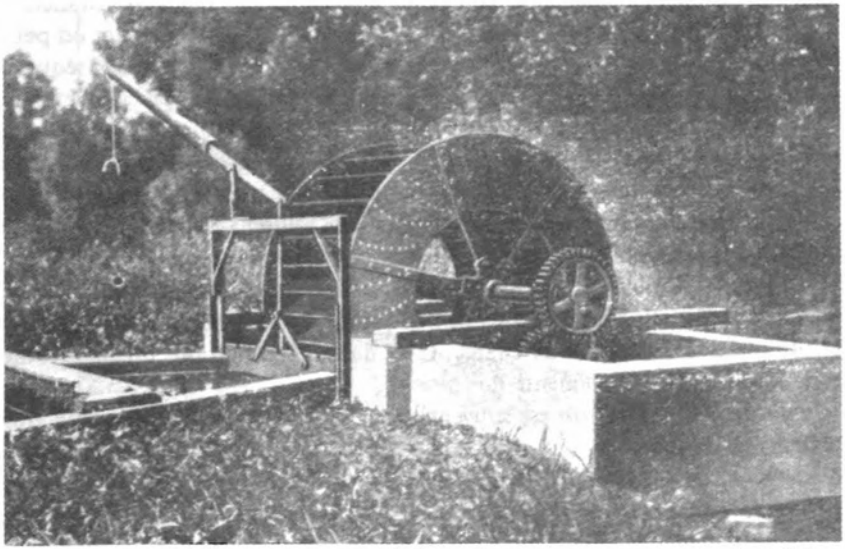


FIGURE 39 Roue à aubes (en dessous). [D'après : "Water Power on the Farm," Bulletin No. 60, Fitz Water Wheel Co., Hanover, Pennsylvania, 1923]

Digitized by Google

Chaque classe nécessite une certaine hauteur de chute et de vitesse et chacune comporte une forme unique de rotor ou roue mobile de turbine hydraulique.

Les turbines Francis Nagler et Kaplan descendent essentiellement de la simple turbine à réaction de Hero, Alexandria, datant d'environ 100 A.C. Leur création est l'aboutissement des efforts fournis par les inventeurs pour obtenir plus de puissance à partir d'un espace donné.

On peut considérer la turbine Pelton comme le descendant direct de la roue à augets en-dessous ou de la roue à cuve (Figure 40).

Le rotor de *la turbine Francis* reçoit l'eau sur toute sa circonférence (Figure 41) et, pour cette raison, elle est appelée turbine à admission totale. On l'appelle aussi parfois turbine à pression pour souligner le fait qu'il se produit un changement de pression pendant le passage de l'eau dans le rotor de la turbine ; le potentiel énergie/pression est converti en énergie cinétique (c'est-à-dire mécanique) lors du passage sur les aubes ou dans le rotor. La direction de l'eau à son entrée dans le rotor est tangentielle (à la périphérie de la roue) et à sa sortie elle est parallèle à l'axe de rotation : ce débit complexe du point de vue direction fait que la turbine Francis est souvent appelée turbine à "débits mélangés". Malgré sa structure rotor/roue compliquée, sa mise au point résultait de l'expérience acquise et répondait aux besoins des régions rurales des Etats-Unis au 19ème siècle par une vitesse plus élevée, une puissance et une économie plus grande.

La turbine Nagler à hélice à pales fixes est une turbine à réaction à admission totale dans laquelle la direction du courant dit "axial" est parallèle à l'axe de rotation (Figure 42). Elle ressemble à une hélice de navire et on peut en réalité la considérer comme son inversion ; son rotor est par conséquent d'une structure beaucoup plus simple que celle de la turbine Francis. La faible hauteur de chute, la grande vitesse de rotation de la turbine Nagler permet souvent de la relier directement aux génératrices électriques. Les appareils hydro-électriques russes et américains mentionnés plus loin comme applicables dans les pays en voie de développement utilisent les turbines à hélice reliées directement aux génératrices électriques.

La turbine Kaplan comporte des pales d'hélice dont le pas peut être changé pendant le fonctionnement afin que la vitesse de la turbine demeure constante malgré la variation de charge. C'est dans ces conditions que la turbine fonctionne à plein rendement.

La roue/turbine Pelton est souvent appelée turbine à impulsion, bien que le principe de réaction y joue un rôle aussi important pour la transformation d'énergie. Les Allemands l'appelent souvent turbine "sans pression", car il ne s'y produit aucune variation de pression lors du passage de l'eau dans la roue. Le potentiel énergie/pression de l'eau est totalement converti en énergie cinétique dans un éjecteur. Le courant d'eau à grande vitesse est ensuite dirigé sur

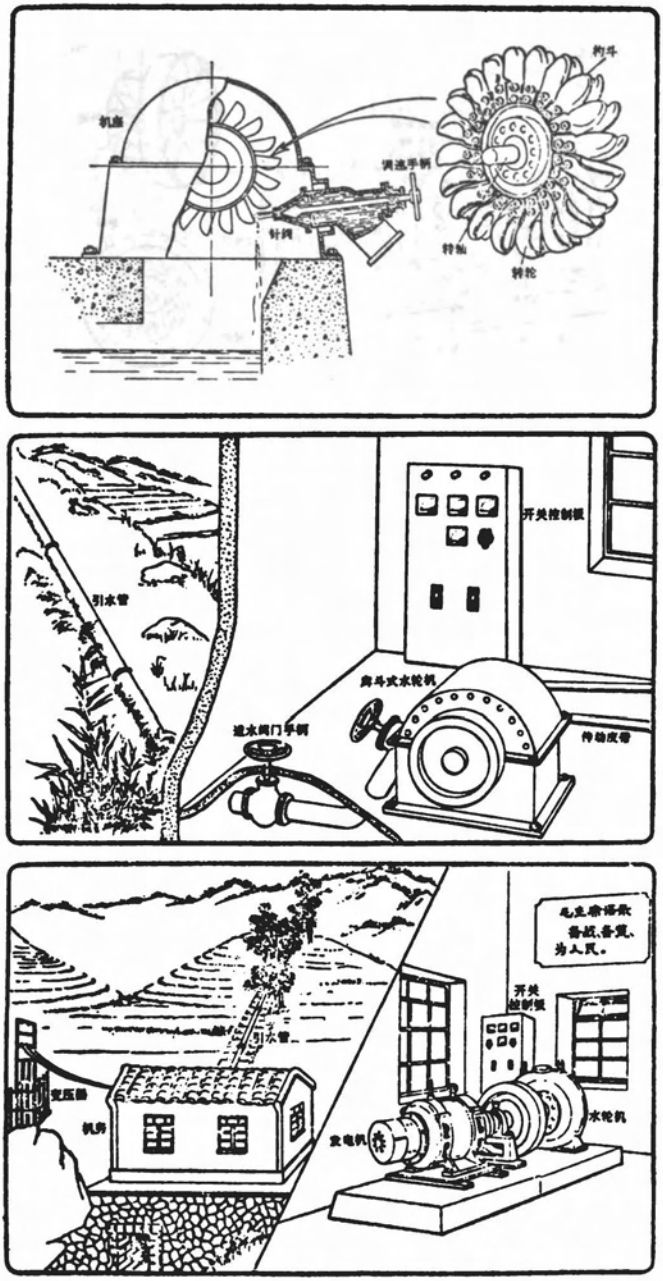


FIGURE 40 Centrale Pelton et détails. [Source : voir Réf. 2]

Digitized by Google

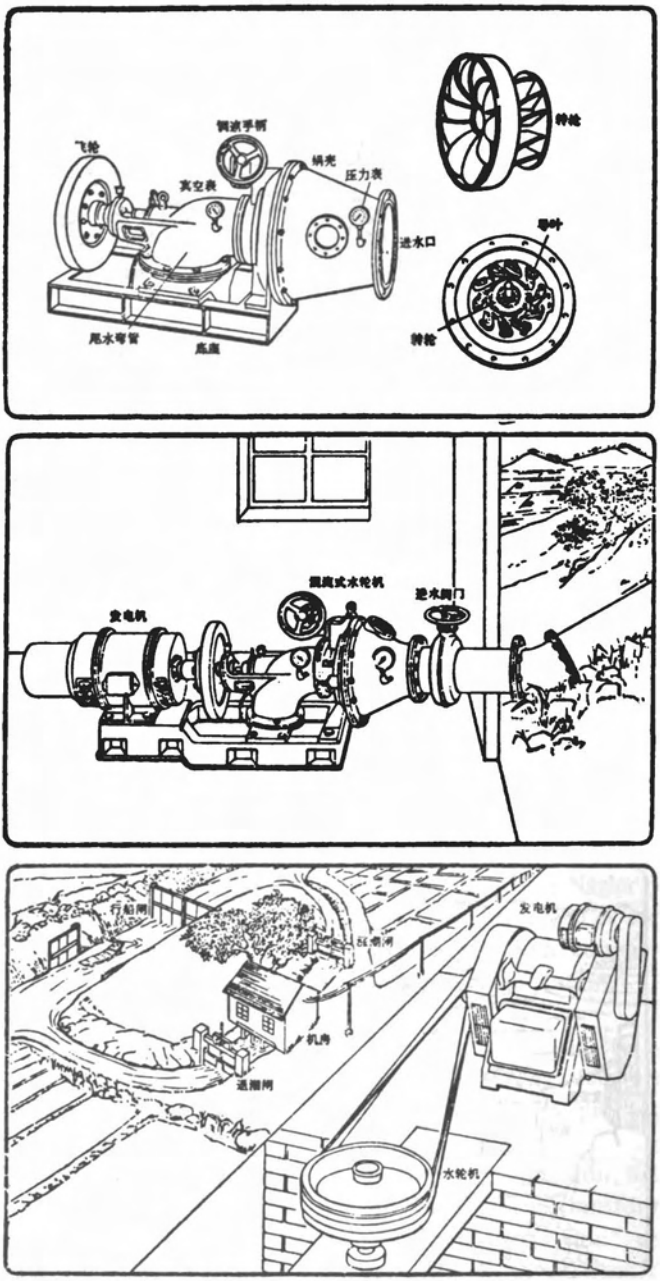


FIGURE 41 Centrale à turbine Francis et détails. [Source : voir Réf. 2]

Digitized by Google

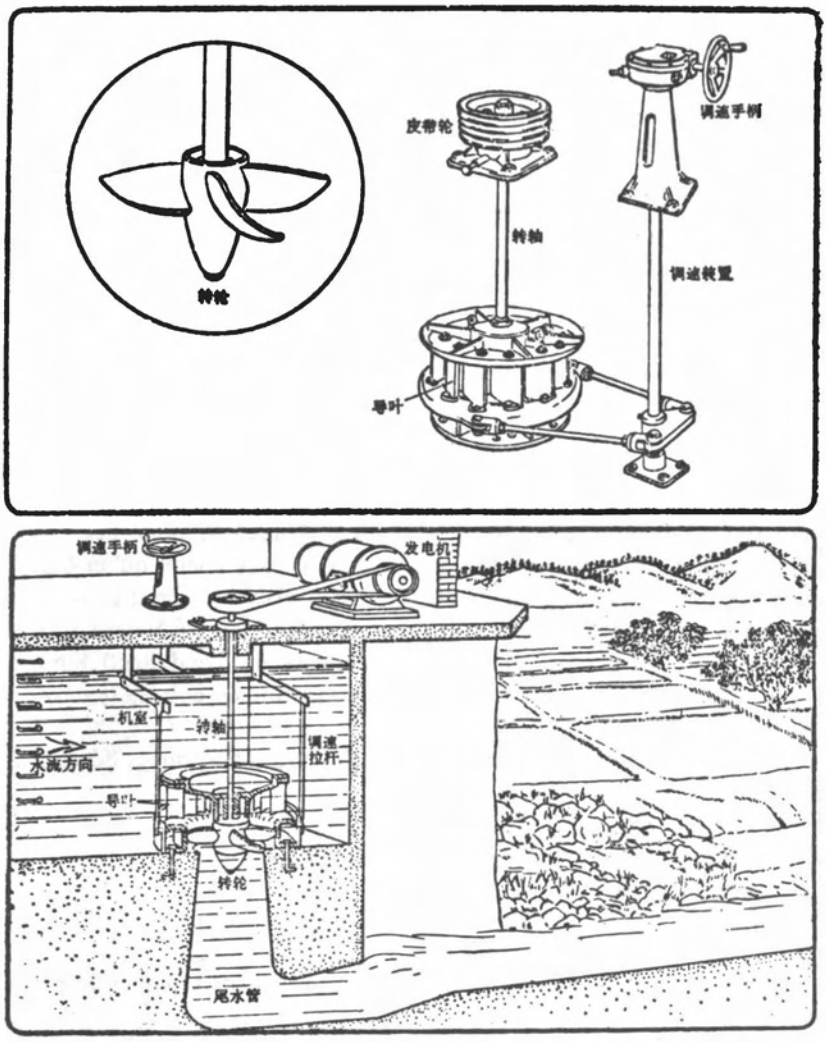


FIGURE 42 Centrale Nagler à hélice à pas fixe et détails. [Source : voir Réf. 2]

des augets hémisphériques pour surmonter la résistance de charge et transférer l'énergie à la turbine rotative.

On rencontre habituellement la turbine Pelton dans les régions montagneuses où l'on dispose de chutes de centaines de pieds. La hauteur des chutes compense les limitations inhérentes à la conception admission partielle. En Nouvelle Angleterre, il semble n'y avoir qu'une turbine Pelton en place : une réalisation locale utilisée jusqu'en 1972 environ qui actionnait une

Digitized by Google

scierie. Elle était entraînée par une chute d'eau de 36 m 8 et était reliée directement à une génératrice de 5 kW fonctionnant à une vitesse supérieure à 1.000 tours minutes.

La turbine Pelton peut être considérée comme la version à grande vitesse de la roue à augets en-dessous ou la roue à cuve.

Arrivée d'eau

Toutes les turbines exigent que l'eau arrive sous pression d'une certaine hauteur, par de grosses tuyauteries ou conduites forcées. La dénivellation entre cette hauteur et celle de la turbine peut résulter de conditions naturelles ou peut être artificiellement créée au moyen d'un barrage. Le barrage ne sert pas seulement à créer la dénivellation, mais également à emmagasiner l'eau de façon à régulariser les variations de débit du courant. L'emplacement idéal d'un barrage devrait se trouver à un point du lit du cours d'eau où la dénivellation est importante afin d'obtenir un maximum de puissance avec un minimum de canalisation d'eau vers la turbine. Toutefois, pour des raisons d'économie et de simplicité de construction, il vaut mieux qu'un barrage d'une longueur et d'une hauteur minimum soit placé en amont de ce point avec une longue conduite canalisant l'eau vers la turbine. En Nouvelle-Angleterre, on a pu voir pendant de nombreuses années, des conduites 1 km 6 de long et de 1 m 53 ou 1 m 83 de diamètre construite en bois de sequoya de Californie.

Le choix d'un emplacement pour centrales hydro-électriques dépend des facteurs suivants :

- La topographie (pentes, stockage, évaporation) ;
- La géologie (emplacement du barrage, écoulement) ; et
- Le débit du courant (pluies, zones de précipitations).

Les Figures 43-48 représentent certains arrangements typiques de petites centrales hydro-électriques.

Pour obtenir les renseignements nécessaires au choix d'un lieu, on peut suivre la méthode conventionnelle indiquée dans les ouvrages techniques, dont certains figurent dans une liste ci-après ; il en est de même pour la machinerie.

Techniques Actuelles (Disponibles d'ici cinq ans)

Un bref aperçu sur les fabricants de turbines aux Etats-Unis révèle que seul un fabricant, The James Leffel & Co. de Springfield, Ohio offre des ensembles hydro-électriques de série. Ceux-ci fournissent du courant continu ou du

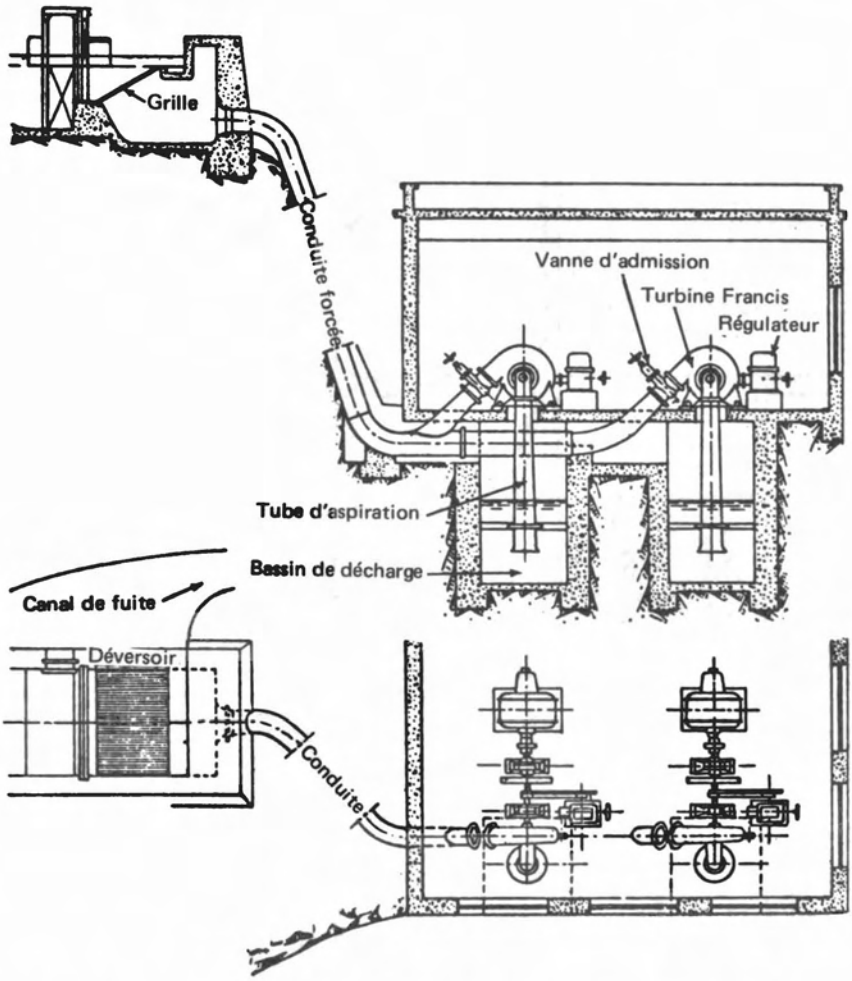


FIGURE 43 Plan type d'une petite centrale hydro-électrique avec turbine Francis pour chute d'eau de hauteur moyenne. [D'après : *Small-Scale Power Generation*, United Nations, New York, 1967. UN Publication Sales No. 67.11.B.7.]

courant alternatif de 0,5, 1, 2, 3, 5, 7,5 et 10 kW (Figure 49). Il existe également plusieurs types de turbines pour chaque producteur de courant donné, suivant les hauteurs de chute de 2 m 5 à 7 m 6 (l'annexe 8 traite en détails des turbines Leffel et de celles d'autres fabricants).

Le prix de ces ensembles est compris entre $3.600 pour 0,5 kW et $10.000 pour les 10 kW. Un ensemble de 10 kW qui fournit 100 kWh/par jour,

Digitized by Google

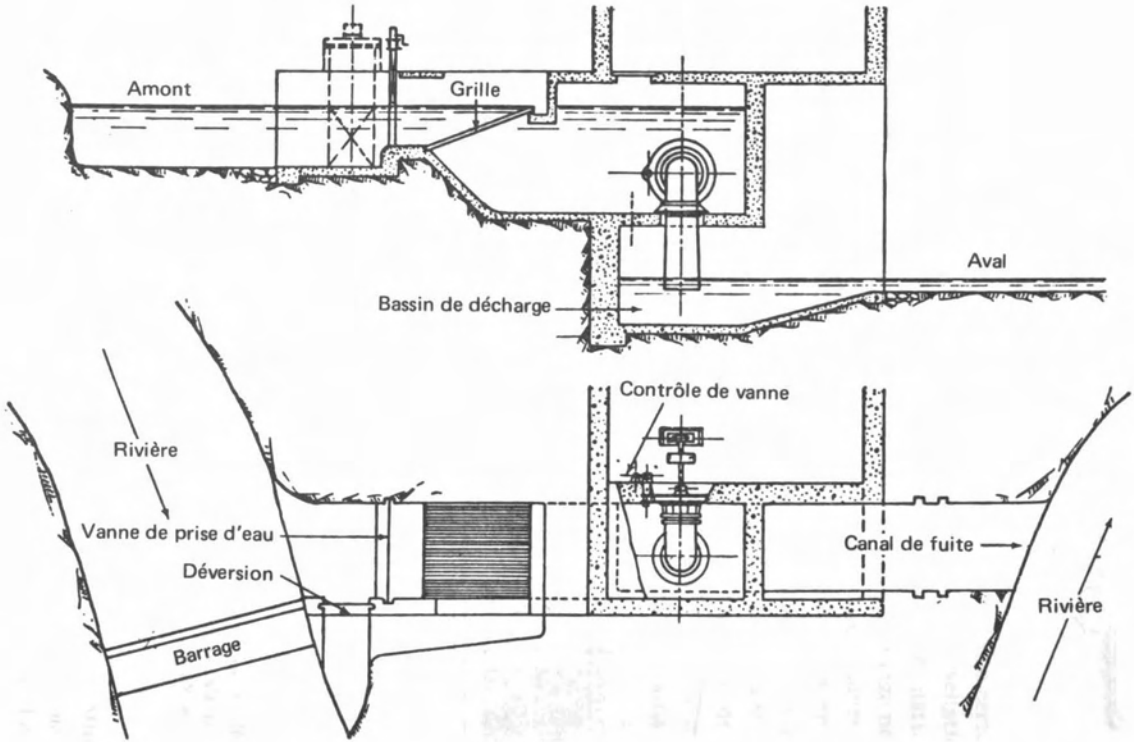


FIGURE 44 Plan type d'une petite centrale hydro-électrique à turbine Francis pour faible chute. [D'après : *Small-Scale Power Generation*, United Nations, New York, 1967, UN Publication Sales No. 67.11.B.7.]

Digitized by Google

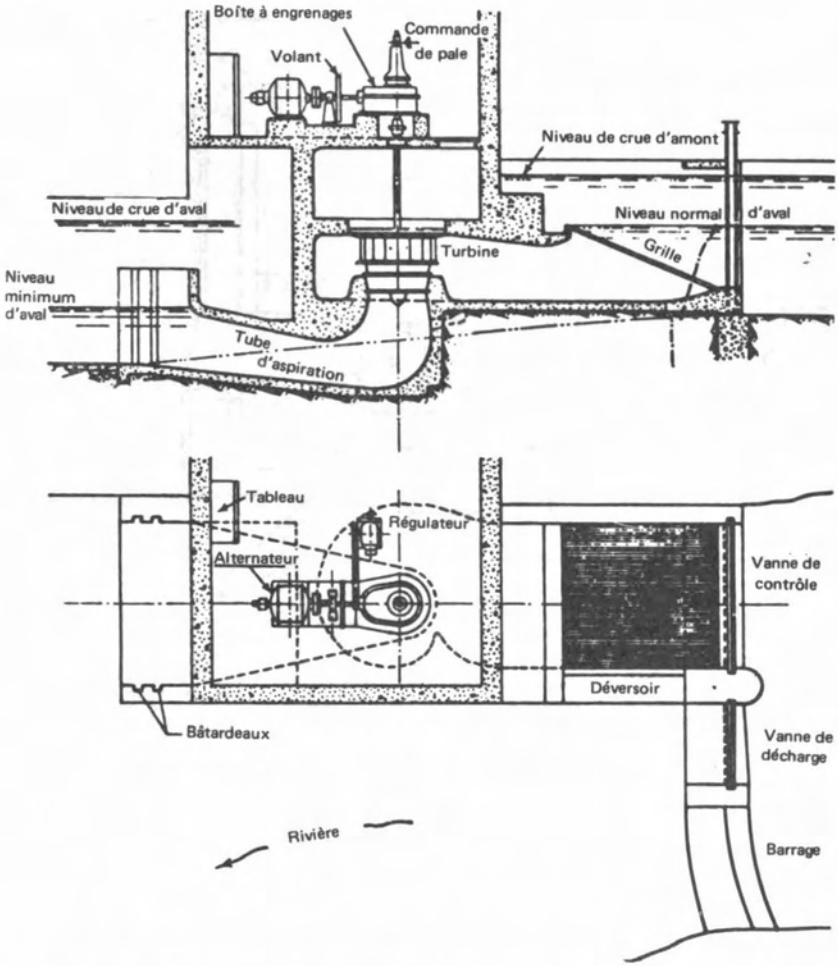


FIGURE 45 Plan type d'une petite centrale hydro-électrique avec turbine Kaplan pour une très petite chute d'eau. [D'après : *Small-Scale Power Generation*, United Nations, New York, 1967. UN Publication Sales No. 67.11.B.7.]

pendant 350 jours par an, selon des frais annuels fixes et d'exploitation de 20 pour cent, peut fournir de l'énergie au prix unitaire de 6¢ au kWh, non compris le prix du barrage ni celui de la conduite.

L'ensemble Leffel emploie les turbines du type hélice, à pas fixes, reliées directement à la génératrice, ce qui évite le désavantage, la dépense, et l'efficacité réduite inhérente aux courroies et aux engrenages.

Digitized by Google

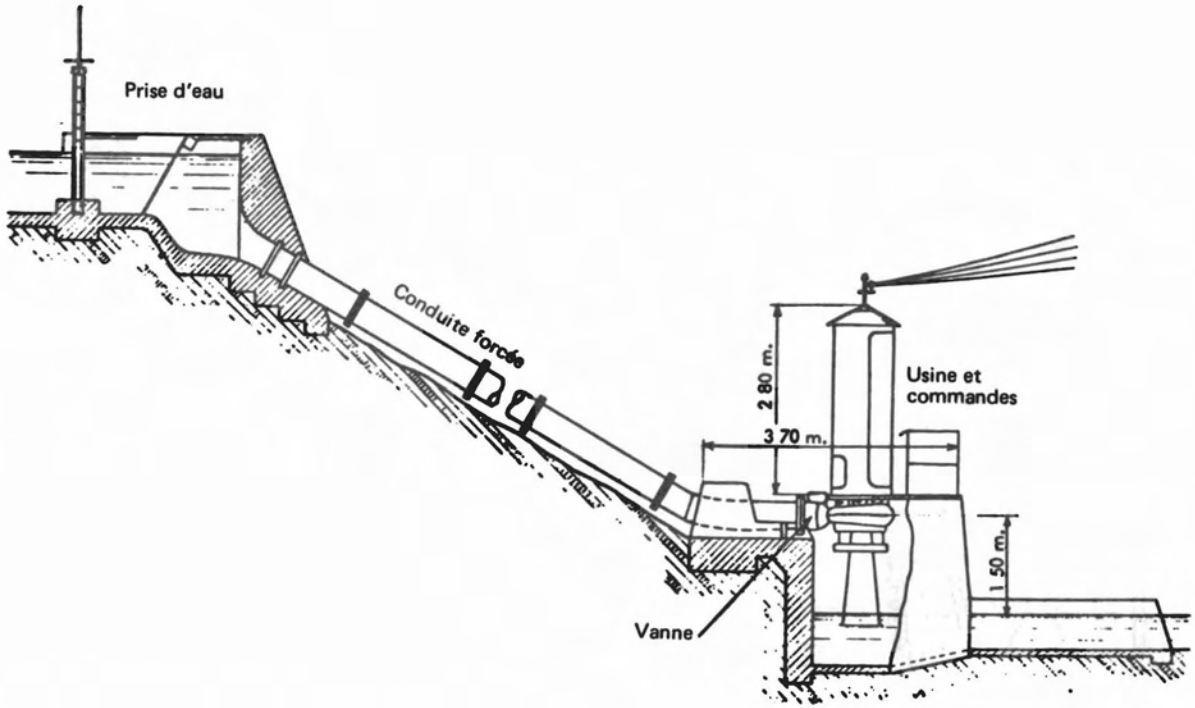


FIGURE 46 Plan type d'une micro-centrale hydro-électrique. [D'après : *Small-Scale Power Generation,* United Nations, New York, 1967. UN Publication Sales No. 67.11.B.7.]

Digitized by Google

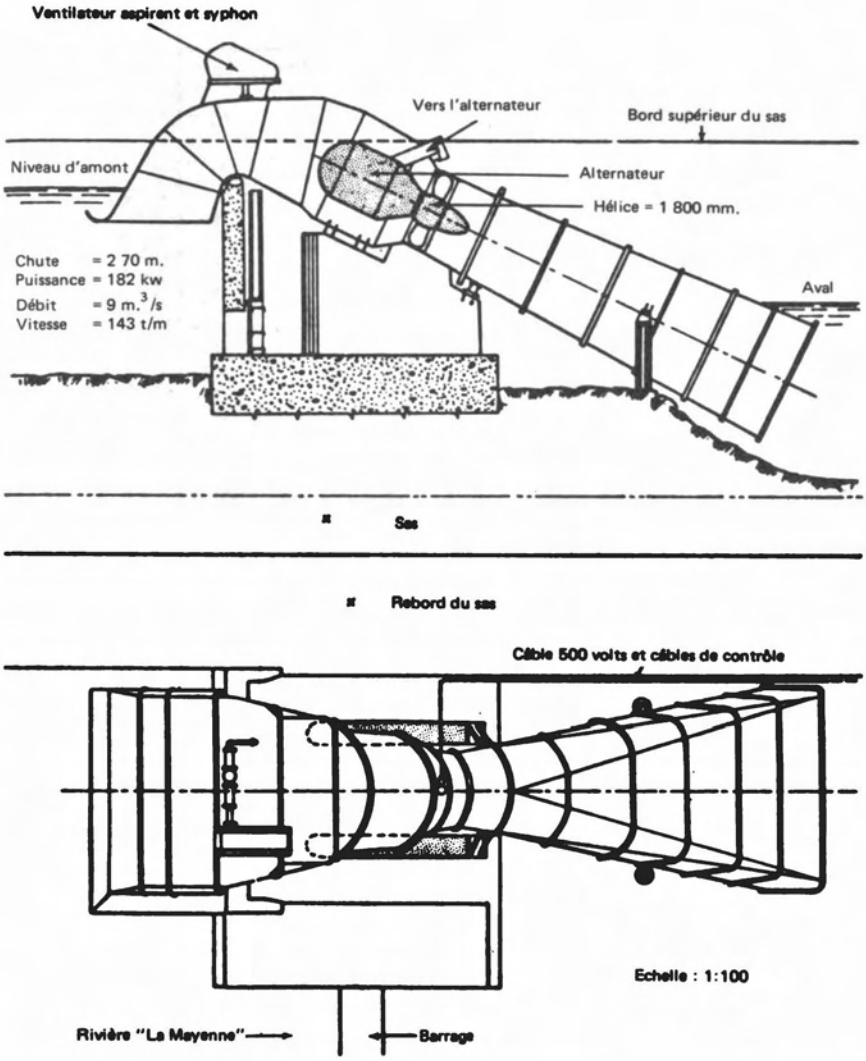


FIGURE 47 Disposition de syphons pour turbines à hélice : La Mayenne, France. [D'après : *Small-Scale Power Generation*, United Nations, New York, 1967. UN Publication Sales No. 67.11.B.7.]

En plus de ces ensembles, Leffel offre sa gamme traditionnelle de turbines Francis. Le prix d'une turbine Francis avec roue de turbine de 43 cm de diamètre et 20 HP (15 kW) à 294 tours minute pour une chute d'eau de 3 m est de $7.900. Sa faible vitesse nécessite un couplage avec la génératrice électrique par courroie ou pignons.

Digitized by Google

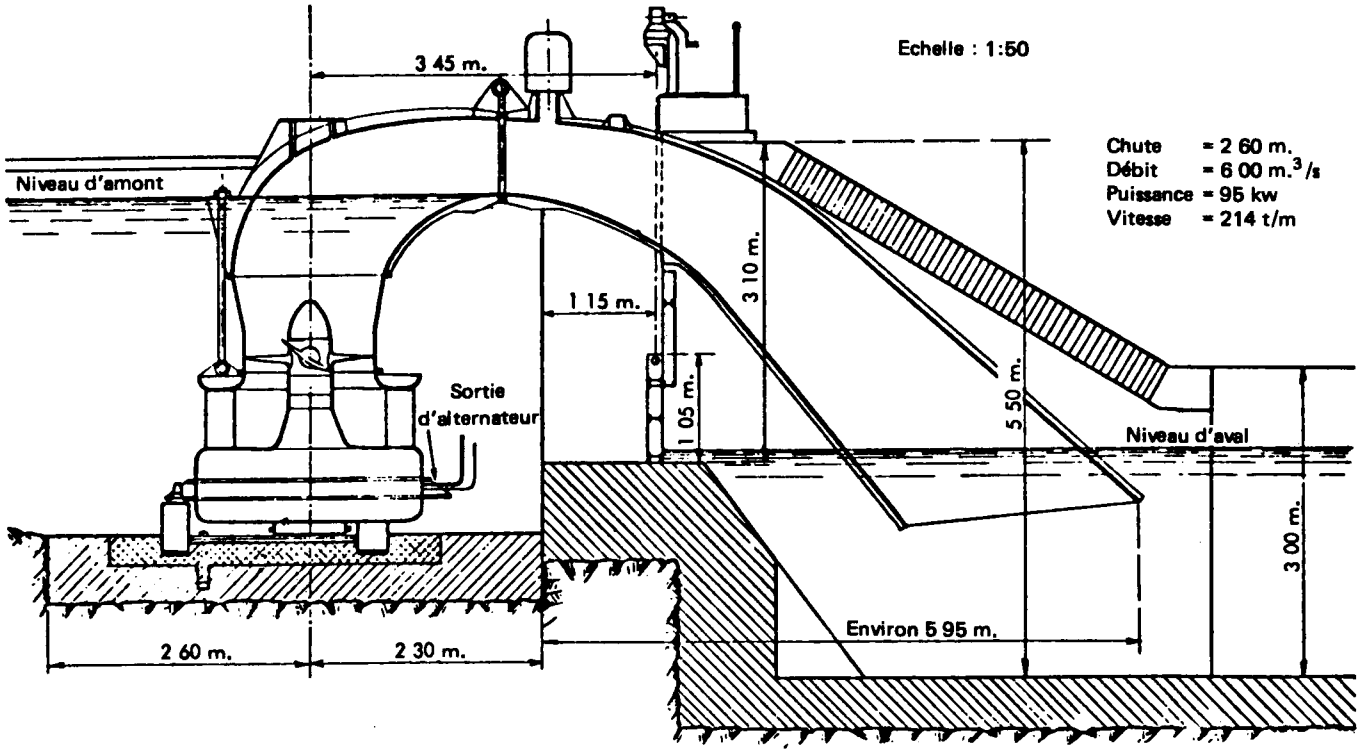


FIGURE 48 Micro-centrale hydro-électrique à turbine, à débit ascendant submergée (vue en coupe) : La Garonne, France [D'après : *Small-Scale Power Generation*, United Nations, New York, 1967. UN Publication Sales No. 67.11.B.7.]

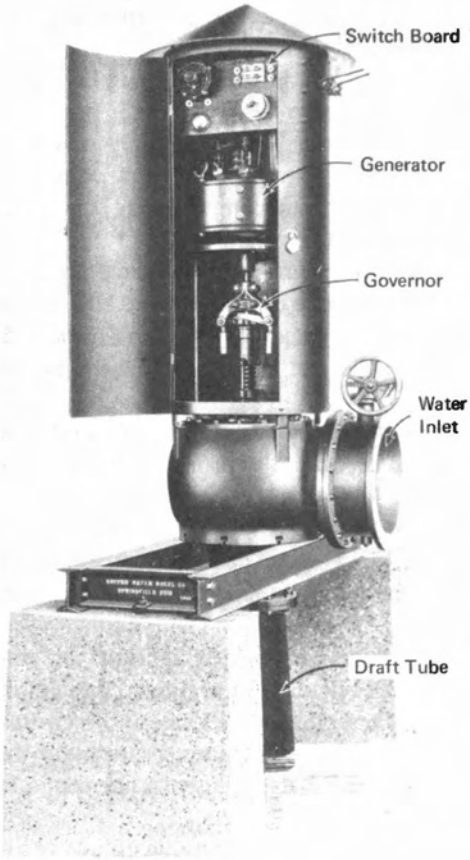
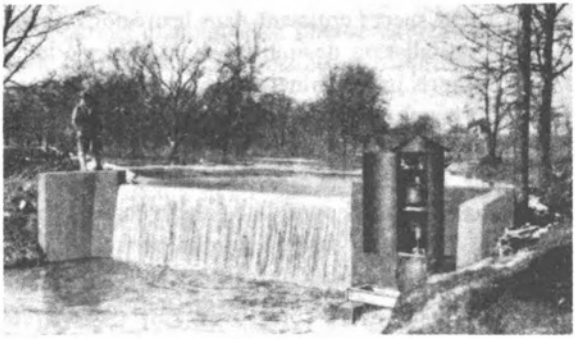


FIGURE 49 Appareil Leffel de 1 kW dans une ferme de l'Ohio. *a*, appareil 1-kW. *b*, installation de l'appareil 1-kW. [Avec l'autorisation de The James Leffel & Co.]



Digitized by Google

L'Union Soviétique construit un ensemble à hélices à pales fixes dont la dimension et la forme sont presque identiques à celles de Leffel. Appelé "Mikroges," il a été conçu par V. I. Gromov et Y. N. Fleksuer.

Gilbert Gilkes & Gordon Ltd, de Kendal., Westmorland, Grande Bretagne offre de petits modèles d'unités hydro-électriques de 10 à 20 kW pour des chutes d'eau ou courants particuliers. Le prix probable de ces unités fonctionnant avec une chute d'eau de 3 m serait d'environ $34.000 et pour une dénivellation de 4 m 5 environ $28.000. Ce prix ne comprend pas le prix du barrage, de la conduite, des vannes ni des bâtiments.

La compagnie canadienne Barber Hydraulic Turbine Ltd., Port Colborne, Ontario, a conçu un petit modèle hydro-électrique de 18,5 kW (20 HP), qui a fonctionné à titre d'essai en 1976. La turbine est du type à pales fixes, à 5 pales et d'un diamètre de 25 cm. Ce projet est en partie financé par le Gouvernement canadien.

La Cie Drees de Werl, Westphalie, en Allemagne de l'Ouest, fabrique une centrale miniature hydro-électrique d'une capacité d'environ 20 kW. Elle ressemble à la centrale Leffel.

A Budapest, en Hongrie, la compagnie Ganz fabrique un ensemble hydro-électrique, le "Mignon", qui développe 15 kW pour des hauteurs de chute variant de 7 à 12 m. Il pèse 1300 kg environ et emploie la turbine du type Kaplan.

La Ossberger-Turbinenfabrik de Weissenberg en Bavière fabrique un ensemble hydro-électrique : le Hydro-light. Il utilise la turbine dite à "impulsion radiale" construite en deux dimensions : l'ensemble de 3 kVa pour des chutes comprises entre 4 et 6 m et l'ensemble 5 kVa pour des chutes comprises entre 6 et 9 m. Ces ensembles ont, paraît-il, été installés dans plusieurs pays en voie de développement.

La publication de certains rapports et renseignements indique qu'une technologie fiable et assez répandue d'appareils hydro-électriques de petite taille et pour chutes d'eau basses existe en République populaire de Chine[2,3,4,5]. La documentation (en chinois) décrit l'emploi de petites centrales hydro-électriques utilisant des turbines Pelton, Francis et Kaplan. Les rapports de presse révèlent leur succès croissant dans les régions rurales et décrivent la construction et l'installation de milliers d'ensembles d'une capacité inférieure à 100 kW, y compris une turbine en bois pour une centrale hydro-électrique de 20 kW[6]. On connaît également certains détails de construction de turbines en bois ou béton armé pour les centrales hydro-électriques de petite taille[5]. Le groupe ne possède toutefois aucun détail sur les caractéristiques de ces ensembles ni sur leur disponibilité dans le commerce.

A Lin Hsien, on fait un emploi particulièrement intéressant d'un canal d'irrigation où une série de petites centrales hydro-électriques construites le long du canal profitent de la dénivellation progressive. La première centrale

qui peut produire 250 kW est située en bas d'une chute de 15 m en haut de laquelle se trouve un bassin de décantation destiné à éliminer le sable et la boue qui risqueraient de causer une érosion considérable sur les pièces métalliques. A partir de là, tous les 5 m de denivellation, on a installé une turbine de 40 kW, chacune précédée d'un basin de décantation. La Figure 50 représente une de ces centrales de 40 kW.

Les turbines en bois destinées aux centrales hydro-électriques sont aussi fabriquées en Union Soviétique mais, là encore, le comité n'a pu obtenir de détails à ce sujet[7].

Fiabilité

On peut s'attendre à ce que les petites centrales du type décrit aient une longévité d'environ 25 ans avec un minimum d'entretien.

Réalisation Locale

Bien que la plus grande partie du débat ait porté sur les dispositifs manufacturés, les systèmes hydro-électriques de petite taille permettent des réductions de prix sensibles dans le commerce local.

- Les barrages peuvent être construits en terre, en pierre ou en bûches. Des centaines de barrages semblables ont été employés en Nouvelle Angleterre et ont une durée de 25 ans ou davantage. L'ouvrage de Leffel sur les barrages de moulins est excellent en ce qui concerne la construction de petits barrages pour des hauteurs de chute atteignant 4,5 m[8]. (Voir aussi Figure 51.)
- Les conduites peuvent être construites en béton armé ou en panneaux de bois cerclés de fer.
- Les turbines peuvent être faites en bois, bien que, dans le cas où l'on disposerait d'une industrie sidérurgique rudimentaire, on puisse employer des matériaux plus résistants comme le fer ou l'acier.

On devrait étudier les appareils disponibles à l'heure actuelle afin de les simplifier et les rendre meilleur marché. Il est possible de supprimer le régulateur et une partie du matériel des commandes. Le problème général de simplication doit être examiné avec les compagnies mentionnées ci-dessus.

Comme on l'a vu précédemment, on a appris que de petites turbines en bois sont fabriquées en Union Soviétique et en Chine, quoiqu'on n'ait obtenu aucune précision là-dessus de l'Union Soviétique. Il peut être valable d'explorer l'idée de la conception de turbines en bois. Cela pourrait faire un sujet de thèses d'ingénieur dans les instituts techniques ou les écoles d'ingénieurs, de préférence, dans un pays en voie de développement, avec des fonds

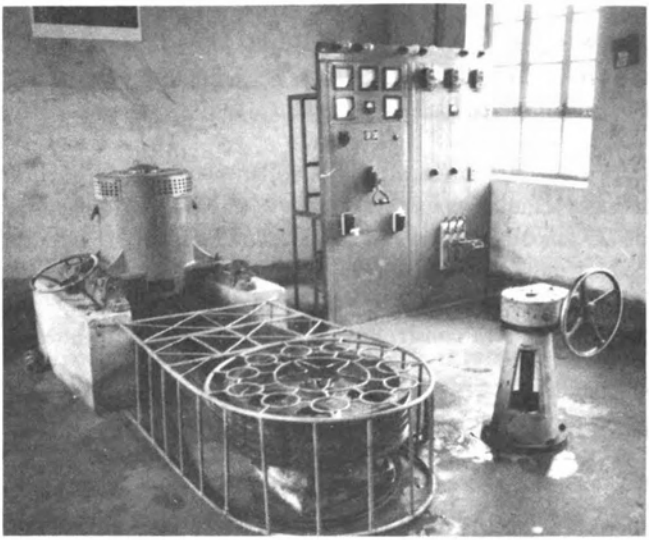
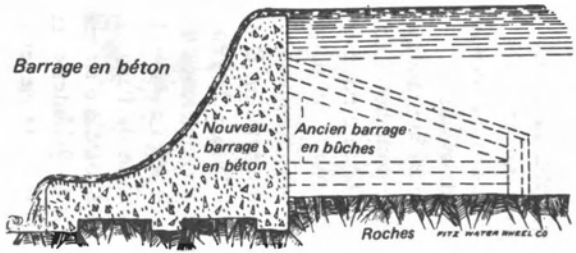


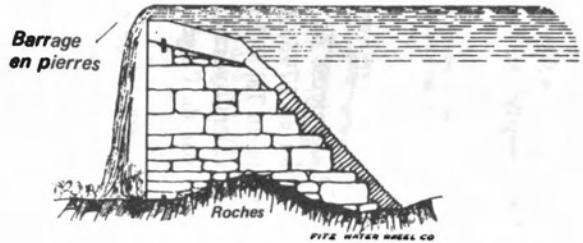
FIGURE 50 Centrale hydro-électrique de 40 kW à Lin Hsien, République populaire de Chine. Cette installation est une des 26 centrales disposées tous les cinq mètres de dénivellation le long du douzième chenal du canal No. 1 du système d'irrigation du Canal du Drapeau Rouge. [Ces photos sont publiées avec l'autorisation de Amir U. Khan de l'Institut international de recherche sur le riz. Le Docteur Khan a visité ces stations en qualité de membre d'une délégation, parrainée par le Comité des communications savantes de la République populaire de Chine, de la Commission des relations internationales de l'Académie nationale des sciences.] *a*, Bâtiment et canaux à vannes. *b*, Génératrice et commandes (la génératrice est entraînée par une série de courroies trapézoïdales reliées à une poulie montée sur l'arbre de la turbine.)

Digitized by Google



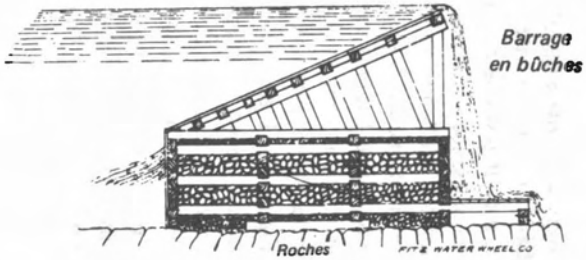
Pour ceux qui savent utiliser le béton, c'est là un moyen commode et permanent pour obtenir un réservoir d'eau. C'est sans doute la meilleure structure et celle qui représente la meilleure formule. Il n'est pas nécessaire d'enlever l'ancien barrage de bois.

a



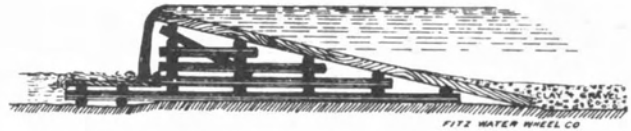
Un très bon type de barrage en pierres. Les couches extérieures devraient porter un revêtement de béton ou de mortier pour assurer une parfaite étanchéité.

b



Voici une autre méthode de construction d'un barrage en bois, lorsqu'on préfère une plus grande hauteur.

c



Lorsque le pays permet de se procurer facilement du bois, ceci représente une construction de barrage peu coûteuse. Facile à construire et très satisfaisant lorsqu'on a seulement besoin d'un petit barrage.

d

FIGURE 51 Barrages pour chutes peu élevées [Schémas et légendes empruntés à: "Electric Light Plants Driven by Small Water Powers," Bulletin No. 16, Fitz Water Wheel Company, Hanover, Pennsylvania, 1916]

Digitized by Google

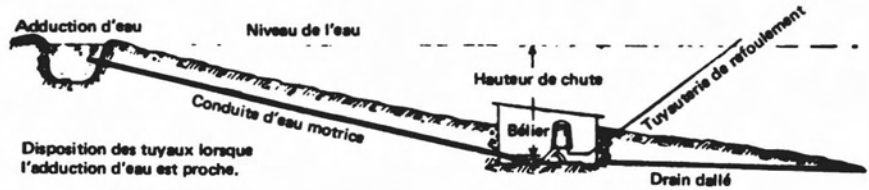
accordés aux étudiants afin qu'ils construisent des turbines pour des essais et démonstrations. Ceci pourrait servir de point de départ à un enseignement classique de la construction des turbines en bois dans les pays en voie de développement.

BELIERS HYDRAULIQUES

On a presque oublié de nos jours le bélier hydraulique, l'ingénieuse machine de pompage d'eau automatique développée par Montgolfier en 1796. A une certain époque, l'eau était fournie aux fontaines et aux lacs du Taj Mahal par ces simples moyens[9]. La liste actuelle des fabricants de béliers hydrauliques fait état des fabricants de pompes à piston mais non pas de l'ingénieuse pompe de Montgolfier.

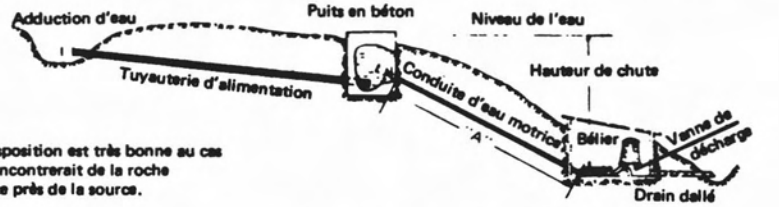
Le principe de base du bélier hydraulique est celui du "coup de bélier hydraulique". En fait, c'est le principe du "coup de bélier" qui est à l'origine de sa réinvention en Angleterre au début du 19ème siècle. Voici ce qui s'est produit : une colonne d'eau installée dans un immeuble à plusieurs étages devait desservir l'étage inférieur ; la chute dont on disposait ne suffisait pas pour alimenter les étages supérieurs du bâtiment. Or chaque fois que l'on fermait le robinet trop brusquement, le tuyau éclatait près du robinet. Un plombier astucieux résolut le problème en branchant sur la tuyauterie, juste en amont du robinet, un tuyau vertical de dérivation allant à une citerne ouverte située à l'étage au-dessus afin d'amortir le coup de bélier causé par la brusque augmentation de pression. Par la suite, il fallut placer la citerne à l'étage le plus haut et il devint vite évident que, puisque l'eau parvenait à l'étage supérieur, il était possible de fournir l'eau en petite quantité à tous les étages. Cela donna naissance à la version anglaise du bélier hydraulique.

C'est le phénomène du "coup de bélier" qui permet au bélier hydraulique d'utiliser l'énergie cinétique de l'eau circulant dans un tuyau pour élever une partie de cette eau à une hauteur supérieure à celle d'où elle descend, avec une efficacité de 60 pour cent environ. La Figure 52 représente un bélier hydraulique et certaines installations typiques. Le principe de fontionnement est illustré à la Figure 53. L'eau arrive par la tuyauterie d'alimentation D et passe par l'orifice du clapet extérieur F. A mesure que la vitesse de l'eau augmente, la pression dynamique s'exerce de plus en plus sur le dessous du clapet de contrôle F jusqu'à ce qu'elle dépasse le poids du clapet. La clapet F se soulève alors rapidement et ferme l'ourverture. La pression de l'eau en circulation fait ouvrir le clapet B, l'eau parvient à la cloche à coussin d'air, ce qui fait augmenter la pression de l'air, puis s'échappe par la tuyauterie de distribution I. Comme la vitesse de l'eau diminue dans le bélier, le clapet B retombe et se ferme en refoulant quelque peu l'eau. Cela cause une chute de

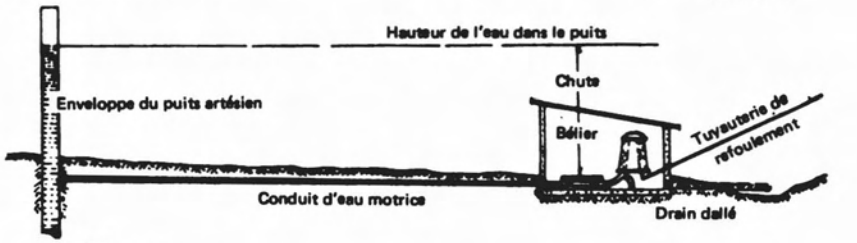


Disposition des tuyaux lorsque l'adduction d'eau est proche.

Disposition de la conduite d'eau quand l'adduction d'eau est éloignée.



Cette disposition est très bonne au cas où on rencontrerait de la roche compacte près de la source.



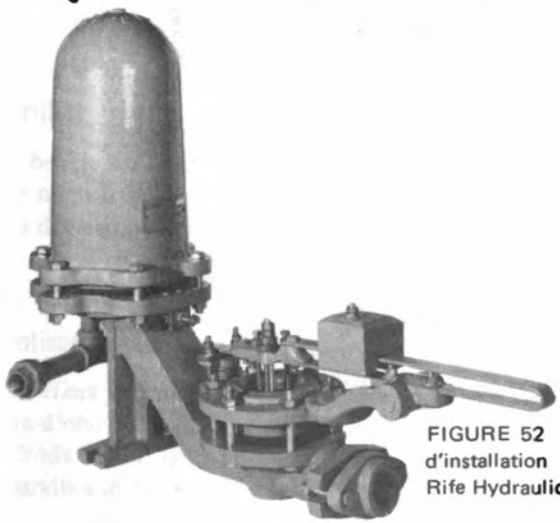


FIGURE 52 **Bélier hydraulique et exemple d'installation type. [Avec l'autorisation de Rife Hydraulic Engine Manufacturing Co.]**

Digitized by Google

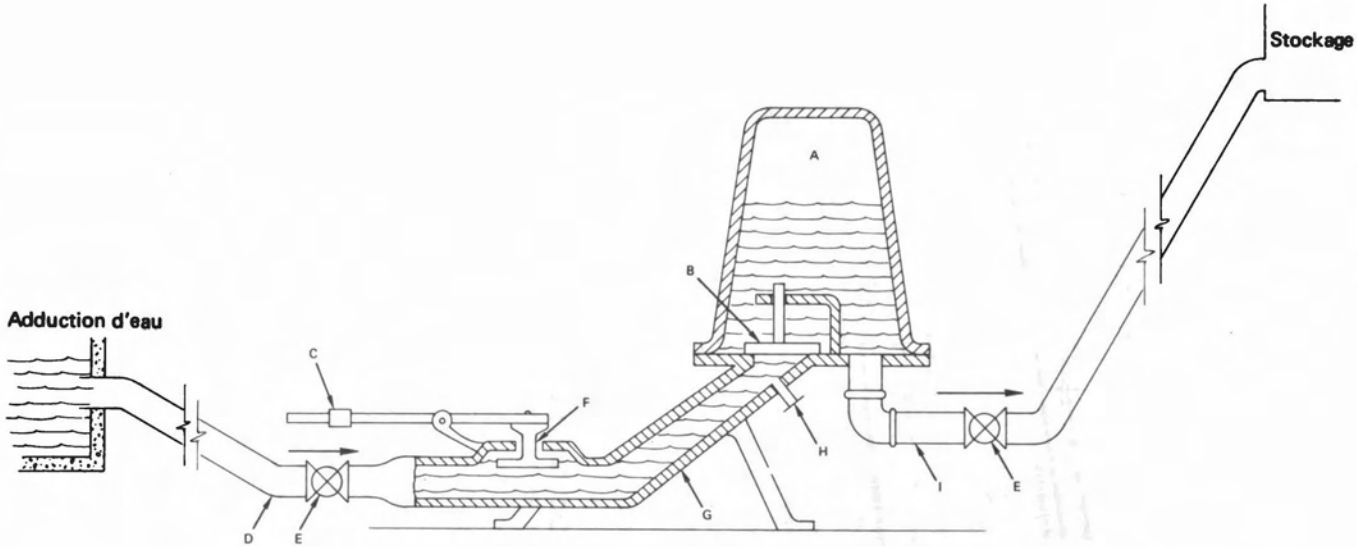


FIGURE 53 Le bélier hydraulique. [Source: Village Technology Handbook, VITA, Mt. Rainier, Maryland, USA, 1970]

Digitized by Google

pression soudaine sous le clapet F qui s'ouvre rapidement en retombant, et le cycle recommence. Naturellement, lorque le clapet B est fermé, la pression en A est déterminée par le niveau de l'eau dans le réservoir et dans le tuyau de distribution. Ainsi, les apports successifs d'eau au réservoir résultent de l'augmentation momentanée de la pression d'air en A à chaque cycle. Ce rythme de répétition du cycle se règle au moyen du contrepoids C.

Par exemple, un bélier qui utilise une chute d'eau verticale de 3,7 m délivrera 5 à 6 pour cent du débit à une hauteur de 38 mètres ; si la hauteur à atteindre n'est que de 7,6 m, le débit d'eau fournie atteindra 22 pour cent.

Bien que le bélier hydraulique soit d'ordinaire un moyen de pompage d'eau, on l'utilise également pour comprimer l'air pour les foreuses de rochers–comme lors du percement du tunnel du Mont Cenis, en Suisse[10]. La violence de l'arrivée de l'eau dans la chambre A joue le rôle d'un piston pour comprimer l'air normalement utilisé comme coussin d'air, lorsqu'on emploie le système pour pomper l'eau. C'est la phrase aspiration du cycle qui devient le cycle d'admission d'air dans ce cas-là.

Techniques Actuelles (Disponsibles d'ici cinq ans)

Une enquête auprès d'une vingtaine de fabricants de béliers hydrauliques aux Etats-Unis a permis de n'en découvrir qu'un seul qui fabrique la pompe : Rife Hydraulic Engine Manufacturing Co., Millburn, New Jersey 07041. Cette compagnie fournit des beliers nécessitant des hauteurs de chute d'eau minimes d'environ 0,6-1,2 nn. Leur brix varie entre $300 et $2.600 environ, suivant leur capacité de pompage. (Pour des informations plus détaillées, voir Annexe 8.)

Fiabilité

Les béliers sont entièrement automatisés et fonctionnent 24 heures par jour avec une surveillance minimum pendant des mois. Ils peuvent servir au pompage de l'eau pour l'irrigation et la distribution.

Réalisation Locale

Les béliers hydrauliques peuvent être construits avec le matériel local par une main-d'oeuvre qualifiée locale dans les régions où l'on dispose de tuyaux et de raccords en fer. On trouvera toutes les indications pour la construction de ces appareils auprès de VITA[11,12]. (Voir p. vii.)

Recherches et Réalisations

Le bélier hydraulique est tellement efficace dans ses fonctions de pompe à eau qu'il ne nécessite aucune recherche ultérieure sur celles-ci. Il conviendrait, par contre, d'en encourager la recherche et les réalisations pour en faire un compresseur d'air. On produirait en permanence cet air comprimé qui serait alors stocké dans des réservoirs avant d'être employé dans les moteurs alternatifs, les machines à turbines ou les génératrices d'électricité.

COMPRESSEUR D'AIR HYDRAULIQUE

En Europe médiévale, on connaissait cette machine sans pièces mobiles sous le nom de "trompe". Elle fournissait l'air comprimé servant à la combustion dans les forges de la Catalogne. Au début du 20ème siècle, il a connu un succès limité aux Etats-Unis sous le nom de compresseur d'air hydraulique.

Ce compresseur d'air hydraulique est, au fond, l'inversion de la pompe d'injection d'air comprimé ou extracteur pneumatique. C'est un simple dispositif dans lequel on laisse couler l'eau d'une certaine hauteur dans un tuyau vertical par un Venturi (convergent-divergent) en faisant le tour. A hauteur de la section minimum du Venturi se trouvent des orifices disposés de façon à ce que l'eau en passant devant aspire de l'air et l'entraîne avec elle (Figure 54). Si l'eau a assez de vitesse, elle entraîne l'air absorbé au fond du tuyau, puis dans une chambre qui retient l'air ; là, il se comprime sous l'effet de la transformation de son énergie cinétique en énergie potentielle.

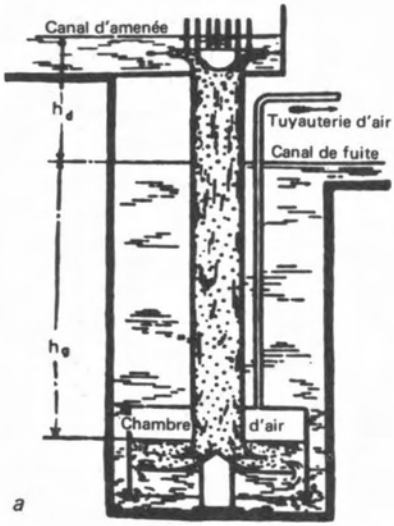
On signale qu'une installation utilisant une chute d'eau de 21,6 m avec un tuyau de 1,53 m de diamètre peut comprimer assez d'air à la pression de 8,05 atmosphères pour développer 750 kW environ (1000 HP)[13]. L'efficacité de cette installation atteindrait 82 pour cent (Figure 55).

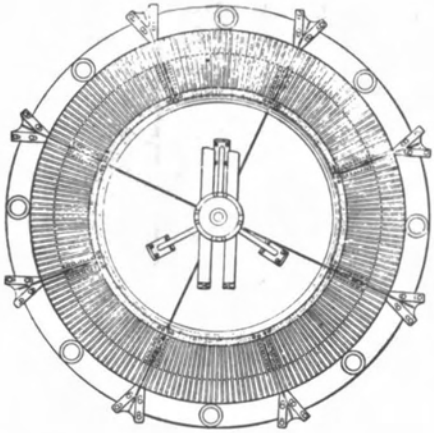
Techniques Actuelles (Disponibles d'ici cinq ans)

C'est une technologie qui pourrait être disponible dès maintenant. Cependant, comme elle semble oubliée depuis 70 ans, on ne connaît aucune installation en service ni d'appareil Venturi conçus à cette fin.

Recherches et Réalisations

La simplicité de ce système et son rendement élevé justifieraient qu'en soient repris l'étude et l'emploi éventuel dans les régions montagneuses où l'on dispose de beaucoup d'eau. La qualité du système est le fonctionnement continu, jour et nuit, avec une simple accumulation d'énergie sous la forme d'air





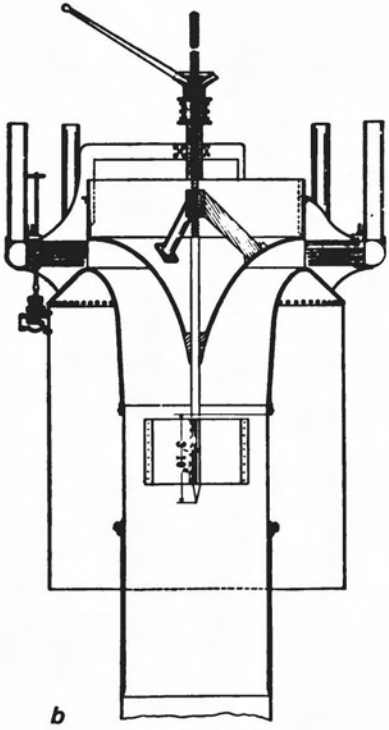


FIGURE 54 Compresseur d'air hydraulique. a. Installation type. (h_d = hauteur de chute, h_g = pressurisation de l'air) [Source: M. Kamal Gohar, 1963. New economical trends for hydroelectric power schemes. *AIEE Transactions* 81 (64, part 3): 896-900]. b. Vue en plan et en coupe de la partie supérieure du compresseur d'air hydraulique [Source: Woodbridge, Réf. 13]

Digitized by Google

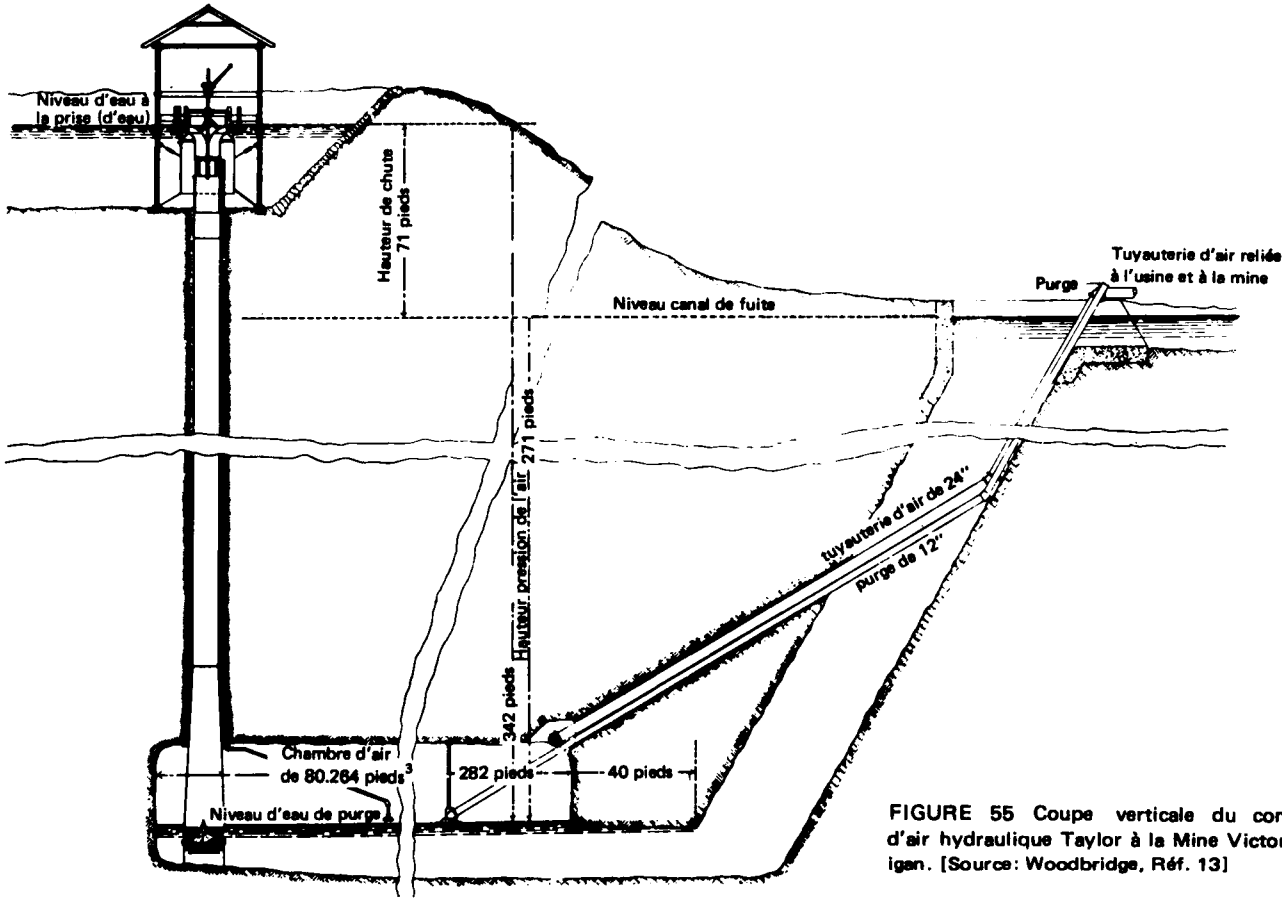


FIGURE 55 Coupe verticale du compresseur d'air hydraulique Taylor à la Mine Victoria, Michigan. [Source: Woodbridge, Réf. 13]

comprimé dans des réservoirs ou des cavernes : ceci en fait un problème intéressant et potentiellement fructueux à étudier. L'air comprimé pourrait être envoyé par des tuyauteries vers des lieux où il servirait à actionner des moteurs alternatifs ou des turbines qui pourraient, à leur tour, faire fonctionner des machines d'usines ou des génératrices d'électricité.

REFERENCES

1. Mosonyi, E. 1960. *Water power development*, Vol. 2, pp. 837-886. 2 vols. Budapest: Hungarian Academy of Sciences.
2. *How to run small power stations efficiently*. 1971. People's Republic of China: Shanghai People's Press. (En chinois)
3. Editorial Publishing Group, East China College of Water Conservancy, Nanking. 1973. *Rural small-scale hydro-electric stations*. People's Republic of China: Shanghai People's Press. (En chinois)

   Voir en particulier les chapitres 6 et 11. Le chapitre 6 "Turbines artisanales" est consacré à la construction, dans le village, de turbines en bois, en ciment armé ou en métal soudées. Les sous-titres comprennent : –turbines artisanales en bois–turbines artisanales en ciment armé–turbines artisanales en tôle d'acier soudées–turbines artisanales à admission partielle en fibrociment–turbines artisanales à admission totale à flux axial. Le chapitre 11 est consacré à la construction de barrages.
4. Canton Bureau of Water Conservancy and Electric Power. 1973. *Rural small-scale hydroelectric stations*. People's Republic of China: Canton People's Press. (En chinois)
5. Editorial Publishing Group on Rural Small-Scale Hydropower Stations, Bureau of Water Conservancy and Electric Power, Revolutionary Committee of Hunan Province. 1974. *Rural Hydroelectric Stations*. 2 vols. People's Republic of China: Hunan People's Press. (En chinois)

   Ce livre concerne les installations de moins de 400 kW, utilisant des chutes d'eau inférieures à 30 mètres. La deuxième partie du Tome I traite de la construction de barrages en terre et en pierre, des vannes et conduites (béton armé, bois, ciment armé).
6. New China News Agency. 1970. Radio broadcast in English, 6:38 A.M., GMT, 11 August. *BBC Summary of World Broadcasts*, Part 3: The Far East weekly economic report. London: British Broadcasting Company.
7. Mosonyi, E. 1960. *Water power development*, Vol. 2, p. 869. Budapest: Hungarian Academy of Sciences.
8. *The construction of mill dams*. 1874. 1970 reprint. Springfield, Ohio: The James Leffel and Co.
9. Reeves, W. J. 1961. Country workshop. *Australian Country*, September: 32-33. Sydney, Australia.
10. Peele, Robert. 1930. *Compressed air plant*. 5th ed. New York: John Wiley & Sons.
11. *Hydraulic rams for village use*. 1970. Mt. Rainier, Maryland: VITA (Volunteers in Technical Assistance).
12. *Village technology handbook*. 1970. Mt. Rainier, Maryland: VITA (Volunteers in Technical Assistance).
13. Woodbridge, D. E. 1907. The hydraulic compressed-air power plant at the Victoria Mine. *Engineering and Mining Journal* 83(3):125-130.

LECTURES SUGGEREES :

USINES HYDRO-ELECTRIQUES

Frizell, J. P. 1905. *Water power*. New York: John Wiley & Sons.

Koester, F. 1909. *Hydro-electric developments and engineering*. New York: Van Nostrand.

Daugherty, R. L. 1937. *Hydraulics: a text on practical fluid mechanics*, Chapters XIV-XVIII, pp. 343-418. 4th ed. New York: McGraw-Hill.

Reports on water power of the U.S. 1880. Washington, D.C.: U.S. Department of the Interior, Census Office.

Mead, D. W. 1950. *Hydrology*. New York: McGraw-Hill.

Wagner, E. G., and Lanoix, J. N. 1959. *Water supply for rural areas and small communities*. Geneva, Switzerland: World Health Organization.

BELIER HYDRAULIQUE

Gibson, A. H. 1970. *Hydraulics and its application*, pp. 683-693. London: Constable.

Meade, D. 1933. *Hydraulic machinery*, pp. 358-383. New York: McGraw-Hill.

COMPRESSEUR D'AIR HYDRAULIQUE

Gibson, A. H. 1970. *Hydraulics and its application*. London: Constable.

Schulze, Leroy E. 1954. *Hydraulic air compressors*. U.S. Bureau of Mines Information Circular, No. 7683. Washington, D.C.: Department of the Interior.

La photosynthèse

LA BIOMASSE TERRESTRE SERT DE RESERVOIR

Dans le processus de photosynthèse, l'énergie solaire absorbée par la chlorophylle fournit l'énergie qui réduit le CO_2 et forme les hydrates de carbone. Ceux-ci sont utilisés à leur tour comme source d'énergie et de matières premières pour toutes les autres réactions synthétiques dans la plante. Ainsi, l'énergie solaire est capturée et stockée sous forme d'énergie chimique. La matière cellulosique de la plante constitue une vaste source inexploitée d'énergie. Elle est renouvelable et d'une faible teneur en soufre et en autres polluants. Son stockage est simple, peu onéreux entre la saison où elle est produite et le moment de son utilisation. Lorsque les combustibles d'origine fossile étaient abondants et bon marché, il n'y avait que peu d'émulation dans les développements des méthodes pour l'utilisation de cette réservoir d'énergie toute prête. Etant donné la pénurie actuelle et le prix élevé des combustibles traditionnels, les plantes constituent une source d'énergie qui mérite une attention sérieuse et immédiate.

L'énergie stockée dans la plante peut être libérée en desséchant la matière et en la faisant brûler aussitôt. On peut également utiliser d'autres méthodes afin d'obtenir des combustibles potentiels comme l'alcool éthylique, le méthane ou autres combustibles gazeux ou liquides. Toutefois les procédés servant à en tirer ces combustibles peuvent nécessiter de la matière végétale sous diverses formes. On ne traitera dans ce chapitre que de la quantité d'énergie concernée et des facteurs susceptibles d'influencer l'efficacité de la méthode d'obtention de l'énergie, et non des procédés d'extraction de l'éner-

gie ni de sa conversion sous forme utile. (La technologie de l'extraction de l'énergie par action microbienne sera, par contre, traitée dans le chapitre suivant.)

L'ENERGIE CONTENUE DANS LES PLANTES

Le tableau 1 donne la liste de nombreuses et diverses matières végétales et de leur potentiel d'énergie respectif compilée par Alich et Hinman, en 1974[1]. Tous les végétaux figurant sur la liste ont été dessechés à l'air ou au four à l'exception de la bagasse de canne à sucre humide. Basé sur leur poids à sec (c'est-à-dire sans humidité), ces végétaux contiennent une énergie moyenne de 4.800 kcal/kg. Naturellement, si on a besoin de la matière combustible pour le processus de récupération d'énergie, la teneur en eau de la matière végétale affectera l'énergie récupérée ; les decilles fraîches peuvent contenir jusqu'à 95 pour cent d'eau. Il est donc nécessaire au desséchage pour l'évaluation de la matière végétale comme source énergétique de combustion. Tous les calculs et estimations figurant dans ce rapport sont basés sur les poids à sec.

En 1973, Szego et Kemp[6] ont étudié la question de l'eau dans la conversion de la phytoénergie et employé 3.600 kcal/kg comme valeur moyenne

TABLEAU 1: Teneur en énergie (kcal/kg) de biomasse. (Tableau dressé d'après Alich et Hirman, 1974)[1]

	Partie de la plante	Pourcentage H_2O	Btu/lb	kcal/kg
Canne à sucre (*Saccharum officinarum*)[2]	Bagasse	12	7.281	3.860
Canne à sucre (*Saccharum officinarum*)[3]	Bagasse	52	4.000	2.220
Bambou (*Phyllostachys* spp.)[2]	Canne	10.5	7.398	3.925
Sarrasin (*Fagopyrum esculentum*)[2]	Cosses	10	7.594	4.030
Chamise (*Adenostoma fasiculatum*)[4]	Feuilles	0	9.750	5.160
Chamise (*Adenostoma fasiculatum*)[4]	Tiges	0	9.450	5.015
Noix de coco (*Cocos nucifera*)[2]	Coque	13	7.560	4.010
Hêtre (*Fagus* sp.)[2]	Bois	13	7.506	3.990
Bouleau (*Betula* sp.)[2]	Bois	12	7.578	4.015
Chêne (*Quercus* sp.)[2]	Bois	13	7.182	3.810
Chêne (*Quercus* sp.)[2]	Ecorce	7	8.139	4.310
Chêne (*Quercus* sp.)[3]	Ecorce	0	8.370	4.450
Pin (*Pinus* sp.)[2]	Bois	12	7.956	4.230
Pin (*Pinus* sp.)[3]	Ecorce	0	9.030	4.790
Sapin (*Abies* sp.)[3]	Ecorce	0	8.810	4.675
Sapinette (*Picea* sp.)[3]	Ecorce	0	8.740	4.640
Séquoia (*Sequoia sempervirens*)[3]	Ecorce	0	8.350	4.425
Graines oléagineuses[5]	Graines	–	9.000	4.775

d'énergie pour de nombreuses matières végétales desséchées à l'air (10 à 15 pour cent d'humidité) qui, en l'absence complète d'humidité, serait de 4.200 kcal/kg. On estime que 4.200 kcal/kg représentent une valeur raisonnable et prudente pour la matière végétale sèche.

ENERGIE PRODUITE PAR LES PLANTES

Les exemples de rendement annuel de la biomasse et les équivalents en énergie de la matière sèche à partir de plusieurs sortes de plantes pour la partie au-dessus du sol sont donnés au tableau 2 (adapté d'àpres le tableau 1). Les rendements donnés au tableau 2 laissent apparaître la variabilité à l'intérieur d'une même espèce et entre les différentes espèces. Ils ne sont pas destinés à indiquer le potentiel de rendement des espèces mais plutôt à servir d'exemples de rendements suivant les lieux et les divers types de gestion. On trouve d'autres exemples dans les numéros 2, 6, 7, 8 et 9. Il apparaît évident que l'énergie accumulée par les plantes hautement productrices est massive.

Nous ne disposons pas des données climatiques nécessaires pour nous permettre d'évaluer l'efficacité de récupération de l'énergie solaire représentée par les rendements figurant au tableau 2. Dans certaines conditions agricoles, toutefois, il existe assez de renseignements relatifs au climat et au rendement pour permettre ce calcul. Par exemple, un champ de maïs dans l'Etat de l'Iowa, ensemencé le premier mai et récolté le premier octobre, peut produire 180 hl/ha de grain battu (4.325 kg de poids à sec). Ceci représente une production élevée, mais peu déraisonnable, pour cet Etat. Sur pied, cette récolte aurait un poids égal de matière végétale autre que le grain, fournissant un total de 21.400 kg/ha de matière végétale sèche. Ceci représente un captage de 9×10^7 kcal/ha. Dans la période entre le premier mai et le premier octobre, un champ de maïs au centre de l'Iowa reçoit environ $7{,}4 \times 10^9$ kcal d'insolation par hectare. Ainsi, une récolte de 180 hl/ha a capté 1,2 pour cent de l'ensoleillement total qu'elle reçoit entre l'ensemencement et la récolte. Pourtant, lorsque le grain commençait à germer et que la plante était encore trop petite pour intercepter beaucoup de soleil, le captage de l'énergie solaire aurait été voisin de O. Le chiffre de captage de 1,2 pour cent représente donc la moyenne sur toute la durée de vie de cette récolte ensemencée annuellement. Le captage d'énergie serait supérieur, si on pouvait obtenir une couverture de feuilles au sol plus rapidement. Ceci pourrait être le cas pour les espèces qui repoussent à partir des racines laissées dans le sol après la moisson. Certaines espèces très productives comme la canne à sucre et le sorgho produisent des récoltes successives à partir des racines et, sous les climats tropicaux et subtropicaux où la récolte est possible d'un bout de l'année à l'autre, elles représentent des espèces très prometteuses pour le captage de l'énergie.

TABLEAU 2: Rendements de la biomasse sèche, provenant de la portion de la plante au-dessus du sol, et équivalents d'espèces ou complexes sélectionnés de plantes (adaption d'après Alich et Hinman, 1974)

Espèces	Lieu	(Tonnes metriques/ hectare-année*)	(10^7kcal/ hectare/année*)
Plantes annuelles			
Tournesol et artichauts de Jérusalem	Russie	30,0	12,6
Tournesol hybrides (graines seulement)	Californie	3,4	1,4
Sorgho exotique	Porto Rico	68,7	29
Sorgho fourrage (irrigué)	Nouveau-Mexique	22	9
Sorgho fourrage (irrigué)	Kansas	27	11
Sorgho sucre	Mississippi	20	8
Céréales exotiques (saison de 137 jours)	Caroline du Nord	17	7
Céréales mises en silo	Géorgie	16	7
Céréales hybrides	Mississippi	13	6
Kenaf chanvre d'eau	Floride	45	19
Kenaf chanvre d'eau	Géorgie	18	7
Plantes vivaces			
Jacinthes d'eau	Floride	36	15
Canne à sucre	Mississippi	45	19
Canne à sucre (moyenne dans l'Etat)	Floride	39,3	16,3
Canne à sucre (au mieux)	Texas (sud)	112	47
Canne à sucre (moyenne en 10 ans)	Hawaii	58	24
Canne à sucre (moyenne en 5 ans)	Louisiane	28,1	11,7
Canne à sucre (moyenne en 5 ans)	Porto Rico	34,3	14,3
Canne à sucre (moyenne en 6 ans)	Philippines	27,2	11,3
Canne à sucre (expérimental)	Californie	72	30
Canne à sucre (expérimental)	Californie	68,5	28,5
Herbe du Soudan	Californie	36	15
Luzerne (surface irriguée)	Nouveau-Mexique	15	6,1
Luzerne	Nouveau-Mexique	18	7
Bambou	Asie Sud-Est	11	5
Bambou (pousses de 4 ans)	Alabama	16	7
Abies saccharinensis (espèces dominantes) et autres espèces	Japon	13	6
Cinnamomum camphora (espèces dominantes) et autres espèces	Japon	15	6,3

Fagus sylvatica	Suisse	9,7	4,0
Larix decidua (espèces dominantes) et autre espèces	Suisse	4,9	2,1
Picea abies (espèces dominantes) et autres espèces	Japon	12	5,1
Picea omorika (espèces dominantes) et autres espèces	Japon	14	6,0
Picea densiflora (espèces dominantes) et autres espèces	Japon	14	5,7
Castanopsis japinica (espèces dominantes) et autres espèces	Japon	19	7,7
Betula maximowicziniama (espèces dominantes) et autres espèces	Japon	7	3
Populus davidiand (espèces dominantes) et autres espèces	Japon	12	5,1
Peuplier hybride (rotation courte)			
culture à partir de pousses (lère année)	Pennsylvanie	9	4
culture à partir de souches (lère année)	Pennsylvanie	18	7
culture à partir de souches (2e année)	Pennsylvanie	18	7
culture à partir de souches (3e année)	Pennsylvanie	20	8,1
Sycomore américain (courte rotation)			
Pousses (2ème année)	Géorgie	4,9	2,1
Pousses (2ème année)	Géorgie	9,2	3,8
Bois taillis (2ème année)	Géorgie	8,3	3,5
Peuplier du Canada (2ème année)	Washington	10	4,2
Aune (1 à 14 and)*	Washington	22	9,3
Peuplier de l'est des EU (8 ans)			
Eucalyptus sp.	Californie	30,1	12,5
Eycalyptus sp.	Californie	45,1	18,8
Eucalyptus sp.	Espagne	20	8,3
Eucalyptus sp.	Inde	39,1	16,2
Eycalyptus sp.	Ethiopie	48,1	16,9
Eucalyptus sp.	Kénya	20	8,1
Eucalyptus sp.	Afrique du Sud	28,1	11,7
Eucalyptus sp.	Portugal	40,2	16,7
Divers			
Algues (culture en mares d'eau douce)	Californie	88	36
Complexe de forêt tropicale (moyenne)		41,2	17,1
Complexe de forêts subtropicales à feuillage caduc (moyenne)		24,5	10,2
Complexe de puckerbrush (moyenne)	Caroline du Nord	4,9	2,1
Complexes de puckerbrush (moyenne)	Maine	9,9	4,1
Océans (productivité primaire)		13	6

*Estimation 4.200 kcal/kg

Digitized by Google

La croissance journalière d'une culture de maïs 180-hl/ha dans l'Etat de l'Iowa atteint en moyenne 14 g/m^2 par jour au cours de la saison. Dans ces conditions favorables, on a observé des taux de croissance de 15 à 25 g de matière sèches par m^2 par jour pour un certain nombre de cultures,[1,7,8,9] et dans des conditions idéales, le sorgho, le maïs, la canne à sucre et le millet ont produit 50 g de matière sèche par m^2 et par jour pendant une grande partie de la saison de croissance. Ce dernier taux de production représente une récupération d'environ 3 pour cent du rayonnement solaire.

On ne peut s'attendre à conserver un taux de récupération de 3 pour cent pendant de longues périodes, bien que certains lieux fertiles, sous des conditions idéales, peuvent permettre d'approcher cette valeur sur une base continue. Dans la plupart des cas, toutefois, et dans des lieux productifs et bien organisés, on pourrait sans doute maintenir des taux de production équivalents à la récupération de 1 pour cent du rayonnement solaire incident au cours de la saison de croissance des cultures. Ainsi, la récupération de 1 pour cent d'énergie solaire incidente au cours de la saison de croissance de la récolte pourrait servir à estimer la production potentielle d'énergie pouvant être obtenue d'un système végétal utilisé comme collecteur solaire. Il est évident que dans les pays de climat tempéré, il n'y aurait de production que dans la période des mois chauds, alors que dans les pays tropicaux et subtropicaux fertiles, elle pourrait être continue.

SOURCE DE MATIERE VEGETALE

Il est possible de trouver dans l'un des trois projets de culture certaines plantes utiles en tant que sources d'énergie. Tout d'abord, la forme la moins complexe consisterait à utiliser les déchets de récoltes sur les terrains destinés à la culture de plantes alimentaires*. Seule une partie de la portion de la plante se trouvant au-dessus du sol est destinée à la nourriture (comme on l'a indiqué précédemment, pour certaines céréales seule la moitié du poids sec au-dessus du sol se trouve dans les grains). L'énergie contenue dans les chaumes est, en général, perdue. Même en ce qui concerne les plantes destinées à la nourriture du bétail, la plus grande partie de l'énergie se trouve dans les déchets organiques des animaux. Les déchets des cultures et ceux provenant des animaux constituent donc de potentielles sources d'énergie pour l'homme.

La deuxième source de matière végétale susceptible d'être utilisée dans un projet de récupération d'énergie est la végétation des terres incultes. La plu-

*Bien qu'il soit peu probable d'en trouver dans les régions rurales des pays en voie de développement, les pacages pourraient constituer des sources de résidus pouvant appartenir à cette catégorie.

part de ces terres restent en friche à juste raison à cause de leur faible productivité, de leur dureté ou de leur humidité excessives ou bien de leur trop faible rendement. Elles peuvent donc présenter un problème sérieux pour le ramassage d'une grosse quantité de matière végétale. Néanmoins, une grande partie de terres en friche pourrait représenter de temps à autre une source de récoltes de plantes destinées à la génération d'énergie.

La troisième possiblité consisterait dans la culture de plantes spéciales destinées à fournir des sources d'énergie—ce qu'on appelle les fermes d'énergie—qui permettrait l'utilisation d'espèces de plantes à croissance rapide, sans tenir compte des sévères exigences de qualité qui souvent limitent le rendement des récoltes des plantes destinées à l'alimentation ou à l'industrie textile. L'utilisation du sol en vue de cultures destinées à la fourniture d'énergie ferait concurrence, toutefois, à l'utilisation qu'on pourrait en faire pour la culture de récoltes nutritives. Ceci peut constituer un handicap sérieux pour l'installation des fermes productrices d'énergie, et il incombe à la communauté intéressée de décider de la destination à donner aux terres. Nous allons dès maintenant étudier les divers facteurs qui peuvent influencer la productivité des plantes, quel que soit le lieu où on les cultive.

PRODUCTION D'ENERGIE

De nombreux facteurs influencent la production d'énergie par les plantes. Ceux-ci comprennent le climat, la morphologie (ou couche herbeuse couvrant le sol), l'ensoleillement, la disponibilité de matières nutritives, la condition du sol et l'efficacité de la réaction photosynthétique.

Climat

Le climat d'une région exerce une grande influence sur la possibilité d'utilisation des plantes comme source d'énergie. Dans de nombreux pays en voie de développement, la rareté des précipitations paralyse la croissance végétale. Les pays secs n'ont qu'une capacité de production limitée de plantes utilisables comme sources d'énergie. De plus, les récoltes qui pourvoient traditionnellement à l'alimentation sous les climats secs ne fournissent que peu de déchets et le potentiel pour une source d'énergie à partir des plantes est pratiquement nul.

Les climats tempérés, avec leurs variations saisonnières, n'imposent pas de limites sérieuses à la production à un point tel qu'il paraisse peu raisonnable de considérer les plantes comme une source d'énergie ; mais le fait que, dans les climats tempérés, les cultures sont saisonnières, impose une contrainte. Cette limitation est pourtant compensée dans certains cas par le fait que les

zones situées à haute latitude bénéficient de journées longues en été, et la production végétale quotidienne par unité de surface peut être élevée.

Sous les tropiques, il existe un potentiel de taux de production constant tout au long de l'année ; c'est pourquoi les plans de récupération d'énergie pourraient être ininterrompus, en utilisant la matière végétale continuellement sous une même forme. Malgré cela, il est probable que la répartition des précipitations locales puisse imposer certaines limites quant au choix des espèces végétales qu'on pourrait employer comme source d'énergie à diverses époques de l'année. Il importe donc d'assortir l'espèce des plantes aux conditions climatiques des localités considérées afin d'assurer l'approvisionnement continu en plantes utilisables comme source d'énergie.

Recouvrement végétal du sol et Morphologie

Si l'on met à part les considérations évidentes de climat et de sol, une des premières conditions à obtenir avant de pouvoir récolter une production importante est de s'assurer qu'un pourcentage d'ensoleillement suffisant pourra être absorbé par les parties vertes des plantes. Il faut pour cela considérer plusieurs aspects. Tout d'aboud, les moissons qui ne laissent qu'un terrain dénudé doivent être suivies d'une repousse rapide. En général, les plantes provenant de semis sont lentes à assurer un recouvrement convenable du sol, si on les compare à celles qui repoussent à partir d'un système de racines déjà existantes. Les espèces vivaces ou celles qui repoussent après la moisson à plusieurs reprises, semblent posséder un net avantage sur les espèces qu'on doit ensemencer. Ainsi, afin d'obtenir la production optimum, il importe de choisir l'espèce avec soin. De nombreuses espèces possédant un potentiel de repousse et un système photosynthétique C_4 très élevé (voir ci-dessous) sont adaptées au climat des tropiques humides.

La forme des feuilles et leur orientation par rapport au soleil sont importantes, lorsqu'il s'agit de déterminer le potentiel de productivité d'une espèce. Non seulement on peut choisir entre divers génotypes, mais il existe aussi la possibilité de cultiver des types morphologiques particuliers afin de tirer le maximum d'avantages du rayonnement solaire. De cette façon, en ce qui concerne la morphologie de la plante, il existe des possibilités à long et à court terme.

Insolation

La productivité d'une plante sur une base quotidienne est étroitement liée à son ensoleillement journalier total[10]. Les longues journées dans les climats tempérés ou les jours sans nuages dans les régions tropiques semi-arides présentent des possibilités uniques en matière de production journalière par unité

de surface du sol. Il est essentiel de se renseigner sur l'ensoleillement local lors de l'estimation du potentiel de productivité de cette zone.

Eléments Nutritifs

Les plantes en tant qu'entités biologiques nécessitent de grosses quantités de potassium, de phosphore et en particulier d'hydrogène. Afin de minimiser les besoins en engrais supplémentaires, on recherche au maximum des systèmes qui recyclent autant que possible ces éléments ; en particulier, qui renvoient vers le sol les résidus de la digestion anaérobique ou les cendres provenant de la combustion. Lorsque le recyclage est difficile, il importe que les pays en voie de développement disposent d'un système économique leur permettant soit la fabrication, soit l'importation d'engrais contenant ces éléments, afin de maintenir un niveau de productivité végétale élevé. Ce problème s'aggravera dans les zones de pluies abondantes dans lesquelles le ruissellement de l'eau prive le sol de ces éléments.

Il n'est possible d'atteindre un taux de productivité élevé que si le sol est bien travaillé, retient bien l'eau, et s'il est exempt de substances toxiques. En général, tous les sols répondant à ces critères ont déjà été découverts et sont déjà utilisés pour l'agriculture. Toutefois, certains terrains possédant ces qualités ne sont pas utilisés pour l'agriculture, parce qu'ils sont virtuellement innaccessibles ou difficiles à cultiver, étant donné, par exemple, leur trop forte pente ou leur trop grande humidité. Ces zones ne présentent guère d'intérêt pour des cultures destinées à la production d'énergie, pour les mêmes raisons qui en ont écarté les activités agricoles. Il est donc probable que les fermes d'énergie concurrenceront les fermes destinées à l'alimentation. Les besoins en alimentation peuvent prévaloir sur l'utilisation de ces terrains comme sources d'énergie, et l'utilisation des déchets des cultures et des résidus organiques des animaux peut être le seul moyen pratique d'utiliser les terrains de fermes en tant que source d'énergie de remplacement.

Efficacité de la Photosynthèse

Au cours des dernières années on a découvert que les plantes utilisent trois systèmes biochimiques différents pour convertir la lumière du soleil en énergie chimique[11]. Toutes les espèces de plantes développées emploient un système biochimique pour capter la lumière par la chlorophylle et pour transférer cette énergie au sein de composés chimiques stables. Dans certaines espèces toutefois, le CO_2 est forcé de former un composé tri-carbonique et le système biochimique dans lequel cela se produit s'appelle maintenant le système C_3 de photosynthèse.

D'autres espèces particulièrement bien adaptées aux températures élevées fixent le CO_2 à la lumière pour former un composé quadri-carbonique et sont appelées plantes C_4. Les espèces possédant le système C_4 ont un taux de fixation du CO_2 très élevé et supportent plus facilement les hautes températures que les plantes à C_3. Elles se compotent toutefois mal aux basses températures.

Certaines espèces originaires des régions désertiques possèdent un troisième système de fixation du CO_2 durant la nuit ; il est appelé système de métabolisme acide crassulacéen (MAC), étant donné sa découverte et son étude sur les *crassulaceae*. L'avantage de ce système réside en ce que les plantes MAC peuvent fermer leurs stomates durant les périodes de température et d'insolation élevées, ce qui réduit notablement leur déperdition en eau. Elles sont donc particulièrement bien adaptées aux climats arides. Le système nécessite une grande possibilité d'emmagasinage d'acide et toutes les plantes MAC possèdent des organes photosynthétiques charnus et volumineux. Malheureusement, la plupart des espèces MAC poussent très lentement et leur utilisation dans un programme de récupération d'énergie ne pourrait résulter que de récoltes peu fréquentes. Le tableau 3 énumère quelques espèces de C_3, C_4 et MAC. Le tableau 4 donne la liste de certaines conditions générales d'environnement et le type de plante le plus susceptible de fournir la productivité maximum dans des conditions données. Il est utile de comprendre le système

TABLEAU 3: Liste de quelques espèces courantes C_3, C_4 et MAC

Plantes typiques C_3	Plantes typiques C_4	Plantes typiques MAC
Avena sativa L. (avoine)	*Sorghum vulgare* pers. (sorgho)	*Agave americana* L. (agave d'amérique)
Oryza sativa L. (riz)	*Panicum miliaceum* L. (millet)	*Ananas comosus* Merr. (ananas)
Hordeum vulgare L. (orge)	*Saccharum officinarum* L. (canne à sucre)	*Aloe* (espèce)
Triticum aestivum L. (blé)	*Zea Mays* (maïs)	*Cactaceae* (espèce)
Gossypium hirsutum L. (coton)	*Amaranthus retroflexus* L. (herbe à cochon)	
Medicago sativa L. (luzerne)	*Cynodon dactylon* (l.) pers. (herbes de vergers)	
Glycine max (L.) merr. (soja)	*Digitaria sanguinalis* (L.) (chiendent)	
Arachis hypogeae L. (arachide)		
Helianthus annuus L. (tournesol)		
Dactylis glomerata L. (dactyle pelotonné)		

TABLEAU 4: Conditions générales d'environnement qui favorisent la croissance de certains types de plantes

Conditions générales d'environnement	Type de plantes qui bénéficie le mieux de ces conditions
Grande intensité de lumière et hautes températures de nuit et de jour	C_4
Basses températures diurnes (25°C)	C_3
Haute à moyenne intensité de lumière, basses températures nocturnes (20°C)	MAC
Grande intensité de lumière et haute température, basse fertilité des terres	C_4
Précipitations faibles ou intermittentes	MAC
Précipitation annuelle faible mais haute intensité de lumière et haute température saisonnières	C_4

photosynthétique d'une espèce de plante, lorsqu'il s'agit de savoir si elle peut être adaptée à une situation de culture particulière. Dans certains cas, les programmes de production d'énergie peuvent requérir l'importation de certaines espèces non indigènes convenant à certaines conditions écologiques. Il n'existe guère qu'un petit nombre de plantes dans le monde qui aient été définies en fonction de leur système photosynthétique, et il importe de travailler à la caractérisation des plantes.

MULTIPLICITE DES RECOLTES ET ROTATION DES CULTURES

Etant donné les différences de réactions à la lumière, aux températures, et à la sécheresse entre espèces, la production annuelle maximum sous certains climats pourra être obtenue à la suite de combinaisons d'espèces assemblées pour s'adapter aux différences saisonnières. Toutefois, la mise en culture multiple présente le problème de réduire les périodes de faible productivité inévitables entre la récolte d'une culture et le développement adéquat de la feuillaison de la culture suivante. Le développement le plus rapide d'une nouvelle couche verte après la récolte se présente comme un des critères essentiels pour définir la séquence optimum des cultures destinées à la production d'énergie dans une région particulière.

Même dans les zones tempérées, où l'on ne cultive souvent qu'une récolte par an, il serait possible d'intercaler une culture destinée à la production d'énergie pendant des périodes où le terrain est inutilisé. Dans le Minnesota, par exemple, il est possible de semer à la fin de l'automne du seigle d'hiver et

d'en obtenir une récolte précoce de printemps comme réserve végétale productrice d'énergie dans les fermes où le maïs sera ensemencé en mai. Le seigle germe en automne et développe une feuillaison qui se maintient jusqu'au printemps. Le seigle d'hiver pousse rapidement aux températures fraîches du printemps et on peut espérer une récolte de 7 tonnes métriques à l'hectare, ou plus, de matière sèche, avant que le terrain soit ensemencé en maïs. Le seigle n'a que peu de valeur comme fourrage, et ne fournit pas de grains, mais il possède de l'énergie qui, on le présume, pourrait être récupérée. Ainsi, une culture destinée à l'énergie permettrait l'utilisation, pendant une partie de la morte-saison, des 6 millions d'acres sur lesquelles on sème le maïs tous les ans dans le Minnesota. Une autre possibilité pour l'agriculture au Minnesota consisterait à utiliser du terrain pour une culture productrice d'énergie après les récoltes de l'avoine, de l'orge et du blé, fin juillet. Des millions d'acres restent inexploités au Minnesota en août et septembre quand la moisson des petites céréales est terminée.

Ces exemples, concernant une zone où existe une forte tradition selon laquelle une courte période de croissance permet seulement une récolte unique, montrent l'adaptabilité des cultures productrices d'énergie (à la condition que la génération d'énergie soit le critère principal et que la qualité ou la forme du produit soit sans importance). Il est très probable que des zones saisonnières similaires soient découvertes et puissent être utilisées dans la plupart des systèmes d'agriculture.

En outre, puisque des espèces de plantes individuelles demandent souvent des conditions spéciales de surface et d'environnement, deux espèces productives sélectionnées avec soin et cultivées simultanément non seulement n'interfèrent pas l'une avec l'autre, mais peuvent donner de meilleurs rendements à partir d'une terre commune que d'autres espèces cultivées séparément[12]. Ceci est particulièrement vrai dans des situations moins intensivement organisées[13,14,15]. Relativement peu d'expériences ont été tentées sur la rotation des récoltes, mais c'est une pratique qui mériterait d'être approfondie. Elle fait partie de la tentative d'utilisation des plantes pour capter l'énergie solaire.

TECHNOLOGIE DE LA PRODUCTION DE PLANTES

La production de la biomasse de base nécessaire pour capter l'énergie implique de nombreuses techniques semblables à celles de la production de plantes, ainsi que de nombreux problèmes pareils à ceux que connaît l'agriculture d'aujourd'hui en général.

Coût

Les dépenses encourues pour produire la biomasse nécessaire pour capter l'énergie solaire seront approximativement les mêmes que celles de la production des cultures. On doit ajouter à cela les frais de transport des plantes à l'emplacement du générateur d'énergie et la manutention du matériau végétal pendant la conversion. Ces frais dépendront dans une certaine mesure du schéma de conversion choisi pour récupérer l'énergie à partir du matériau végétal.

Un grand rendement d'énergie à l'acre peut bien souvent dépendre de la disponibilité d'une ample source d'engrais. Ceci représentera toujours des frais directs pour la production d'énergie. On peut faire quelques économies en recyclant les résidus des installations de récupération d'énergie. Cependant, les problèmes de distribution et les fluctuations dans la production d'engrais (la récente pénurie mondiale d'engrais en témoigne) peuvent présenter de sérieuses difficultés d'approvisionnement et de devises qui risquent de limiter la production agricole d'énergie dans certains pays. Pourtant, les résidus agricoles disponibles à eux seuls présentent une source intéressante d'énergie potentielle dans la plupart des climats humides.

Un autre "prix à payer" important qu'il faut considérer est que les cultures destinées à la production d'énergie, ou fermes d'énergie, doivent concurrencer directement la production de denrées alimentaires dans l'obtention des terres et des engrais. Les besoins en denrées alimentaires peuvent limiter l'utilisation de terres de choix pour les fermes d'énergie. Peut-être que les déchets des cultures et des récoltes irrégulières provenant de terres incultes peuvent être les seules sources pratiques des végétaux destinés aux réserves de matériaux d'énergie. Ces matériaux seront souvent mis à la disposition des municipalités sans autres frais que ceux du ramassage et de la manutention.

Fiabilité

Les connaissances et l'expérience nécessaires à la culture des plantes se trouvent dans tous les pays. Il est possible que des conseillers envoyés sur place réussissent à augmenter l'efficacité du processus de production, mais la fiabilité a été établie, au cours des siècles, pour presque tous les environnements locaux. En général, la fiabilité dépendra plus de l'approvisionnement en eau que de tout autre facteur.

Réalisation Locale

Les travaux relatifs à la culture, à la moisson et au ramassage du matériau végétal et même ceux des recherches à court terme nécessaires peuvent être

faits localement à l'aide de la technologie locale (à l'exception, peut-être, de la fourniture d'engrais chimiques dans des cas où ils seront nécessaires). Le choix des méthodes de gestion et celui des espèces de plantes à utiliser dans les systèmes de récupération d'énergie demanderont probablement, au début, l'assistance de consultants bien entraînés, sans oublier les besoins en personnel qui se feront sentir plus tard en relation avec les installations de conversion d'énergie.

RECHERCHES ET REALISATIONS

Les plans d'ingénierie pour récupérer l'énergie à partir du matériau végétal n'ont pas encore été précisés. Quand cela sera fait et qu'une forme acceptable de matière végétale aura été établie, les limites générales des schémas de production pourront être également établies et les terrains locaux pourront être classés suivant leur acceptabilité en vue de la production d'énergie. Des facteurs tels que la distance entre eux et l'usine de traitement, le fait de savoir s'ils conviennent à divers projets de cultures et la décision d'utiliser la terre pour les besoins alimentaires ou pour récupérer l'énergie solaire seront à considérer. Un personnel spécialisé sera probablement nécessaire pour conseiller les habitants.

Des recherches faites sur place seront nécessaires pour déterminer les espèces de plantes à utiliser et la manière de les cultiver. Des espèces étrangères au pays seront peut-être requises pour maintenir un rendement élevé. Des conseillers agronomes suggéreront des plantes particulièrement aptes à capter l'énergie. Les gens du pays pourront être formés comme assistants techniques. Des aspects importants de cette recherche comprendront l'usage efficace d'engrais et l'analyse de l'énergie consommée au cours de la culture, de la moisson, du desséchage et de la manutention, en comparaison de la production d'énergie.

POTENTIEL DES TERRES INCULTES

De nombreuses communes ou régions possèdent des terres qui ne sont pas actuellement mises en culture, mais qui pourraient être destinées à la production d'énergie. Les garrigues, les marécages et les terrains trop en pente ou trop arides pour l'agriculture peuvent permettre la culture de plantes utilisables pour les programmes de récupération de l'énergie. Certains de ces endroits, par exemple, les terrains marécageux, peuvent être très productifs. D'autres peuvent permettre de temps à autre la moisson d'une culture destinée à la production d'énergie. Chaque communauté devrait mener une

enquête pour recenser ces types de terrains, afin d'évaluer le potentiel des sources locales d'énergie. Il faudrait intéresser un personnel spécialement formé à ces recherches locales. Il faut apporter un grand soin dans l'utilisation de ces terrains pour éviter de possibles dommages écologiques à long terme. Certaines expériences locales pourraient être requises pour déterminer les effets de récoltes de plantes effectuées sur les terres en friche.

ECHELONNEMENT DES RESULTATS DANS L'AVENIR

L'établissement des programmes de culture pour la production d'énergie comporte quatre types de recherches. Tout d'abord, un manuel d'instruction détaillé doit préciser les principes nécessaires pour maintenir des systèmes de production élevée. Une documentation courante contient les renseignements voulus et l'ouvrage pourrait être réalisé dans les six mois qui suivent la commande. Les principes dont il a été question dans le présent rapport doivent s'y trouver de même que les directives pour mener l'expérimentation en campagne, l'évaluation des divers types de plantes présents et de leur abondance, et l'évaluation des résultats. Sur place, ce manuel peut s'avérer utile aux conseillers agronomes (qui, peut-être, sont familiarisés seulement avec les espèces de plantes destinées à l'alimentation, mais ne devraient pas se désintéresser des autres espèces) et au personnel technique qui participe aux recherches.

Le second type de recherche concerne l'inventaire des ressources locales, y compris les déchets des récoltes et les moissons éventuelles sur les terrains en friche. Ce genre d'inventaire ne devrait pas prendre plus de quinze jours à chaque communauté. Il nécessitera des agronomes compétents, à la fois bons botanistes et écologistes, ou bien de petites équipes mobiles polyvalentes.

Le troisième type recouvre la recherche locale ou régionale sur les programmes de culture. Cela prendra un minimum de deux ans et jusqu'à cinq ans pour le mener à bien. Il comprendra certains facteurs tels que l'identification des meilleures espèces, le choix des combinaisons pour les programmes de cultures multiples, le développement des programmes de gestion en vue d'une production maximum et l'emploi efficace des engrais, enfin la décision concernant des combinaisons de cultures destinées à l'énergie et de celles destinées à l'alimentation. Il n'est toutefois pas nécessaire d'attendre son achèvement pour commencer à utiliser la matière végétale disponible sur place dans de nombreuses communautés.

Le quatrième type de recherche porte sur les questions agronomiques à long terme et certains problèmes tels que la gestion écologique des terres en friche. Il reste toutefois à définir la gestion des zones de faible fertilité pour les cultures destinées au captage de l'énergie, l'adaptation d'importants développements technologiques et les questions à long terme traitant du déve-

loppement du potentiel d'irrigation. Il est peu probable que ces résultats soient obtenus avant 10 ans au moins.

La recherche fondamentale sur laquelle reposent les diverses applications suggérées ne peut être dissociée des plans pour la récupération de l'énergie provenant de matières végétales : elle devrait donc faire agir des ingénieurs agronomes et des agronomes conscients des problèmes d'écologie. Des groupes appropriés de recherche pourraient être constitués à partir d'un personnel spécialisé dans les recherches agricoles détaché de certaines universités et instituts. Ces recherches pourraient être subventionnées indépendamment par des fondations ou par des gouvernements. L'identification des groupements intéressés par ces questions constituera une difficulté. Le fait d'annoncer que l'on dispose de subventions accordées par des fondations, par des gouvernements ou par des organisations internationales, sur la base de contrats ou de dons, devrait susciter l'intérêt de groupements qualifiés.

REFERENCES

1. Ahlich, J. A., Jr., and Hinman, Robert E. 1974. *Effective utilization of solar energy to produce clean fuel*. Report to the National Science Foundation. Menlo Park, California: Stanford Research Institute.
2. Hodgman, C. D., ed. 1945. *Handbook of chemistry and physics*. 29th ed. Cleveland, Ohio: The Chemical Rubber Publishing Co.
3. *Steam: its generation and use*. 1963. New York: Babcock and Wilcox Co.
4. Rothermel, R. C., and Philpot, C. W. 1973. Predicting changes in chaparral flammability. *Journal of Forestry* 71(10):640-643.
5. Loomis, R. S. *et al.* 1971. Agricultural productivity. *Annual Review of Plant Physiology* 22:431-468.
6. Szego, G. C., and Kemp, C. C. 1973. Energy forests and fuel plantations. *Chemical Technology* (May): 275-284.
7. Loomis, R. S., and Williams, W. A. 1963. Maximum crop productivity: an estimate. *Crop Science* 3:67-72.
8. deWit, C. T. 1959. Potential photosynthesis of crop surfaces. Reprint. Wageningen, Holland: Institute of Biological and Chemical Research on Field Crops and Herbage.
9. Zelitch, I. 1971. *Photosynthesis, photorespiration and plant productivity*. New York: Academic Press.
10. Moss, D. N.; Musgrave, R. B.; and Lemon, E. R. 1961. Photosynthesis under field conditions. III. Some effects of light, carbon dioxide, temperature, and soil moisture on photosynthesis, respiration and transpiration of corn. *Crop Science* 1:83-87.
11. Hatch, M. D. 1971. Mechanism and function of the C_4 pathway of photosynthesis. In *Photosynthesis and photorespiration*, Hatch et al., eds., pp. 139-152. New York: Wiley-Interscience.
12. Sprague, H. B. 1936. *Bulletin. New Jersey. Agricultural Experiment Station* 609:1.
13. Andrews, D. J. 1972. Intercropping with sorghum in Nigeria. *Experimental Agriculture*, London 8:139-150.

14. Multiple cropping. 1974. In *IRRI 1974: annual report for 1973*, pp. 15-34. Los Baños, Philippines: IRRI (International Rice Research Institute).
15. Kelly, Isabel T., and Palerm, Angel. 1952. *Tajin Totonac: history, subsistence, shelter and technology*. Institute of Social Anthropology, Publication No. 13, pp. 99-149. Washington, D.C.: Smithsonian Institution.

LECTURES SUGGEREES :

Begg, J. E. 1965. High photosynthetic efficiency in a low-latitude environment. *Nature* 105:1025-1026.

———, and Jarvis, P. G. 1968. Photosynthesis in Townsville lucerne (*Stylosanthes humilis*). *Agricultural Meteorology*, Amsterdam 5:91-109.

Black, C. C.; Chen, T. M.; and Brown, R. H. 1969. Biochemical basis for plant competition. *Weed Science* 17(3):338-344.

Bonner, J. 1962. The upper limit of crop yield. *Science* 137:11-15.

Chandler, R. F., Jr. 1969. Plant morphology and stand geometry in relation to nitrogen. In *Physiological aspects of crop yield*, J. D. Eastin *et al.*, eds., pp. 265-285. Madison, Wisconsin: American Society of Agronomy (ASA) and Crop Science Society of America (CSSA).

Field crops. 1974. Washington, D.C.: U.S. Department of Agriculture, Crop Reporting Board, Statistical Reporting Service.

Heichel, G. H. 1973. Comparative efficiency of energy use in crop production. *Bulletin of the Connecticut Agricultural Experiment Station*, New Haven, Connecticut 739:1-26.

Pimentel, David *et al.* 1973. Food production and the energy crisis. *Science* 182:443-449.

Monteith, J. L. 1965. Light distribution and photosynthesis in field crops. *Annals of Botany New Series*, London 29:(113)17-38.

Moss, D. N. 1965. Capture of radiant energy by plants. *Meteorological Monographs* 6:90-108.

———. 1967. Solar energy in photosynthesis. *Solar Energy* 11:173-179.

Westlake, D. F. 1963. Comparison of plant productivity. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society* 38:385-425.

Conversion microbiologique de matières végétales en carburants liquides

L'approche microbiologique pour l'identification des sources d'énergie de remplacement se divise en deux catégories, les systèmes de production de carburants gazeux et de carburants liquides. En général, l'une ou l'autre utilisent la prolifération de microbes anaérobies. La production du gaz carburant méthane par "digestion anaérobie" classique, le plus connu des traitements par anaérobie, fait l'objet d'une étude séparée et concourante ; elle ne sera pas traitée ici[1]. Le présent chapitre a pour objet la production microbiologique d'autres carburants gazeux et liquides ; plus particulièrement, la production par l'action microbienne des carburants et systèmes de carburants ci-après :

- éthanol ;
- acétone/butanol + hydrogène ;
- butanol/isopropanol + hydrogène ; et
- acétone/éthanol + hydrogène.

De plus, la matière première servant à la production de ces systèmes de carburants, ainsi que la technologie actuelle et les conditions requises pour le transfert de cette technologie dans les pays en voie de développement, feront l'objet d'une discussion.

TECHNOLOGIE DE TRAITEMENT TYPE

Dans le passé, à peu près tous les produits chimiques susceptibles de constituer des sources d'énergie ont été produits microbiologiquement à l'échelle

commerciale. La plupart de ces matières ont été produites au cours des années critiques 1940, alors que les nations, de part et d'autre pendant la Deuxième Guerre mondiale, recherchaient des sources supplémentaires de carburant et, à une échelle plus réduite, au début des années 50.

Du point de vue du traitement chimique, les méthodes de production microbiologiques des diverses combinaisons de carburants figurant plus haut se ressemblent beaucoup. Toutefois, puisque la production industrielle actuelle repose sur la synthèse à partir de sources pétrochimiques, à l'exception de l'éthanol, aucun de ces produits chimiques n'est produit commercialement à l'heure actuelle par traitement microbiologique. (Un schéma de circuit type, qui, dans ce cas, représente la production d'un mélange d'acétone, d'éthanol et de butanol, avec de petites quantités d'éthanol et d'hydrogène, est représenté à la Figure 56.)

Le choix convenable de la matière première (substrat) est essentiel du point de vue de la viabilité économique pour tous les traitements microbiologiques. L'exemple de la Figure 56 est basé sur l'emploi de mélasses comme matière première, mais nous envisagerons également d'autres sortes de matières premières, quand nous considérerons les possibilités de transfert de cette technologie dans les pays en voie de développement.

En ce qui concerne le traitement industriel pour la production de solvant par l'action microbienne, la procédure générale demande le développement en phases successives de l'ensemencement à fournir au contenant de fermentation en fin de production. La préparation de l'ensemencement est représentée dans la partie supérieure gauche de la Figure 56 ; on produit les quantités nécessaires de cultures microbiennes voulues en commençant par des quantités de la valeur d'une éprouvette et en continuant par des récipients de cultures de plus en plus grands.

Les contenants pour la phase finale de la fermentation dans la production des produits chimiques varient de volume ; dans cet exemple, ils atteignent 227 à 1.900 m^3. A mesure que les substances nutritives soumises aux agents de fermentation devant assurer la production de carburants subissent une transformation, le milieu doit être stérilisé de façon à éliminer les organismes indésirables ou susceptibles de gêner les transformations. Il importe également de définir les besoins en substances nutritives des micro-organismes.

La conversion des matières premières (carbone, nitrogène, sels etc.) en biomasse microbienne a lieu dans le contenant de fermentation. Les organismes agissent ici comme des "bio-catalyseurs" qui peuvent, en général, en l'absence d'oxygène (c'est-à-dire par anaérobie) produire les produits voulus pendant le processus de conversion. Il faut une agitation suffisante afin de garder l'homogénéité à la suspension, ainsi que pour faciliter le transport des substances nutritives aux micro-organismes et la séparation des produits résiduels et métaboliques d'avec les micro-organismes. De plus, comme en géné-

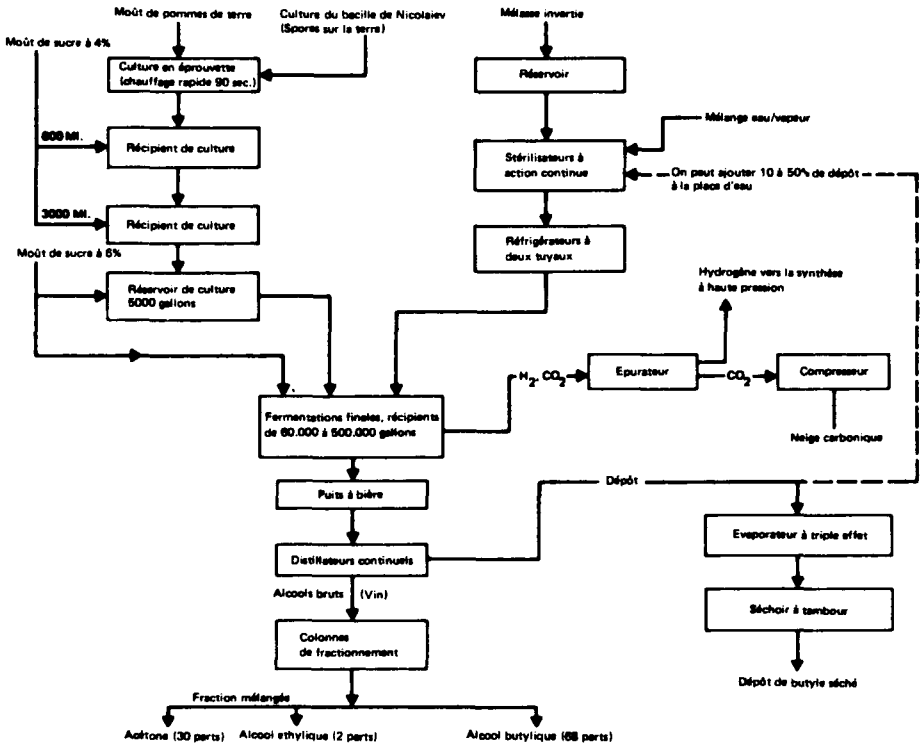


FIGURE 56 Schéma du circuit typique moderne de fermentation à partir des produits du sucre. [Source: Beesch, Réf. 2. Reproduit avec la permission de *Industrial and Engineering Chemistry*. Droits de reproduction réservés par l'American Chemical Society.]

ral, dans ces traitements, la réaction est exothermique, la chaleur libérée doit être éliminée par convection. La croissance des micro-organismes et la production subséquente de produits chimiques se produit en général par fournées ; la durée type pour l'exécution de cette phase du processus est comprise entre 40 et 60 heures.

Les produits principaux issus de l'exemple ci-dessus sont l'acétone, l'éthanol et le butanol. Ces matériaux sont produits de façon extracellulaire et sont récupérés à partir du mélange réactif par distillation ordinaire. De plus, il existe de nombreux sous-produits qui présentent une valeur potentielle. Par exemple, de la fermentation naissent deux sous-produits gazeux : l'hydrogène et le gaz carbonique. On peut éliminer le gaz carbonique par épuration et le récupérer sous forme de neige carbonique. On peut également récupérer l'hydrogène comme matière première destinée à d'autres synthèses ou encore comme source d'énergie. Le résidu de distillation est composé d'une biomasse microbienne ainsi que de produits non volatils formés au cours de la fermentation. Une partie de ces matières peut être réexpédiée vers le contenant de fermentation comme bouillon de culture microbienne, ou déshydratée par évaporation et ensuite séchée ; ces matières peuvent constituer un aliment supplémentaire excellent pour les animaux ou encore servir d'engrais.

On doit évaluer la production de produits chimiques qui pourraient être envisagés comme sources d'énergie du point de vue des bilans de matière et d'énergie. Le Tableau 1 donne le résultat de cette analyse. L'estimation des bilans d'énergie pour ce rapport est basée sur les bilans de matières pris dans Beesch, 1952[2] (Figure 56). La bilan de matière est basé sur la fourniture initiale de matières premières de 100 kg de mélasse contenant 57 kg de sucres fermentables, 3,1 kg de protéines, et 6,2 kg de cendres. L'autre substance ajoutée (15,2 kg) provenait probablement du recyclage d'un résidu de distillation. Le pouvoir calorifique associé aux diverses matières premières est calculé sur la base des pouvoirs moyens des chaleurs de combustion. Les produits primaires étaient le butanol, l'acétone et l'éthanol. Les sous-produits comprenaient le gaz carbonique, l'hydrogène et les protéines pour l'alimentation des animaux.

En termes d'énergie utilisable fournie par les produits combustibles (c'est-à-dire les dissolvants et l'hydrogène à l'état de gaz), ce système réalise une conversion de 77 pour cent des sucres de départ. Bien que, dans ce cas, le produit primaire soit du butanol, il est techniquement possible d'adapter le mélange dissolvant dans la proportion voulue sans trop modifier l'efficacité de la conversion.

TECHNIQUES ACTUELLES (DISPONIBLES D'ICI CINQ ANS)

L'utilité de la production microbiologique d'énergie dans les pays en voie de développement doit être considérée à la lumière des restrictions économiques

TABLEAU 1: Bilans de matière et d'énergie pour la fermentation Acétone-Butanol-Ethanol

Matière de départ : 100 kg de mélasse blackstrap		
Composant	Quantité (kg)	Energie (kcal. x 10^{-3})
Fournitures de matières et d'énergie :		
Sucrose et Sucre	57,0	212
Protéine	3,1	12
Cendres	6,2	0
Divers	15,2	56
Total	81,5	280
Production obtenue de matières et d'énergie :		
Butanol	11,5	100
Acétone	4,9	36
Ethanol	0,5	3
Gaz carbonique	32,1	0
Hydrogène	0,8	24
Aliments pour le bétail (6 kg protéine/6 kg cendres)	28,6	106
Total	78,4	269

et techniques auxquelles sont soumis ces pays. Ces restrictions diffèrent totalement de celles imposées aux pays industrialisés et comprennent :

- La disponibilité et la convenance des matières premières en vue de la conversion pour la production d'énergie ;
- Les difficultés techniques—le concept du projet à l'échelle du village ; et
- Le type de recherche et de développement requis et le résultat escompté.

MATIERES PREMIERES POUR LA CONVERSION DE L'ENERGIE

On a vu précédemment que le choix des matières premières destinées à la production de produits chimiques est très important. Dans un pays industrialisé, ce choix est généralement fonction de conditions économiques. Dans les zones rurales où se pratique surtout l'économie de troc, la matière première nécessaire doit pouvoir être obtenue gratuitement. De plus, le genre de matière première disponible varie très souvent d'une localité à une autre. Les matières premières que nécessite le processus de production microbiologique font l'objet d'un choix moins sévère que celui qu'exigent la plupart des

processus chimiques, étant donné que l'on peut envisager l'emploi d'une variété de matières premières primaires.

Le Tableau 2 donne la liste des diverses matières premières primaires qui peuvent servir de sources de carbone et d'énergie pour la production de divers produits chimiques obtenus. Les hydrates de carbone solubles, en général, peuvent s'utiliser directement pour la fermentation. Toutefois, les déchets et les produits pour la culture bactérienne de type cellulosique, comme le bois, les cosses et les déchets d'agrumes, sont probablement plus abondants et moins importants pour l'économie des pays en voie de développement. Malheureusement, la technologie en ce qui concerne leur utilisation est moins évoluée que pour celle des produits facilement fermentables et solubles comme la mélasse, les sucres et les féculents.

En plus du produit source d'énergie ou de carbone requis pour le processus microbien, certaines autres matières premières sont nécessaires. Les plus importantes sont les substances nutritives inorganiques, comme l'ammoniaque, le phosphore, le magnésium et autres minéraux en très faibles quantités. Dans certains pays, la nécessité d'acheter ces produits essentiels pourrait constituer un obstacle économique à l'emploi du processus microbien.

LE DEFI TECHNIQUE : LE PROJET A L'ECHELLE DU VILLAGE

Une grave question se pose : En supposant que la matière première se trouve disponible, existe-t-il, au niveau d'un village dans un pays en voie de développement, la technologie suffisante pour réaliser la production microbiologique d'énergie? Cette technologie a surtout été développée dans les pays indus-

TABLEAU 2 : Liste des matières premières qui pourraient servir à la conversion microbienne en carburants dans les pays moins développés*

Ethanol	Acétone-Butanol	Butanol-Isopropanol	Acétone-Ethanol
Mélasse	Mélasse	Mélasse	Mélasse
Liqueurs de sulfite	Liqueurs de sulfite	Canne à sucre	Pommes de terre
Pâte de cellulose	Epis de maïs	Sucre brut	Maïs
Jus d'ananas	Sucres de bois	Sucres de bois	Cosses d'arachides
Pommes de terre et produits issus de la pomme de terre	Cassave (manioc)	Liqueurs de sulfite	Cosses d'avoine
Déchets d'agrumes		Féculents	Epis de maïs
Patates			Sucres de bois
Manioc			

*Il a été démontré que la production de chaque produit chimique figurant sur la liste était possible à partir des matières premières figurant en-dessous de chaque produit.

trialisés, dans lesquels on dispose aisément de tous les moyens avancés de technologie. Le niveau technologique nécessaire pour mener à bien cette tâche apparaît après examen des diverses étapes du processus de conversion microbien.

Entretien du Milieu de Culture Microbienne et Préparation de l'Ensemencement

Les cultures microbiennes qui sont les fournisseurs efficaces des produits chimiques désirés doivent être entretenues suivant des procédés bien déterminés. Dans les nations industrialisées, ces procédés impliquent la présence d'un personnel technique expérimenté et les installations matérielles appropriées. Toutefois, le critère classique de rendement maximum du produit, sur la base duquel fonctionne l'industrie disposant d'une technologie avancée, peut ne pas être essentiel si on l'applique à l'échelle du village. Il est donc possible de moins insister sur les sévères programmes d'entretien et de développement du milieu de culture qu'exige la concurrence commerciale.

De même, étant donné la pratique courante qui emploie le système par "fournées" plutôt que l'opération continue pour la production microbiologique de produits chimiques, la préparation des ferments destinés à ensemencer les futurs milieux de fermentation font partie intégrante de l'ensemble du projet. Ceci nécessiterait des milieux ou contenants pour la fermentation à l'échelle pilote et à l'échelle laboratoire, ainsi que du personnel spécialisé pour la réussite de l'opération. On conçoit difficilement que l'on puisse trouver la spécialisation technique suffisante à l'échelle du village.

Production du Milieu de Culture

Le milieu de culture représente l'élément primordial dans le processus de production ; c'est en effet dans le bouillon de culture que se produit la propagation et la fermentation microbiennes des matières premières. Il faut stériliser les éléments nutritifs, et maintenir des conditions aseptiques au cours de la fermentation. Le contrôle de ces phases d'opération est minime, mais il doit rester sûr. D'un autre côté, il est probable que dans la plupart des villages, et plus certainement dans un groupe de villages, on fait régulièrement de la bière, sous une forme ou une autre, ce qui indique bien l'existence d'un certain niveau de compétence technique.

Récupération du Produit

Un autre défi technique qui peut donner des difficultés dans un village, si on veut utiliser comme combustibles les solvants obtenus, est la phase de récupération du produit. La récupération des produits gazeux provenant des fermentations est devenue une pratique routinière à la ferme ou au village dans de

nombreux pays en voie de développement[1] et, mis à part le problème de sécurité, le stockage à basse pression d'un combustible comme l'hydrogène pourrait être utile dans ce cas. Donnons un exemple type. Le gaz issu d'une fermentation peut contenir 40 pour cent de H_2 et 60 pour cent de CO_2. Il reste, toutefois, à déterminer l'utilité de ce type de combustible.

La phase de récupération du produit la plus critique réside dans la distillation nécessaire à la récupération d'un solvant utile. Pour pouvoir servir de carburant utile au fonctionnement de machines ou même comme source de chaleur pour la cuisine et d'autres traitements, ce solvant doit être récupéré sous une forme assez pure, afin que la concentration de l'eau ne soit pas assez forte au point d'empêcher la combustion ou de baisser le pouvoir calorifique (kcal/kg) à un niveau peu économique. Pour traiter ainsi les solvants impliqués, il faut disposer d'un matériel de distillation et de moyens d'action facilement disponibles dans un complexe industriel, mais ne rentrant pas dans les possibilités des villages, pas même dans celles de leurs producteurs de boissons alcoolisées. Finalement, la récupération des résidus pour en faire de la nourriture pour les animaux ou de l'engrais nécessiterait une technologie de déshydration. Là encore, il faut émettre certaines réserves quant aux possibilités d'une réalisation réussie à l'échelle du village.

Toutes ces considérations, qu'il en soit de la disponibilité des matières premières ou des exigences techniques, semblent dicter la conclusion suivante : l'état actuel de la technologie en ce qui concerne la production microbiologique de combustibles à partir des produits agricoles ne laisse entrevoir aucun côté pratique.

RECHERCHES ET REALISATIONS

La probabilité de la production microbiologique de combustibles à l'échelle du village pourrait être améliorée, si l'on intensifiait l'effort de recherche et de développement. Les travaux de recherche nécessaires comprennent :

- L'étude du type et de la nature de la matière première disponible (c'est-à-dire les féculents, les hydrates de carbone solubles, les déchets (cellulosiques) dans les localités intéressées (voir le chapitre sur la photosynthèse) ;
- L'exploration du potentiel des micro-organismes connus pour leur aptitude à réaliser les conversions désirées, alors que la matière première a déjà prouvé son efficacité ;
- L'isolement et des programmes de sélection de nouveaux micro-organismes capables de réaliser la conversion voulue en employant une matière première connue, ou nouvelle et pas encore mise à l'épreuve (par exemple, des déchets d'hydrates de carbone et des cellulosiques du pays) ;
- Le développement de systèmes de fermentation et de projets de récupération des produits pour lesquels une spécialisation technique minimale ne

diminuerait pas les chances de réussite (c'est-à-dire fermentation non-aseptique, conditions de contrôle du processus minimum, fiabilité des opérations) ;

- Le développement d'un matériel de fermentation et de récupération ne nécessitant pas de gros investissements, comme, par exemple, une technologie de déshydration à la fois sûre et économique ; des cuves de fermentation non-métalliques, construites à l'aide de matériaux et procédés de fabrication peu onéreux* ; et
- La délimitation exacte des besoins et des spécifications des produits microbiens recherchés systématiquement de place en place et d'application en application.

Ces suggestions tendent à adapter une technologie connue aux restrictions inhérentes aux zones rurales des pays en voie de développement. On dispose déjà du potentiel nécessaire à la plus grande partie des opérations de recherche et de réalisations auxquelles doivent procéder les institutions des pays en voie de développement. Pour les pays d'Amérique centrale, par exemple, l'Institut pour l'Industrie et la Technologie en Amérique Centrale (ICAITI), dont le siège est à Guatemala City, possède l'équipement, le personnel scientifique et les perspectives de travail. Lorsqu'on procède aux recherches en utilisant un matériel et des installations matérielles incompatibles avec les conditions particulières aux pays en voie de développement, les résultats sont parfois complètement inadéquats ou inacceptables pour d'autres raisons moins évidentes. Il importe donc que les instituts de recherche dans les pays industrialisés jouent un rôle limité, de conseiller tout au plus. Il serait bon de considérer également d'autres instituts de recherche, semblables à l'"ICAITI", dans d'autres parties du monde (comme, par exemple, l'Institut central de recherche sur la technologie de l'alimentation à Mysore, en Inde).

Le financement de ces activités pourrait faire partie du programme de divers pays donateurs d'aide à l'étranger, d'organismes internationaux, ou encore de fondations privées. Bien qu'il puisse être utile de charger un seul organisme, comme l'AID, de la coordination technique et du suivi des progrès, il est très souhaitable que le personnel scientifique des universités et de l'industrie participe activement à ces efforts.

*Par exemple, le rapport, *Ferrocement: Application in Developing Countries* (National Academy of Sciences, Washington, D.C., February 1973)–recommande qu'on accorde une attention particulière au remplacement de l'acier–en particulier l'acier inoxydable–par le ferrociment dans la fabrication de l'équipement de base d'industries alimentaires. Parmi les suggestions offertes, on cite les cuves de fermentation, les cuves ou réservoirs de stockage, et des séchoirs de diverses sortes.

REFERENCES

1. National Academy of Sciences. *Methane generation from human, animal, and agricultural wastes.* Report of an *ad hoc* panel of the Advisory Committee on Technology Innovation, Board on Science and Technology for International Development, Commission on International Relations.
2. Beesch, S. C. 1952. Acetone-butanol fermentation of sugars. *Industrial and Engineering Chemistry* 44(7):1677-1682.

LECTURES SUGGEREES

Production de l'éthanol

Agar, H. D., and McCarthy, J. L. 1951. Fermentation to alcohol of concentrated calcium, magnesium, and ammonium sulfite waste liquors. *TAPPI* (Technical Association of the Pulp and Paper Industry) 34(3):126-131.

Barron, H. 1944. *Distillation of alcohol.* Louisville, Kentucky: Joseph E. Seagram and Sons, Inc., Division of Education.

Bilford, H. B.; Scalf, R. E.; Stark, W. H.; and Kolachov, P. J. 1942. Alcoholic fermentation of molasses, rapid continuous fermentation process. *Industrial and Engineering Chemistry* 34:1406-1410.

Boruff, C. S., and Van Lanen, J. M. 1947. The fermentation industry during World War II. *Industrial and Engineering Chemistry* 39:934-937.

Borzani, W., and Falcone, M. 1953. Control of starter preparation in fermentation of molasses. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 1:1070-1071.

Dunn, P. M. 1945. Industrial alcohol from wood waste. *Chemical Products and the Chemical News* 9(1/2):15-17.

Jacobs, P. B. 1947. *Alcohol from agricultural commodities.* U.S. Department of Agriculture, Report AIC-95. Washington, D.C.: U.S. Department of Agriculture.

Joseph, H. G. 1947. Industrial alcohol production from sulfite waste liquor by the Ontario Paper Co., Ltd. *Sewage and Industrial Wastes* 19(1):60-69.

Leonard, R. H., and Hajny, G. J. 1945. Fermentation of wood sugars to ethyl alcohol. *Industrial and Engineering Chemistry* 37:390-395.

Lichty, L. C., and Phelps, C. W. 1938. Gasoline-alcohol blends in internal-combustion engines. *Industrial and Engineering Chemistry* 20:222.

Liebmann, A. J. 1942. Alcohol in war. *Wallerstein Laboratories Communications* 5(15):131-137.

Miller, E. S. 1943. Industrial alcohol from wheat. *American Miller* 71:39-42.

Thorne, C. B.; Emerson, R. L.; Olson, W. J.; and Peterson, W. H. 1945. Evaluation of malts for production of alcohol from wheat. *Industrial and Engineering Chemistry* 37:1142-1144.

Production de l'acétone et du butanol

Arzberger, C. F.; Peterson, W. H.; and Fred, E. B. 1920. Certain factors that influence acetone production by *Bacillus acetoethylicum. Journal of Biological Chemistry* 44:465-479.

Banzon, J. R. 1941. Fermentative utilization of cassava. *Iowa State College Journal of Science* 16:15-18.

Beesch, S. C. 1952. Acetone–butanol fermentation of sugars. *Industrial and Engineering Chemistry* 44:1677-1682.

———. 1953. Acetone–butanol fermentation of starches. *Applied Microbiology* 1(2):85-95.

Bryner, L. C.; Christensen, L. M.; and Fulmer, E. I. 1936. Hydrolysis of oat hulls with hydrochloric acid. *Industrial and Engineering Chemistry* 28:206-208.

Fred, E. B.; Peterson, W. H.; and Anderson, J. A. 1923. Production of acetone, alcohol and acids from oat and peanut hulls. *Industrial and Engineering Chemistry* 15:126.

Gabriel, C. L. 1928. Butanol fermentation process. *Industrial and Engineering Chemistry* 20:1063-1067.

———, and Crawford, F. M. 1930. Development of the butyl-acetone. fermentation industry. *Industrial and Engineering Chemistry* 22:1163-1165.

Gill, A. 1919. The production of normal butyl alcohol and acetone by fermentation of horse chestnuts. *Society of Chemical Industry Journal*, London 38:411-412T.

Leonard, R. H.; Peterson, W. H.; and Ritter, G. J. 1947. Butanol-acetone fermentation of wood sugar. *Industrial and Engineering Chemistry* 39:1443-1445.

Morikawa, K., and Prescott, S. C. 1928. A new fermentation yielding butyl and isopropyl alcohols. *Journal of Bacteriology* 13:58.

Nathan, F. 1919. The manufacture of acetone. *Society of Chemical Industry Journal*, London 38:271-273T.

Peterson, W. H., and Fred, E. B. 1932. Butyl-acetone fermentation of corn meal. *Industrial and Engineering Chemistry* 24:237.

Prescott, S. C., and Morikawa, K. Production of butyl and isopropyl alcohols. U.S. Patent 1,933,683 (Cl. 195-20), 7 November 1933, Appl. 26 January 1927; 3 pp.

Robinson, G. C. 1922. A study of the acetone and butyl alcohol fermentation of various carbohydrates. *Journal of Biological Chemistry* 53:125-154.

Waksman, S., and Kirsh, D. 1933. Butyric acid and butyl alcohol fermentation of hemicellulose- and starch-rich materials. *Industrial and Engineering Chemistry* 25:1036-1041.

Wendland, R. T.; Fulmer, E. I.; and Underkofler, L. A. 1941. Butyl-acetonic fermentation of Jerusalem artichokes. *Industrial and Engineering Chemistry* 33: 1078-1081.

Wiley, A. J.; Johnson, M. J.; McCoy, E.; and Peterson, W. H. 1941. Acetone-butyl alcohol fermentation of waste sulfite liquor. *Industrial and Engineering Chemistry* 35:606-610.

Production du butanol et du l'isopropanol

Baba, T. 1952. On the industrial production of butanol, isopropanol, and acetone by a fermentation process. *Bulletin. Faculty of Engineering, Hiroshima University* 1: 101-110.

Osburn, Oiven Lloyd. 1935. The production of butyl and isopropyl alcohols by fermentative processes. *Iowa State College Journal of Science* 10:97-98.

———; Brown, R. W.; and Werkman, C. H. 1937. The butyl alcohol-isopropyl alcohol fermentation. *Journal of Biological Chemistry* 121:685-695.

———; ———; and, ———. 1938. Dissimilation of intermediary compounds in the butyl-isopropyl alcohol fermentation. *Iowa State College Journal of Science* 12:275-284.

———, and Werkman, C. H. 1935. Utilization of agricultural wastes. II. Influence of nitrogenous substrate on production of butyl and isopropyl alcohols by *Clostridium butylicum*. *Industrial and Engineering Chemistry* 27:416-419.

TROISIEME PARTIE

AUTRES TECHNIQUES

Energie géothermique

Les ressources géothermiques sont connues depuis des temps très anciens, alors qu'on les utilisait fréquemment pour alimenter en eaux chaudes les établissements de bains chauds thérapeutiques. C'est le seul emploi qu'on en ait fait pendant des centaines d'années, particulièrement en Europe, où des villes doivent leur croissance à leur rôle de stations thermales fondé sur l'utilisation de leurs sources chaudes en thérapeutique. Au début du 20ème siècle, on a découvert un nouvel emploi de l'énergie géothermique à Larderello, en Italie, où l'on a utilisé la vapeur géothermique pour la production d'électricité.

Les ressources géothermiques exploitables existent plus particulièrement dans les parties du monde qui ont été soumises à de récentes manifestations géologiques volcaniques (c'est-à-dire au cours du dernier million d'années), bien qu'elles puissent se trouver également dans d'autres régions. On connaît les zones géothermiques comprenant le "cercle de feu" autour du Pacifique, qui est la région active des tremblements de terre et des volcans. Celle-ci comprend la partie occidentale de l'Amérique du Sud et des Andes, la plus grande partie de l'Amérique centrale, de vastes régions de l'Ouest des Etats-Unis et des Montagnes Rocheuses, les îles Aléoutiennes, la péninsule du Kamchatka, le Japon, Formose, l'Indonésie, les Philippines, la Nouvelle Zélande et de nombreuses îles du Pacifique. Une grande partie de l'Afrique orientale, bordant le "Rift Valley System", le système de la Vallée de la fracture, possède également une activité géothermique en Ethiopie, au Kenya, en Uganda, en Tanzanie et au Zaïre. En Asie et en Europe, les sources d'eaux chaudes s'étendent du Népal, de l'Inde, de l'Afghanistan, de l'Iran, de la Turquie jusqu'en Grèce et en Italie.

Beaucoup d'autres pays et provinces géologiques possèdent des ressources géothermiques, tout en étant dépourvus de sources chaudes ou d'autres évidences d'eaux chaudes en profondeur. On estime, par exemple, qu'un tiers au moins de l'Union Soviétique se trouve au-dessus d'une source d'énergie géothermique exploitable.

L'énergie géothermique est constituée par la chaleur naturelle contenue dans la terre. Les températures au sein de la terre augmentent avec la profondeur. A une profondeur de 20 km, la température atteint 750°C. Toutefois, la plus grande partie de cette chaleur se trouve à de trop grandes profondeurs pour être exploitée. Il est improbable qu'on puisse extraire de la chaleur d'une manière économiquement rentable d'une profondeur excédant 10 km ; même à cette profondeur de 10 km, la plus grande partie de la chaleur géothermique naturelle ne peut être extraite pour être utilisée pratiquement. L'énergie géothermique prend, toutefois, une grande importance économique lorsque la roche en profondeur présente une faille ou certains points poreux qui permettent le dégagement de l'eau ou de la vapeur. La chaleur s'achemine alors du rocher vers la surface, à condition qu'existe une cheminée naturelle ou un puits géothermique percé artificiellement. Pour exploiter la chaleur contenue dans la roche ne comportant ni fracture ni points d'ouverture, on propose de pratiquer des fractures artificielles par l'emploi d'explosifs ou la technique de fracture hydraulique. Ces projets font l'objet d'une étude pratique activement menée aux Etats-Unis, mais il semble peu probable que cette technologie soit l'objet d'applications pratiques dans un proche avenir.

EMPLOIS PASSES ET PRESENTS

On a utilisé l'énergie géothermique principalement pour la génération d'électricité, pour le chauffage d'immeubles et de serres. L'énergie géothermique sert au chauffage de locaux et de serres en Islande, en Hongrie, en Union Soviétique et aux Etats-Unis. On l'utilise pour la climatisation des immeubles, le traitement des produits dans une usine de pâte à papier en Nouvelle Zélande, le séchage de la diatomite en Islande, la récupération du sel de l'eau de mer au Japon et pour le chauffage du sol pour l'agriculture en Israël. On peut associer certains produits chimiques à l'utilisation de l'énergie géothermique, comme la production de la neige carbonique à partir du gaz carbonique géothermique aux Etats-Unis, la production du borax en liaison avec l'utilisation de la vapeur géothermique en Italie, et la production du chlorure de calcium à partir de saumures géothermiques dans l'"Imperial Valley" de la Californie.

TECHNIQUES ACTUELLES (DISPONIBLES D'ICI CINQ ANS)

Les applications de la technologie actuelle pour l'exploitation des sources

géothermiques sont relativement simples ou bien complexes, suivant la température de sortie des sources, sources d'eaux chaudes d'une température inférieure au point d'ébullition normal, ou sources de vapeur ou d'eau surchauffées.

Applications Simples

Les applications requérant de l'eau à une température au-dessous du point d'ébullition, en général celles qui utilisent l'eau pour le chauffage ou les bains, ne demandent pas une technologie compliquée. Il suffit d'être en mesure de creuser des puits peu profonds, pour élever l'eau sur de courtes distances verticales, et de construire des canaux ou des tuyauteries pour amener l'eau à son point d'utilisation. Appliqué à une petite échelle là où se trouvent les sources naturelles d'eaux chaudes, ce type d'utilisation de l'énergie géothermique est d'un prix de revient à peu près nul. Cependant, il reste peu de régions dans le monde où ces possibilités de développement, une fois révélées, n'ont pas encore été exploitées.

En d'autres circonstances, le développement des ressources géothermiques présente des problèmes technologiques et financiers particuliers : c'est le cas lorsqu'il est nécessaire d'avoir de l'eau et de la vapeur à haute température ou que la source se trouve à une profondeur considérable.

Applications Complexes

Au cours des dernières années, les ressources géothermiques ont suscité un intérêt considérable parmi les usagers d'énergie, car elles pourraient être substituées à l'emploi du pétrole dans la production d'électricité et de chaleur.

Il est très probable que, dans de nombreuses parties du globe, on découvre des sources d'eaux chaudes capables d'assurer le chauffage et le traitement. On a exploité l'eau et la vapeur géothermiques à haute température dans des pays comme l'Islande, l'Italie, l'Indonésie, le Japon, les Philippines, l'Amérique du Sud, l'Ouest des Etats-Unis et l'Amérique centrale, où a eu lieu une activité volcanique au cours d'un passé géologiquement récent. En général, on utilise l'eau et la vapeur géothermiques à haute température pour la production d'électricité qui peut être distribuée à des prix bien inférieurs à ceux de l'électricité produite à partir du mazout à son prix actuel. Les conditions requises par l'usine sont les mêmes que celles de toutes les centrales thermiques standard, la seule différence étant qu'on se passe de chaudière et de combustible pour produire la vapeur. Le prix d'investissement d'une centrale électrique géothermique est donc inférieur à celui d'une centrale thermique utilisant un combustible d'origine fossile, et il n'y a, naturellement, aucun frais combustible. Il existe toutefois un certain risque financier et les dépenses

que pourraient entraîner la reconnaissance du terrain, le forage à la recherche de l'eau et de la vapeur : en effet, on ne peut être certain de trouver celles-ci en quantité et de qualité suffisantes pour la production d'électricité. Il faut alors inclure ces frais dans le total des coûts de la production.

Certaines eaux géothermiques à haute température contiennent des sels minéraux en dissolution qui, à un degré élevé de concentration, rendent délicate l'évacuation de grosses quantités de ces eaux sans causer une pollution prohibitive de l'eau en surface ou dans le sol. Au Salvador, dans le champ d'Ahuachapan, l'évacuation vers la mer se fait par un chenal ; on y a procédé également à des essais de réinjection sous la surface. Cela représente, en plus d'un problème écologique, un prix de revient plus élevé.

L'exploration géothermique utilise une technologie avancée ; le forage géothermique nécessite l'emploi d'un matériel et d'une technique semblables à ceux qui sont employés dans l'industrie du gaz et du pétrole, bien qu'elle demande un personnel spécialisé expérimenté dans le forage géothermique. Il découle donc de ceci qu'un minimum d'activités et de capital de premier investissement sera requis, si l'on veut que l'exploration géothermique soit conduite avec de grandes chances de succès. Une exploration économiquement et techniquement justifiée doit normalement être entreprise dans une région où une production d'électricité de plusieurs mégawatts ou de plusieurs dizaines de mégawatts est requise. Si la production nécessaire ne se compte qu'en kilowatts, comme par exemple pour certaines applications rurales, et à moins que plusieurs collectivités ne se partagent le coût de la production de vapeur, les sources géothermiques ne seront pas viables économiquement.

EXPLORATION

L'exploration et la prospection font partie des activités qui doivent être menées sur le terrain avant le forage, afin de minimiser les risques de forage stérile. Dans de nombreux pays, l'exploration pour la recherche de ressources géothermiques s'effectuera vraisemblablement en deux temps au moins : la phase de reconnaissance initiale, et la seconde phase portant sur une recherche plus détaillée et un forage expérimental éventuel.

L'étude entreprise normalement au cours de la phase de reconnaissance comporte : a) la reconnaissance aérienne avec balayage photographique infrarouge, dans les cas où on ne possède que peu de renseignements sur l'emplacement des sources chaudes ; b) l'étude régionale de l'hydrogéochimie des sources chaudes connues et des sources froides qui y sont associées et, c) l'étude de la géologie régionale, en particulier celle des caractéristiques tectoniques principales et leur rapport avec l'action hydrothermale connue.

Diverses études sont menées au cours de la deuxième phase de recherche. Les recherches hydrogéothermiques détaillées de la zone prévue pour l'exploi-

tation servent à localiser et évaluer la teneur anormale en minéraux et en gaz qui pourrait être reliée à l'existence d'eaux ou de vapeur chaudes souterraines. L'étude géophysique–dans la plupart des cas, des études portant sur la résistivité–servent à déterminer les emplacements des puits initiaux d'exploration ou "wild cat" (sondages de prospection). L'expérience en matière d'exploration révèle que les régions productrices de vapeur présentent une faible résistivité sur une profondeur de plusieurs centaines de mètres. D'autres techniques d'exploration géophysique, comme les études par "tremblement de terre miniature" ou par résonance du sol, en sont au stade expérimental. D'autres encore, comme les études de sondages séismiques et les études de pesanteur, peuvent rendre des services dans les cas où une expérience antérieure indique un rapport entre la ressource géothermique et la nature structurale du lieu révélant un contraste en propagation séismique ou en densité.

Prix de l'exploration en employant les techniques actuelles

Le prix de la reconnaissance géothermique varie de plusieurs centimes à plusieurs dollars au kilomètre carré ; le prix réel varie suivant que l'on effectue les recherches par reconnaissance géologique, les recherches photographiques aériennes à l'infrarouge, ou les recherches hydrochimiques, et si la recherche recouvre toute la zone virtuellement productrice. On peut minimiser les coûts dans le cas de projets ruraux, s'il est nécessaire de limiter les distances d'électrification pour des raisons financières. Pour une distance de, mettons, 50 km, on peut alors limiter la reconnaissance à une zone comprise dans un rayon de 50 km des communautés à alimenter.

Les études géophysiques et géochimiques détaillées peuvent atteindre un coût de $1.000 à $2.000 par jour chacune. Les coûts typiques des recherches détaillées pour un projet d'une superficie de plusieurs dizaines de km^2 peuvent atteindre $100.000.

DISPONIBILITE EN MATERIEL TURBO-GENERATEUR

On dispose d'ores et déjà de turbines à vapeur de dimensions convenables permettant leur utilisation sur des stations géothermiques rurales. On dispose de turbines à contre-pression à simple étage d'une gamme de puissance atteignant 400 kW, et de petites turbines à deux ou trois étages, pouvant servir de machines à contre-pression ou/et à condensation dans la gamme des 4 à 5 MW.

Prix du développement géothermique utilisant les techniques actuelles

En 1975, on a mis en service au Salvador une usine géothermique utilisant une turbo-génératrice à condensation de 30 MW de capacité. Le coût d'instal-

lation, estimé à 257 dollars le kW en 1972, a atteint en réalité environ 500 dollars le kW ; toutefois, près de la moitié de ce chiffre représente le prix de l'installation du système d'évacuation de la saumure géothermique produite.

Le prix de la vapeur dans les usines géothermiques de production d'électricité est fonction du rapport entre les puits stériles et les puits productifs creusés, et de la productivité des puits. Si, par exemple, chaque puits coûte $300.000 et qu'on ait creusé quatre puits secs pour chaque puits productif, si le puits productif fournit une vapeur équivalente à 5 MW, si la durée du puits est de 10 ans et si l'intérêt est de 10 pour cent, le coût de la vapeur sera de $0,006 par kWh pour un facteur de charge de 0,9. L'analyse du point de vue économique du fonctionnement de l'usine indique qui si la durée de l'usine est de 25 ans et qu'on emploie un taux d'intérêt de 10 pour cent, les frais fixes seront alors de $0,004 par kWh y compris l'entretien ; et le prix total de production (prix de la vapeur, auquel s'ajoutent les charges fixes) deviendra $0,010/kWh pour la production géothermique d'électricité, lorsque l'usine est utilisée pour un fonctionnement à charge minimale avec un facteur de charge de 0,9.

Ce type d'installation, qui consiste en une turbo-génératrice à condensation d'une capacité de quelques mégawatts, semblerait n'être réalisable économiquement pour les applications rurales que dans le cas où un groupe de villages assez importants sont rassemblés autour d'un champ géothermique ; ainsi l'électricité fournie par une station centrale proche de ce champ serait distribuée aux villages avoisinants au moyen de lignes de transmission relativement courtes. Dans les collectivités rurales, le facteur de charge n'atteindrait habituellement pas 90 pour cent ; le coût en ce qui concerne l'application rurale dépasserait $0,010 par kW/h, selon le facteur de charge.

Une approche d'un autre genre, qui pourrait être réalisable économiquement lorsque les ressources géothermiques se trouvent dans des régions d'habitat relativement peu dense et parsemé, consisterait à utiliser des turbo-génératrices sans condensation. Ce procédé permettrait de minimiser les coûts d'équipement ainsi que les frais de fonctionnement et d'entretien. Les agglomérations situées dans cette région pourraient également s'appuyer sur quelque organisme central, extérieur à la collectivité rurale à desservir, afin de fournir les puits à vapeur nécessaires. Cet organisme pourrait aussi naturellement être financé soit par des fonds publics, soit par des capitaux d'entreprise privée.

Les puits géothermiques creusés dans des régions rurales parsemées reviendraient plus cher que les puits creusés dans les limites d'un champ géothermique. Ainsi, en supposant que le prix de revient par puits dans une région rurale soit de $300.000, que l'équivalent de vapeur produite soit de 2 MW, et que les autres facteurs soient les mêmes que ceux cités précédemment, le prix de la vapeur sera alors de $0,015 le kWh. Si, en se basant sur une approximation raisonnable, on considère le prix de l'installation d'une centrale rurale

sans condensation comme étant la moitié de celui d'une turbo-génératrice à la condensation, les charges fixes seront alors d'environ $0,002 par kWh et le prix total du courant de $0,017 par kWh, si le facteur de charge est de 0,9. Ce prix est toutefois bien inférieur au prix de la production d'électricité utilisant les génératrices thermiques au mazout ou au diesel, qui s'étalerait entre $0,02 par kWh et des montants bien supérieurs dans une région rural de pays en voie de développement, mais deux facteurs restent à considérer. D'abord, les frais dépendent du prix réel du transport du carburant et de l'entretien. Le supplément de prix causés par le transport du carburant entre le port et le lieu d'utilisation dans une région rurale d'un pays en voie de développement peut élever considérablement le prix du carburant, une fois livré à son point d'utilisation. Deuxièmement, selon des facteurs de charge inférieurs, le prix subirait des hausses inversement proportionnelles au facteur de charge ; par exemple, dans les zones rurales et dans de petites agglomérations où l'électricité est destinée principalement à l'éclairage, les facteurs de charge peuvent suivre une gamme de 0,2 à 0,5.

APPLICATION DIRECTE DE L'ENERGIE GEOTHERMIQUE AU CHAUFFAGE

Les ressources en eaux géothermiques de basse température qui sont moins adaptées à la production d'électricité conviennent très bien à d'autres applications nécessitant l'énergie thermique, comme le chauffage de quartiers et le chauffage de serres. On trouve ces ressources non seulement dans les régions volcaniques, mais également dans les zones comportant d'épaisses accumulations de sédiments perméables, comme, par exemple, les régions riveraines du Golfe du Mexique aux Etats-Unis, le Bassin parisien et le Bassin hongrois en Europe, dont aucune n'a récemment connu d'activité volcanique. On utilise déjà les eaux géothermiques pour le chauffage de quartiers et de serres en Islande, en Hongrie, au Japon, en Nouvelle Zélande et dans l'Union Soviétique, et, à une échelle plus réduite, aux Etats-Unis, en France, en Tchécoslovaquie et en Roumanie.

Dans les régions rurales, l'emploi des eaux géothermiques de basse température comme source de chaleur en agriculture semble prometteur dans les pays en voie de développement où régne une saison froide qui empêche d'ordinaire la culture et sa transformation. On procède, par exemple, à des expériences en Israël.

Le coût de l'énergie thermique fournie par les puits géothermiques qui produisent de l'eau au-dessous du point d'ébullition à la pression atmosphérique dépend de facteurs comme la variation saisonnière de la demande, la température réelle de l'eau avant et après emploi, et la productivité des puits. Les frais représentatifs en Europe s'étalent de $1 à $4/Gcal, ce qui représente à peu près un prix se plaçant entre la moitié et le huitième du prix de la même

énergie thermique en prix courant (1976) local du pétrole importé. Plus encore, les eaux géothermiques de basse température ont habituellement une teneur en sels minéraux moins élevée et présentent de ce fait moins de problèmes pour l'évacuation des eaux résiduaires. Dans certains cas, des canalisations d'eaux géothermiques de basse température se sont trouvées entartrées de carbonate, mais certaines mesures ont permis de résoudre efficacement ce problème.

Dans les cas où on obtient des renseignements sur la présence d'eaux géothermiques au cours de recherches de pétrole et de gaz, l'élément de risque financier n'existe alors plus guère en ce qui concerne le développement géothermique ultérieur. Cette situation se présente lorsqu'on trouve des eaux géothermiques de basse température dans des bassins sédimentaires profonds qui ont fait l'objet de recherches pétrolières.

RECHERCHES ET REALISATIONS ACTUELLES

On peut employer l'énergie géothermique dans de nombreux endroits du monde où la demande en électricité est faible, à condition que l'on dispose du matériel adéquat permettant d'utiliser les mélanges vapeur/eaux chaudes immédiatement à la sortie d'un ou deux puits d'eaux chaudes de dimensions raisonnables, pouvant fournir les mélanges de vapeur et d'eau chaude. Toutefois, les séparateurs vapeur/eau de type classique et les turbines à vapeur du modèle disponible actuellement peuvent ne pas fonctionner efficacement, si on les utilise pour des eaux géothermiques risquant de déposer du tartre minéral, étant donné les problèmes mécaniques et thermiques causés par ce tartrage. Au cours des trois dernières années, on a procédé à des essais d'engineering sur du nouveau matériel proposé pour remédier à ces problèmes[1]. On a procédé, au Mexique, à des expériences sur la saumure provenant d'un puits du champ de Cerro-Prieto, en employant un expanseur à vis hélicoïdale rotative comme force motrice. Ces expériences ont démontré que ce système peut fonctionner avec ce type de saumure et produire de l'électricité en quantités suffisamment rentables. Ces résultats ont été complétés par des essais ultérieurs sur des machines de plus grandes dimensions, en employant la saumure provenant du champ de Mesa Est de l'"Imperial Valley" en Californie. L'annexe 9 donne la description de l'expanseur et les détails des tests mentionnés ci-dessus.

POLITIQUE DE DEVELOPPEMENT DES RESSOURCES GEOTHERMIQUES

Les pays qui n'ont pas encore commencé à évaluer ni à développer leur potentiel en ressources géothermiques peuvent s'inspirer de ce qui suit pour déterminer leur politique :

- La charge minimale d'électricité produite à partir de ressources géothermiques à haute température sera probablement bien meilleur marché que l'électricité produite dans des centrales thermiques fonctionnant au carburant solide ou au mazout, en tenant compte des prix actuels du charbon et du pétrole dans le monde ;
- La plupart des pays ayant subi une activité volcanique géologiquement récente possèdent probablement des ressources géothermiques à haute température ;
- Il n'est besoin ni de chaleur régionale exceptionnellement élevée ni d'une épaisseur exceptionnelle de sédiments pour que ces ressources géothermiques soient économiquement exploitables ;
- L'exploration et le développement de ressources géothermiques à haute température comportent un élément de risque financier ;
- Les sources géothermiques à basse température peuvent être développées pour satisfaire les besoins en chauffage en hiver, par exemple, et se substituer au fuel-oil et au charbon ; et
- Dans de nombreux pays où ont eu lieu des recherches pétrolières, les ressources géothermiques à basse température peuvent être développées avec un risque financier réduit.

REFERENCE

1. McKay, R. A., and Sprankle, R. S. 1974. Helical rotary screw expander power system. In *Proceedings of the Conference on Research for the Development of Geothermal Energy Resources, Pasadena, California, 23-25 September*, pp. 301-307. Pasadena: California Institute of Technology, Jet Propulsion Laboratory.

LECTURES SUGGEREES

1. Proceedings of the United Nations Symposium on the Development and Utilization of Geothermal Resources, 1970, Pisa, Italy. *Geothermics*, Special Issue 2, 2 vols.

   Le Tome 1 contient les sommaires du rapporteur. Le Tome 2, en deux parties, contient tous les documents techniques présentés au Colloque.
2. *Abstracts, Second United Nations Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources, San Fancisco, California 20-29 May 2975.* Berkeley, California: University of California, Lawrence Berkeley Laboratory.

   Le recueil d'extraits, en anglais, en français et en espagnol a été distribué à la conférence. Le compte-rendu complet doit être publié en 1976.
3. Armstead, H. C., ed. 1973. *Geothermal energy: a review of research and development.* Paris: United Nations Educational, Scientific, and Cultural Organization.

Stockage de l'énergie

L'utilisation de sources intermittentes ou variables d'énergie, comme l'énergie solaire ou l'énergie éolienne, ainsi que d'autres formes dérivées de l'eau en mouvement, souvent ne devient pratique que s'il existe un moyen de stocker cette énergie. Les méthodes réalisables malgré les restrictions auxquelles elles seraient soumises dans les collectivités rurales des pays en voie de développement, nous intéressent particulièrement : les besoins en capitaux d'investissement, en matériel perfectionné ou en complexité d'entretien doivent être minimes.

LA TECHNOLOGIE DU STOCKAGE

Il existe de nombreuses façons de stocker l'énergie sous pratiquement toutes ses formes ; certaines sont plus séduisantes économiquement que d'autres dans des situations particulières. Beaucoup sont bien connues, particulièrement dans les nations industrielles. Leur capacité d'adaptation aux conditions du village dans les pays en voie de développement varie suivant les conditions locales.

L'énergie se manifeste sous plusieurs formes importantes, y compris l'énergie mécanique, électrique, chimique et thermique, cette dernière constituant une forme spéciale d'énergie mécanique. Il est possible de convertir l'énergie à partir de l'une de ces formes en n'importe quelle autre forme, en passant par un ou plusieurs traitements intermédiaires qui entraînent toujours, pourtant, une certaine déperdition d'énergie. Habituellement, mais pas toujours, cette déperdition se manifeste sous forme de chaleur. Par exemple, l'énergie chimique est convertie en énergie électrique dans une centrale ordinaire. Le combustible (énergie chimique) est brûlé (énergie thermique), de manière à

produire de la vapeur qui fait tourner une turbine (énergie mécanique) reliée à une génératrice électrique (énergie électrique). L'efficacité de l'ensemble du processus est d'environ 33 pour cent. En utilisant des piles à combustible, il existe certains moyens de transformer le combustible (énergie chimique) directement en électricité (énergie électrique) sans passer par les étapes intermédiaires. Théoriquement, cette dernière technique devrait être plus efficace et moins coûteuse que le processus chimique-thermique-mécanique-électrique ; pour plusieurs raisons pratiques, se rapportant surtout à des problèmes de matériaux, ce n'est pas encore le fait.

Le point important est que les combustibles habituels ne sont que de simples cas d'énergie dérivée de l'énergie solaire, convertie et stockée sous forme chimique. Il est vrai qu'en ce qui concerne le pétrole, le gaz naturel et le charbon, la nature s'est chargée de les stocker pour nous. Il n'en reste pas moins qu'ils ne représentent que de l'énergie stockée sous forme chimique et qu'il nous faudra trouver des processus plus courts pour obtenir les mêmes résultats, si nous devons rendre pratique l'utilisation des sources intermittentes d'énergie.

Le problème fondamental du stockage de l'énergie est de trouver des moyens de capter cette énergie, quels que soient la forme et le moment où on la trouve ; la convertir au besoin sous la forme la plus pratique à stocker et ensuite la reconvertir, avec un déperdition minimum, sous la forme utile au moment où l'on en aura besoin. Les principales possibilités physiques comprennent le stockage mécanique, chimique et thermique.

TECHNIQUES ACTUELLES (DISPONIBLES D'ICI CINQ ANS)

Avec la technologie actuelle, on dispose de moyens pratiques pour stocker l'énergie sous des formes mécaniques, chimiques ou thermiques.

Stockage de l'Energie Sous Forme Mécanique

L'énergie mécanique peut être stockée sous forme d'énergie potentielle ou cinétique. Bien que l'emploi du volant comme moyen de stockage d'énergie cinétique soit bien connu, il y a peu d'espoir pour que cette technique trouve un emploi de grande portée dans un avenir immédiat, dans les régions rurales, à des niveaux d'énergie utiles. Elle nécessite trop des matériaux et des capacités d'entretien compliqués.

Il est possible de stocker de l'énergie mécanique sous forme d'énergie potentielle en pompant de l'eau dans un réservoir élevé et en la laissant ensuite s'écouler vers un réservoir placé plus bas, toutes les fois qu'on a besoin d'énergie. Ce système s'appelle le repompage. L'énergie cinétique de l'eau en mouvement est convertie habituellement en énergie électrique, alors que l'on pourrait naturellement l'utiliser directement comme énergie mécanique. De

simples roues hydrauliques fournissent une énergie mécanique directe toutes les fois qu'on peut employer l'énergie mécanique sur place ; lorsqu'il s'agit de la déplacer d'un endroit à l'autre, ce sont des génératrices d'électricité qui offrent probablement les meilleures possibilités.

Une des difficultés du système de stockage à repompage est la nécessité de disposer de réservoirs de relativement grandes dimensions. En général, la meilleure possibilité dans les régions en voie de développement consiste à essayer de trouver un bassin raisonnablement grand pour servir de réservoir supérieur et situé près d'un lac ou d'une rivière déjà existant. Ce dernier devient alors le réservoir inférieur. Avec la technologie actuelle du système de repompage, il est possible en général de réutiliser les deux tiers environ de l'énergie après le stockage. La viabilité de ce système dépend en général du marché de l'énergie qui doit être suffisant pour justifier l'installation du système de pompage primaire et son apport d'énergie. Le pompage du réservoir inférieur vers le réservoir supérieur peut alors être réalisé entre les périodes de pointe, ce qui permet de fournir un supplément d'énergie pendant les périodes de demande maximum. On peut citer comme exemple les systèmes fonctionnant à l'énergie éolienne qui fournissent de l'électricité et/ou de l'énergie mécanique pendant la journée et assurent le pompage pendant la nuit.

L'air comprimé constitue une autre moyen de stockage. Il existe deux méthodes fondamentales intéressantes : la compression directe et la compression hydraulique isotherme. Pour réaliser la compression directe, il faut disposer de cavernes souterraines naturelles ou artificielles facilement rendues étanches et pressurisées. La réutilisation de l'énergie stockée demande que l'on dispose de turbines à basse pression ou de moteurs à piston analogues aux anciens moteurs à vapeur. En général, de tels systèmes ne fournissent qu'un rendement relativement faible ; un tiers seulement de l'énergie initiale peut finalement être réutilisée. Il est possible d'améliorer considérablement ce chiffre en combinant un système à air comprimé et un système de turbines à gaz ou de réfrigération ; ce dernier n'est toutefois pas encore applicable pour les projets présentant pour nous un intérêt majeur.

La compression hydraulique isotherme présente un intérêt beaucoup plus grand dans les petites collectivités et les zones rurales des pays en voie de développement. Dans ce système (qui date d'au moins 3.000 ans) on place un tube vertical devant un barrage qui crée une hauteur de chute d'eau de 5 à 10 m en moyenne ou davantage. L'eau, passant par l'entrée, absorbe des bulles d'air qu'elle entraîne vers le fond. Elle passe ensuite par le fond d'un réservoir étanche ou d'une caverne où les bulles d'air remontent. Par la suite, l'air du réservoir ou de la caverne se comprime à une pression légèrement inférieure à celle existant à l'entrée du tube (Venturi) vertical. On peut alors utiliser cet air comprimé dans une simple turbine ou tout autre expanseur convenable pour obtenir de l'énergie mécanique utilisable.

On a utilisé ces compresseurs hydrauliques isothermes depuis des temps très anciens jusqu'à la fin du 19ème siècle où on les a progressivement remplacés par des systèmes électriques, à vapeur ou à combustion interne, (se reporter au chapitre traitant de l'énergie hydraulique).

Stockage de l'Energie Sous Forme Chimique

Bien que l'énergie d'entrée et de sortie d'une pile soit de l'énergie électrique, le moyen de stockage réel se présente sous forme chimique. Le système le plus répandu est la pile à l'acide de plomb classique : la technique est au point, les prix en sont assez bien connus. L'efficacité de stockage est d'environ deux tiers ou à peu près la même que celle du stockage par repompage. La durée de la pile est assez longue, peut-être dix ans ou davantage, si elle est correctement entretenue, mais le prix est plus élevé si l'on désire stocker davantage d'énergie pour une utilisation plus généralisée. Dans certains cas, toutefois, c'est le seul moyen dont on dispose. On l'emploie alors pour un éclairage domestique limité, pour les postes de télévision et pour des appareils de faible consommation ; mais son prix devient prohibitif pour l'éclairage industriel ou la propulsion de véhicules.

L'électrolyse de l'eau représente une autre technique de stockage de l'énergie sous forme chimique. Le produit stocké est l'hydrogène, qu'on peut alors utiliser comme un simple combustible. Pour minimiser les nécessités de stockage, il doit être stocké à des pressions relativement élevées ; malgré cela la densité d'énergie est assez faible. (On pourrait atteindre des densités plus grandes par la liquéfaction, mais les technologies mécanique et cryogénique nécessaires ne semblent pas devoir être traitées ici.) Néanmoins, un des aspects les plus séduisants de ce projet est que la matière première de base est constituée par de l'eau distillée, et il est possible de développer certains dispositifs fonctionnant directement à l'hydrogène. Ceux-ci comprennent des radiateurs simples et les moteurs à combustion interne. Les premiers pourraient servir au chauffage de locaux, au séchage du grain, à la cuisine, etc. . . ; les autres pourraient être adaptés aux petits véhicules d'emploi local comme les mini-tracteurs ou mini-camions. Ces appareils pourraient être utiles dans un petit village et ne nécessiteraient pas l'importation de combustible. Le développement de simples systèmes d'électrolyse et de radiateurs ou moteurs simples utilisant l'hydrogène comme combustible devraient recevoir une haute priorité.

Un aspect intéressant de l'électrolyse réside dans le fait qu'elle est réalisable pour un rendement très élevé à de très hautes pressions, pourvu que la température puisse être amenée à 200°C. On atteint des rendements de 92 à 93 pour cent à des pressions de 150-250 atmosphères sous ces températures. Ces pressions peuvent être créées par le gaz produit, si le système est convenablement conçu, et cela permettrait de se passer de pompes de compression.

En général, il est possible d'augmenter les températures en isolant les réservoirs à pression et en utilisant les déperditions intérieures (I^2R) pour fournir la chaleur nécessaire. La totalité du système électrolytique est ainsi essentiellement statique (sans pièces mobiles) à l'exception des soupapes à commande manuelle. Il faut que l'énergie d'entrée soit du courant électrique qui, à l'heure actuelle, pourrait être fourni par un système d'énergie éolienne (Figure 57).

Il est également possible de stocker chimiquement l'énergie sous la forme d'hydrocarbures et d'alcools combustibles synthétiques obtenus à partir d'hydrogène et de matières organiques. Ces nombreux procédés sont à l'étude dans le monde entier, mais on n'en connaît encore aucun qui puisse être appliqué dans un proche avenir à la vie d'une collectivité rurale dans un pays en voie de développement. Les processus bactériens anaérobies peuvent constituer l'exception importante à ce qui précède ; ce sujet est discuté dans le chapitre concernant la conversion microbienne des végétaux en combustibles liquides et est traité en détail à propos de la génération du méthane dans une étude séparée de l'Académie[1].

Stockage de l'Energie Sous Forme Thermique

Il est évidemment possible de stocker l'énergie sous forme de chaleur dans des matériaux appropriés, pourvu que l'on dispose du matériel d'isolation thermique convenable pour envelopper la substance employée pour le stockage. On utilise en général comme moyen de stockage l'eau et les pierres qui sont les plus faciles à se procurer. Elles possèdent une capacité de chauffage très élevée. On peut utiliser les sources d'énergie que constituent les chauffe-eau solaires ou les éoliennes ; la principale difficulté réside en ce qu'il n'est possible de réutiliser efficacement cette énergie que sous forme de chaleur : reconvertir l'énergie thermique en énergie électrique ou mécanique implique toujours des pertes importantes, étant donné les limitations thermodynamiques fondamentales. Les températures de stockage seraient en général faibles, et le rendement maximum de reconversion (en énergie mécanique ou électrique) serait d'un faible pourcentage. Toutefois, il peut être intéressant de réutiliser directement cette énergie sous forme de chaleur et c'est ainsi qu'on la réutilise dans certains lieux. On trouvera de plus amples informations à ce sujet dans le chapitre traitant du chauffage, du refroidissement, de la distillation, du séchage des récoltes et de la production d'énergie électrique.

RECHERCHES ET REALISATIONS

Bien que l'on ait suggéré d'autres moyens de stockage de l'énergie, il sera nécessaire de poursuivre les recherches avant que ceux-ci puissent être mis en pratique.

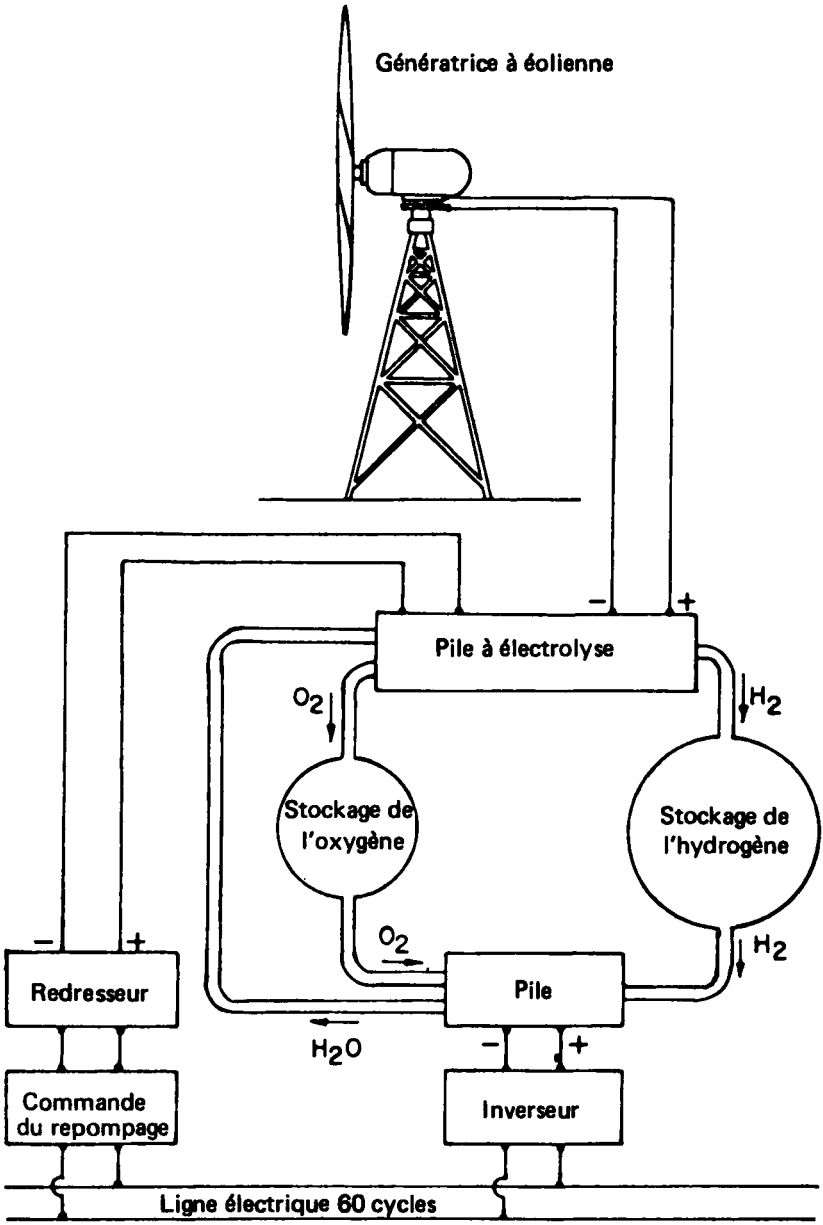


FIGURE 57 Le vent comme source d'énergie. [Source: Utilization of Resources. The Role of Energy in the Development of Human Settlements in Africa. United Nations Economic and Social Council, Document E/CN.14/HUS/6, 17 April 1975.]

Stockage de l'Energie Sous Forme Mécanique

On attache beaucoup d'intérêt actuellement au développement des "supervolants" : ces engins que l'on propose sont construits à partir de matériaux exotiques d'une grande puissance de traction. La perspective de développement à longue échéance semble assez bonne, mais la fabrication des matériaux sophistiqués nécessaires réclame des capacités technologiques importantes et un gros investissement de capitaux. Cette technologie ne sera donc pas appliquée avant longtemps dans les zones rurales des pays en voie de développement.

La possibilité d'emploi de la compression hydraulique isotherme, qui ne semble pas dépendre beaucoup de la recherche et des réalisations techniques bénéficierait de l'expérience acquise par la construction et le fonctionnement de certaines installations prototypes afin d'en déterminer la viabilité.

Stockage de l'Energie Sous Forme Chimique

On a procédé à de nombreuses recherches sur des piles différentes des piles classiques et ces recherches continuent. Elles tendent tout d'abord à réduire le poids par unité d'énergie stockée de façon à faire des véhicules électriques une possibilité pratique. Les résultats les plus prometteurs ont été donnés par les piles fonctionnant à des températures assez élevées, ou par des piles utilisant un matériau coûteux comme l'argent. Autant que l'on sache, il n'existe pas encore de nouveau type de pile qui pourrait mieux servir les régions rurales. L'emploi de l'hydrogène comme combustible dépendra de la suite des recherches sur le stockage et sur le transport, ainsi que des recherches tendant à simplifier le processus d'électrolyse. Il est pourtant peu probable que ce processus puisse être utilisé facilement dans les régions rurales des pays en voie de développement avant une période de 10 ans à peu près. C'est pour les mêmes raisons que les recherches et les réalisations actuellement en cours sur les piles à combustible ne permettront pas leur emploi dans les villages dans un proche avenir.

Stockage de l'Energie Sous Forme Electromagnétique

La seule méthode connue de stockage direct de l'électricité, sans modifier sa forme, est le champ électrique à très haute intensité ou les champs hypermagnétiques. Bien qu'un certain travail ait été réalisé en ce qui concerne ces techniques, les nécessités et les coûts en technologie sont extrêmement élevés, et les densités d'énergie possibles réalisables sont jusqu'ici très faibles. A moins qu'une découverte imprévue dans le domaine des matières ou de la technique ne se présente, il est probable que ces méthodes ne seront pas

utilisées pour le stockage de longue durée, ni dans les pays industrialisés, ni dans les pays en voie de développement, dans un proche avenir.

REFERENCES

1. National Academy of Sciences. 1977. *Methane generation from human, animal, and agricultural wastes*. Report of an *ad hoc* panel of the Advisory Committee on Technology Innovation, Board on Science and Technology for International Development, Commission on International Relations.

ANNEXES

Annexe 1

Recherche et développement dans le domaine de l'énergie et possibilités d'application à petite échelle

(Les données incluses à la présente liste ont été compilées par le personnel de l'Académie (NAS) et proviennent en grande partie de réponses à des questionnaires envoyés aux organisations et particuliers dans les pays mentionnés. Il ne s'agit pas nécessairement d'une liste complète, mais elle représente les meilleures données disponibles au début de 1976*.)

*Depuis la compilation de ces données, la US Energy Research and Development Administration (Bureau de la recherche et du développement en matière d'énergie des EU) a publié un rapport qui complètent les renseignements fournis par le présent annexe. De Winter, F., et de Winter, J.W., éditeurs, 1976, "Description of the Solar Energy R&D Programs in Many Nations". Ce document peut être obtenu en s'adressant au National Technical Information Service, U.S. Department of Commerce, Springfield, Virginia 22161, Etats-Unis.

PAYS	Institution/Organisme/Adresse	Responsables	Domaines d'activités
REPUBLIQUE FEDERALE D'ALLEMAGNE	Forschungsinstitut für Energietechnik 7441 Wolfsschlugen Hauffstr. 14	Prof. Dr.-Ing. G. Schöll	Collecteurs solaires
	Forschungsinstitut für Windenergietechnik 7 Stuttgart 80 Pfaffenwaldring 31	Prof. Dr. V. Hütter	Energie éolienne
	Technische Universität Braunschweig 33 Braunschweig Mendelssohnstr. 16	Prof. E. W. Justi	Piles solaires
	Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung (ISI) 75 Karlsruhe Breslauerstr. 98		Energie solaire
	Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft TH Aachen 51 Aachen Mies-van-der-Rohe-Strasse		Energie hydraulique
	Rheinische-Westfälische Technische Hochschule Institute for Applied Thermodynamics Aachen	Dr. Ing. A. Beckers	Programme bilatéral avec l'Université technique Santa Maria du Chili
	Kernforschungsanlage Jülich 517 Jülich	Dipl.–Ing. F. J. Friedrich	Collecteurs ; piles solaires ; formation de gaz utilisant la chaleur solaire
	Deutsche Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt E. V.		Energies éolienne et solaire

	Philips Forschungslaboratorium 51 Aachen Postfach 1980, Weishausstrasse	Dr. Hörster	Energie solaire
ARABIE SAOUDITE	College of Petroleum and Minerals Dhahran	Prof. M. Ali Kettani Hussein K. Abdel-Aal	Pyrhéliométrie ; hélio-hydroélectricité ; conversion énergétique directe ; production d'hydrogène ; production de minéraux à partir de l'eau de mer
	University of Riyadh College of Engineering Riyadh	Dr. J. A. Sabbagh Dr. A. A. M. Sayigh Dr. E. M. A. El-Salam	Chauffe-eau, évaporateurs et chaudières solaires ; maisons solaires ; effets de l'ensoleillement sur l'habitat
ARGENTINE	Observatorio Nacional de Física Cósmica Comisión Nacional de Estudios Geoheliofísicos Departamento de Radiación Solar Programa de Helioenergética Av. Mitre 3100, San Miguel, Pcia. de Buenos Aires	Lic. Jorge Luis Guerrero Ing. Alfred Tomás Rapallini	Conversion thermique d'énergie solaire ; distillation solaire ; chauffage des fluides à l'énergie solaire
	Observatorio Nacional de Física Cósmica Departamento de Radiación Solar Meteorología Av. Mitre 3100, San Miguel, Pcia. de Buenos Aires	Lic. Ernesto Santino Crivelli Lic. Manuel Agustin Rela	Solarimétrie ; tarage des instruments ; climatologie de la radiation
	Universidad Nacional de Salta Departamento de Ciencias Exactas Buenos Aires 177, Salta	Dr. Luis Saravia	Séchage solaire des récoltes ; collecteurs; appareils chauffage
	Universidad Nacional de San Luis Departamento de Física y Química Chacabuco y Pedernera San Luis	Lic. Mario Diaz	Chauffage de l'eau et distillation solaires
	Universidad Nacional de Rosario Departamento Física Av. Pellegrini 250 Rosario, Pcia. Santa Fe	Dr. Carlos Garibotti	Structures à pertes minimales ; conversion thermique de l'énergie solaire

PAYS	Institution/Organisme/Adresse	Responsables	Domaines d'activités
	Universidad Nacional de La Pampa Instituto de Estudios Regionales Mansilla 178, Santa Rosa, La Pampa	Prof. Juan Elias Zabala	Evaporateurs solaires destinés aux collectivités locales
AUSTRALIE	CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization) Division of Mechanical Engineering P. O. Box 26, Highett, Melbourne	Dr. B. Rawlings, Chef de division	Conversion thermique, conception et développement de collecteurs ; chauffage de l'eau et production de vapeur à basse pression ; climatisation et chauffage de bâtiments
	Division of Mechanical Engineering Highett, Victoria 3190	P. I. Cooper, Responsable de la recherche W. R. W. Read, Principal Responsable de la recherche	Evaporateurs ; fourneau à bois
	CSIRO Solar Energy Studies P. O. Box 89, East Melbourne, Victoria 3002	M. Roger N. Morse, Directeur des recherches sur l'énergie solaire	Etudes de faisabilité sur l'énergie solaire; applications industrielles de l'énergie; contact avec les chercheurs australiens et à travers le monde
	CSIRO Division of Atmospheric Physics Melbourne (Radiation Centre for Region V, World Meteorological Organization)	G. W. Paltridge	Solarimétrie
	CSIRO Division of Building Research Melbourne		Evaluation de l'ensoleillement en Papouasie
	CSIRO Division of Irrigation Research Griffith	K. V. Garzoli	Propriétés thermiques des serres en verre et en plastique

CSIRO Division of Land Use Research P. O. Box 1666 Canberra City, A.C.T. 2601	Dr. J. D. Kalma Dr. R. J. Millington	Solarimétrie ; insolation ; application de l'énergie en agriculture et dans les milieux urbains ; aspects climatiques et météorologiques de l'utilisation de l'énergie
CSIRO Division of Food Research P. O. Box 52, North Ryde, Sydney, N.S.W. 2113	Mme. W. Szulmayer	Séchage de fruits au soleil
University of Melbourne Department of Mechanical Engineering Melbourne	W. W. S. Charters, Professeur de thermodynamique, Directeur de la Faculté	Propriétés thermiques des appareils du chauffage à l'air chauffé par l'énergie solaire ; appareils chauffe-eau solaires ; habitations solaires ; collecteurs solaires ; qualité de fonctionnement
University of Queensland Department of Mechanical Engineering St. Lucia, Brisbane, 4067	Norman R. Sheridan, Professeur de génie mécanique	Chauffage et climatisation de bâtiments ; conversion photovoltaïque ; moteurs thermiques ; stockage et transmission de l'énergie ; publie "Solar Research Notes" ("Notes sur la Recherche en Energie solaire")
University of New South Wales School of Mechanical and Industrial Engineering P. O. Box 1, Kensington 2033, New South Wales	C. M. Sapsford	Solarimétrie ; chauffage et climatisation d'immeubles résidentiels ; étude du fonctionnement de plaques collectrices
International Solar Energy Society Australian and New Zealand Section c/o CSIRO Division of Mechanical Engineering P. O. Box 26, Highett, Victoria 3190	Robert V. Dunkle, Editeur	Publie annuellement la revue "Solar Energy Progress in Australie and New Zealand" ("Progrès de l'énergie solaire en Australie et en Nouvelle-Zélande")

PAYS	Institution/Organisme/Adresse	Responsables	Domaines d'activités
	The University of Western Australia Department of Mechanical Engineering Nedlands, W.A. 6009	R. S. Minchin, Professeur	Modelage, fabrication et installation de chauffage à bon marché (coût total du matériel A $15)
		J. A. Appleyard, Professeur	Modelage, construction et essais sur chauffe-eau solaire cylindrique comprenant absorbeur et réservoir
BELGIQUE	Ministère de l'Agriculture Bruxelles 1000	J. F. M. Ronchaine, Ingénieur Agronome	Serres, évaporateurs
	Université Catholique de Louvain Faculté des Sciences Appliquées Laboratoire de Physico-Chimie et de Physique de l'Etat solide Bâtiment Boltzmann Place Croix du Sud, 1 B 1348 Louvain-La-Neuve	Prof. J. P. Issi J. P. Michenaud	Conversion thermo-électrique
BIRMANIE	Central Research Organization Rangoon	U Maurg Maung	Fourneaux solaires ; évaporateurs ; chauffe-eau ; séchoirs agricoles ; production de sel
BRESIL	Universidade Federal da Paraíba Laboratório de Energía Solar João Pessoa, 58.000 Paraíba	Cleantho Torres, Chef Antonio MacDowell Pio Caetano Lobo Julio Goldfarb Rogério Klüppel	Distillation de l'eau ; séchage de fruits ; fours solaires ; moteurs d'irrigation solaires. Publie un bulletin semestriel en portugais
	Instituto Tecnológico de Aeronáutica Division of Mechanical Engineering 12.200 São José dos Campos, São Paulo	M. Sérgio Nelo Vannuci, Professeur adjoint	Distillation de l'eau saline

	Centro de Pesquisas do Cacau Agricultural Engineering Division Caixa Postal 7, Itabuna-B.A.	Dr. Biswa Nath Ghosh, Chef (adresse actuelle: Gulf and Western Advanced Development and Engineering Center, 101 Chester Road, Swarthmore, Pa. 19081, Etats-Unis)	Séchoir agricole
CANADA	The University of Western Ontario Faculty of Engineering Science London 72, Ontario	Prof. R. K. Swartman	Collecteurs solaires ; réfrigération et fabrication de glace grâce à l'énergie solaire
	Brace Research Institute Macdonald College McGill University Ste. Anne de Bellevue Québec	Thomas A. Lawand, Directeur d'Opérations sur le terrain	Solarimétrie ; séchage des récoltes ; fourneaux, distillation ; chauffe-eau ; combinaisons d'évaporateurs de serres utilisant l'énergie solaire ; serres adaptées à l'environnement ; moteurs solaires ; mares solaires ; moulins à vent générateurs d'électricité et pour le pompage de l'eau ; utilisation de l'énergie solaire et éolienne pour le chauffage, etc. (toute une gamme de publications pratiques est offerte au public)
CHILE	Universidad del Norte Solar Energy Laboratory Antofagasta	Prof. Carlos Espinosa	Solarimétrie ; chauffe-eau
	Universidad de Chile Department of Mechanical Engineering Casilla 2777, Santiago	Sergio Alvarado Felipe Wainer	Refroidissement par l'énergie solaire

PAYS	Institution/Organisme/Adresse	Responsables	Domaines d'activités
	Universidad Técnica Federico Santa María Solar Energy Research Center Casillas 110-V.-132-V, Valparaiso	Dr. Julio R. Hirschmann, Directeur, Centre de recherche sur l'énergie solaire Dr. Bernardo Seifert, Directeur du Laboratoire d'énergie solaire Prof. Germán Frick, Directeur, Laboratoire de l'Horticulture Dr. Arnold Keller	Solarimétrie ; fourneaux et chauffe-eau solaires ; appareils de distillation ; nappes d'eau solaires. Public "Revista Scientia" (Revue "Science"). Réfrigération de serres par évaporation Collecteurs solaires ; traitements de surfaces
	Universidad Técnica Federico Santa María Solar Energy Research Center Viña del Mar	Dr. Bernardo Seifert	Station d'essais pour chauffe-eau, évaporateurs et fours solaires
	Universidad Técnica Federico Santa María Solar Energy Research Center Calama	Prof. Germán Frick, Directeur	Station d'essais ; nappes solaires et horticulture en milieu côntrolé (serres en plastique)
	Universidad Técnica Federico Santa María Solar Energy Research Center Quillagua	—	Station d'essai-installations pour la distillation d'eau salée
CHINE (TAIWAN)	National Tsing Hua University Power Mechanical Engineering Department 855 Kuang Fu Road Hsinchu, Taiwan 300	Dr. Ching-Kwei Kang	Conception et construction de moulins à vent de 20 kW, également utilisés pour le pompage de l'eau ; conception et construction de moulins à vent de 15 kW
COREE DU SUD	Korean Atomic Energy Institute Seoul	Dr. Jong Hee Cha	Plaques collectrices

EGYPTE	Ain Shams University Heliopolis, Cairo	M. K. Elnesr	Solarimétrie ; collecteurs solaires ; évaporateurs
	National Research Centre Solar Energy Laboratory Dokki, Cairo	Dr. Ibrahim A. Sakr, Directeur	Fourneaux solaires, évaporateurs
ETATS-UNIS	University of California (Berkeley) Sea Water Conversion Laboratory 1301 South 46th Street Richmond, California 94804	Prof. Alan D. K. Laird, Directeur Badawi W. Tleimat, Sr., Ingénieur au développement Prof. Everett D. Howe, Directeur honoraire	Evaporateurs solaires ; déssalinisation
	University of California (Richmond) Sanitary Engineering Research Laboratory Richmond Field Station 1301 South 46th Street Richmond, California 94804	Prof. William J. Oswald Prof. Clarence G. Golueke	Traitement des eaux résiduaires, algues ; production de méthane
	University of Delaware Institute of Energy Conversion Newark, Delaware 19711	Dr. Allen M. Barnett, Directeur	Photovoltaïques (piles solaires CdS/Cu_2S) ; chauffage et climatisation solaires d'immeubles ; collecteurs solaires ; stockage de chaleur ; gestion de l'énergie ; systèmes de conversion distributifs rattachés à un réseau de services publics ; analyse techno-économique
	University of California Los Angeles, California	Prof. Richard Schoen	Chauffage d'immeubles

PAYS	Institution/Organisme/Adresse	Responsables	Domaines d'activités
	Colorado State University Fort Collins, Colorado	Prof. George O. G. Löf	Fourneaux solaires ; chauffage et climatisation d'habitations ; chauffe-eau
	Southern Methodist University Institute of Technology Dallas, Texas	Prof. Harold A. Blum	Conception de plaques collectrices
	Oklahoma State University School of Engineering Stillwater, Oklahoma 74075	Prof. William L. Hughes Prof. H. J. Allison Prof. R. Ramakumar	Turbines pour moulins à vent ; pompes ; génératrices (vitesse variée, fréquence constante ; stockage d'énergie (hydrogène résultant de l'électrolyse de l'eau)
	University of Wisconsin Solar Energy Laboratory Engineering Research Laboratory 1500 Johnson Drive Madison, Wisconsin 53706	Dr. John A. Duffie	Collecteurs ; chauffage d'habitations ; réfrigération
	Battelle Memorial Institute Columbus Laboratories 505 King Avenue Columbus, Ohio 43201	Dr. James A. Eibling	Chauffage et climatisation solaires ; évaporateurs solaires ; moteurs Stirling ; stockage d'énergie ; plaques collectrices ; concentrateurs
	University of Minnesota Department of Mechanical Engineering 125 Mechanical Engineering Building Minneapolis, Minnesota 55455	Dr. Richard C. Jordan, Chef Dr. Ernst Eckert Dr. Ephraim Sparrow Floyd Larsen	Electricité thermique solaire ; chauffage et climatisation ; plaques collectrices ; stockage d'énergie et systèmes de thermopompes ; surfaces sélectives
	University of Massachusetts Department of Civil Engineering Amherst, Massachusetts 01002	Prof. William Heronemeus	Conversion énergie éolienne

University of Maryland Department of Mechanical Engineering College of Engineering College Park, Maryland 20742	Prof. Stephen L. Sargent Prof. Redfield Allen	Moteurs à carburants utilisant le cycle Rankine ; réfrigération par absorption
National Aeronautics and Space Administration (NASA) Goddard Space Flight Center Greenbelt, Maryland	M. M. P. Thekaekara, Code 912	Solarimétrie
Arizona State University College of Architecture Tempe, Arizona	Prof. John I. Yellott, Directeur, Projet d'Energie solaire	Chauffage et climatisation d'habitations et d'établissements publics
Energy Research and Development Administration (ERDA) Division of Solar Energy 20 Massachusetts Avenue, N.W. Washington, D.C. 20545	Dr. Lloyd O. Herwig, Conseiller scientifique Dr. Frederick H. Morse (Chauffage et réfrigération) Louis V. Divone (Conversion de l'énergie éolienne) W. R. Cherry (Séchage des récoltes)	Appuie et coordonne les recherches sur l'énergie solaire dans les institutions américaines et sur le développement de la technologie commerciale
Volunteers in Technical Assistance 3706 Rhode Island Avenue Mt. Rainier, Maryland 20822	Dr. Michael P. Greene	Ce service d'information technique fournit une aide sur demande pour la plupart des régions ; publie des plans et brochures sur appareils et instruments ; participe aux projets de technologie appropriée

PAYS	Institution/Organisme/Adresse	Responsables	Domaines d'activités
	Route 4, Box 258 Mt. Airy, Maryland 21771	C. J. Swet	Fourneaux et thermopompes solaires ; collecteurs solaires pour le chauffage de liquides ; production décentralisée d'oxygène à partir du soleil et de d'leau ; production décentralisée d'engrais à base d'azote à partir du soleil, de l'air et de l'eau
	University of Florida Department of Mechanical Engineering Solar Energy and Conversion Laboratory Gainesville, Florida 32611	Prof. E. A. Farber, Directeur	Chauffage et climatisation d'habitations ; distillation ; réfrigération ; fourneaux solaires ; moteurs thermiques ; automobile à pile solaire
	University of California Department of Materials Science and Engineering Hearst Mining Building Berkeley, California 94720	Prof. Marshall F. Merriam	Pyranomètre peu coûteux ; nappes solaires ; collecteurs peu coûteux ; vapeur solaire à basse pression
	Ohio University Mechanical Engineering Department Athens, Ohio 45701	Prof. William T. Beale	Moteurs Stirling à haute et à basse températures ; plaques collectrices ; moulins à vent
FRANCE	Université de Nancy Faculté des Sciences Laboratoire de physique de dépôts métalliques Boulevard des Aiguillettes 54 – Nancy	Prof. Jean Fléchon	Réfrigération solaire ; climatisation ; photovoltaïques
	Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) Laboratoire de l'énergie solaire Odeillo	Dr. Félix Trombe, Directeur	Four solaire ; réfrigération ; chauffage de résidences ; solarimétrie

	Université de Provence Centre de Saint Jérôme Département d'Héliophysique Marseille	J. Millet, Maître Assistant M. Bazan, Assistant B. Imbert, Assistant J. P. Legre, Assistant J. Gervais, Assistant	Solarimétrie
		L. Aiache, Assistant G. Durr, Chercheur J. Le Troquer, Chercheur B. Imbert, Assistant	Conversion hélio-électrochimique
	Société française d'études thermiques et d'énergie solaire (SOFRETES) Zone Industrielle d'Amilly B. P. 163, 45203 Montargis	J. P. Girardier	Moteurs thermiques utilisant l'énergie solaire pour le pompage de l'eau
	PROMETHEE (entreprise mixte de SOFRETES et du Bureau d'énergie atomique français) Zone Industrielle d'Amilly B. P. 163, 45203 Montargis	M. Clémont J. P. Girardier	Recherche et développement : énergie solaire. Première application ; pompes solaires pour l'irrigation
	Coopération méditerranéenne pour l'énergie solaire (COMPLES) Siège social : Palais de la Bourse 13001 Marseille	Prof. M. Perrot, Président	Publie bulletin semestriel "Revue Internationale d'Héliotechnique"
	Association française pour l'étude et le développement des applications de l'énergie solaire (A.F.E.D.E.S.) 28, rue de la Source, 75016 Paris	P. Girard, Délégué Général	Publie *Cahiers A.F.E.D.E.S.* ; organise réunions d'études et en envoie les rapports aux membres ; centre de documentation des membres
GRECE	Hellenic Industrial Development Bank Amalias Ave. 20, Athens 118	P. P. Kokkaliaris, ingénieur-chimiste	Evaporateurs, déssalinisation

PAYS	Institution/Organisme/Adresse	Responsables	Domaines d'activités
	Greek Atomic Energy Commission Nuclear Research Center "Demokritos" Aghia Paraskevi–Attiki	Dr. Argyrios-Demetrios Spyridonos Dr. (Mme.) E. Delyannis	Evaporateurs solaires, chauffe-eau, collecteurs, concentrateurs solaires ; chauffage solaire
INDE	Regional Engineering College Warangal (A.P.) 506004	Dr. T. L. Sitharama Rao S. Subramanyam	Chauffe-eau solaire ; collecteur solaire polyvalent
	Aurobindo Centre for Environmental Studies Pondicherry	Dr. C. L. Gupta	Chauffe-eau solaires
	Central Arid Zone Research Institute Division of Wind Power and Solar Energy Utilization Jodhpur, Rajasthan	H. P. Garg Dr. A. Krishnan	Solarimétrie ; conception de plaques collectrices solaires ; énergie éolienne
	Birla Institute of Technology and Science Pilani, Rajasthan	A. K. Jain T. L. S. Rao, Maître assistant	Chauffe-eau solaires
	National Physical Laboratory Hillside Road, New Delhi	Dr. G. D. Sootha Dr. V. G. Bhide	A développé des fourneaux, des chauffe-eau, des moteurs Stirling solaires ; des systèmes d'évaporation solaire ; (on n'est pas sûr des activités actuelles)
	Indian Meteorological Department New Delhi	Dr. A. Mani, Directeur adjoint	Solarimétrie
	Ghandian Institute of Studies Appropriate Technology Development Unit P. O. Box 116 Rajghat, Varanasi 221001	M. M. Hoda, Directeur de la division	Répertoire de documentation sur la technologie appropriée ; encourage la recherche sur la technologie appropriée dans les régions rurales et son adoption en Inde

NOUVELLE-GUINEE-PAPOUASIE	The Papua New Guinea University of Technology Department of Electrical Engineering Faculty of Engineering P. O. Box 793 Lae	Prof. J. L. Woodward	Pompes simples et béliers hydrauliques ; roues à eau ; génératrice électrique à petite échelle ; chauffe-eau ; réfrigération solaire ; chauffe-eau
		Prof. J. C. V. Chinappa	Réfrigération solaire
NOUVELLE-ZELANDE	Dominion Physical Laboratory Department of Scientific and Industrial Research Physics and Engineering Laboratory Private Bag, Lower Hutt	Dr. R. F. Benseman	Chauffe-eau et distribution du rayonnement solaire
PAKISTAN	Pakistan Council of Scientific and Industrial Research (P.C.S.I.R.) Labs. Kemal Ataturk Road, PPI Building Karachi	Directeur, Programme d'énergie solaire et éolienne	Pompes à eau ; séchage de récoltes ; complexe intégré (cultures/eau/énergie) éoliennes ; chauffage de bâtiments
PAYS-BAS	Eindhoven University of Technology Laboratory for Fluid Mechanics Eindhoven	Ir. P. T. Smulders	Energie éolienne pour les pays en voie de développement
	Mechanical Engineering Department	Prof. Ir. C. W. J. von Koppen	Production d'énergie hydro-électrique à partir de génératrices à turbine centrifuge pour faible charge d'eau, de type Banki, pour les pays en voie de développement ; réfrigération solaire
	Chemical Engineering Department	Ir. S. P. Bertram	Fermentation de matériaux organiques pour la production de méthane (pour les pays en voie de développement)

PAYS	Institution/Organisme/Adresse	Responsables	Domaines d'activités
	Motilal Nehru Regional Engineering College Mechanical Engineering Department Allahabad 211004	Dr. B. K. Gupta	Climatisation de bâtiments publics et industriels ; plaques collectrices ; lentilles Fresnel
		R. K. Bhardwaj, Lecteur, Génie mécanique	Chauffe-eau solaires
	All India Solar Energy Working Group c/o R. L. Datta, Central Salt and Marine Chemical Research Institute Bhavnagar, Gujarat	Dr. R. L. Datta, Président	Publie résultats ; voué au développement de la recherche sur l'énergie solaire ; au développement et à la dissémination des connaissances dans le domaine de l'énergie solaire
IRAN	Pahlavi University Department of Mechanical Engineering Shiraz	Prof. Mehdi N. Bahadori	Chauffage solaire d'habitations ; fourneaux solaires ; stérilisation solaire ; déssalinisation solaire ; déshydration de fruits et légumes
	Institute of Natural Resources Karaj		Chauffe-eau
	Teheran University Agricultural Engineering Department Karaj	Dr. Javed Maghsood	Serres
IRAQ	Building Research Center Scientific Research Foundation Baghdad	A. E. A. Almaini, Assistant à la recherche A. E. A. Alhadithi, Assistant à la recherche	Chauffe-eau solaires ; chauffage de locaux
	Mustansiriya University Faculty of Science Physics Department Baghdad	M. A. Abbas	Solarimétrie

	College of Technology Department of Mechanical Engineering Brighton, Sussex	Dr. J. C. McVeigh	Plaques collectrices
	Electrical Research Association Cleve Road Leatherhead, Surrey KT22 7SA	A. H. Stodart, Directeur général Industrial Services Division	Energie éolienne
	University of Reading Department of Engineering and Cybernetics Whiteknights, Reading RG6 2AY	Prof. P. D. Dunn	Pompes hydrauliques à piston ; moteurs Stirling ; éoliennes ; appareils de chauffage solaires ; production de méthane
	University of Sheffield Department of Building Science Sheffield	Prof. J. K. Page, Directeur	Estimation de l'insolation directe ou diffusée sur des surfaces verticales ou inclinées à partir de la radiation reçue par des surfaces horizontales
	Intermediate Technology Development Group Ltd. Parnell House, 25 Wilton Road London SW1V 1JS	George McRobie, Directeur (Communications)	Source d'information sur les énergies éolienne, solaire et hydraulique, publie la revue trimestrielle "Appropriate Technology"
SENEGAL	Université de Dakar Institut de physique météorologique H. MASSON Faculté des sciences Dakar-Fann	Prof. Djibril Fall	Plaque collectrice ; moteur solaire ; chauffe-eau ; séchoir solaire
	Centre national de la planification de la recherche scientifique et technologique	Dr. Assad Takla	Pompes solaires ; réduction de coûts
SRI LANKA	University of Ceylon Peradeniya	Dr. N. S. Wijesundere, Professeur de génie mécanique	Chauffe-eau

PAYS	Institution/Organisme/Adresse	Responsables	Domaines d'activités
	Department of Botany	Prof. B. Z. Ginzburg Dr. B. Z. Dorfman	Conversion microbienne d'algues en combustibles liquides
	Department of Organic Chemistry	Prof. S. Patai	Pyrolyse de la cellulose et des déchets
		Dr. S. Brenner Prof. J. Klein	Hydrogénation de la cellulose et des déchets agricoles
	The Hebrew University of Jerusalem Center for Research in Energy, Fuel and Petrochemistry	Prof. J. Klein Prof. M. Rabinowitz Prof. J. Blum Prof. I. Agranat	Liquéfaction du charbon ; réactions du charbon
	Ben-Gurion University of the Negev Research and Development Authority P. O. Box 1025 Beer-Sheva, 84110	Dr. D. Pasternak Dr. M. Twersky	Chauffage géothermique du sol (récoltes en saison froide, protection contre le gel, croissance accélérée), chauffage géothermique de serres, de pépinières, de poulaillers et d'autres bâtiments abritant de petits animaux
		E. Rappaport Dr. D. Pasternak Dr. A. Richmond	Systèmes d'environnement contrôlé ; unités de production d'algues ; serres
		Dr. I. Yaron Dr. I. Borde	Fourneaux solaires ; réfrigération par absorption pour la préservation de produits agricoles
		Dr. C. Forgacs	Déssalination des eaux saumâtres ; conception de petites citernes pour eau potable

	Department of Mechanical Engineering	Dr. O. Igra	Moulins à vent protégés pour pompage de l'eau et production d'électricité
		Dr. A. Bar-Cohen Dr. K. Preiss	Chauffage solaire ; chauffe-eau
ITALIE	European Community Joint Research Centre 21020 Centro Euratom di Ispra Varese	Dr. Joachim Gretz, Direction scientifique	Collecteurs pour chauffage résidentiel ; problèmes de conversion quantum ; forte production d'électricité
	Istituto Chimico "G. Ciàmician" dell' Università Bologna	V. Balzani F. Bolletta L. Moggi	Conversion photochimique
	Laboratorio Fotochimica e Radiazone d'Alta Energia del CNR Bologna	M. Gleria	Conversion photochimique
JAPON	Keio University Tokyo	Prof. I. Tanishita	Chauffe-eau
	Waseda University Department of Architecture Nishiokubo, Shinjuku-ku, Tokyo 160	Prof. K. Kimura M. Udagawa, Ingénieur à la recherche	Maisons solaires expérimentales ; chauffage solaire ; collecteurs solaires (théories et expérimentation) ; calculs sur les charges de chauffage et de climatisation de bâtiments ; réfrigération par absorption
	Tokai University	Prof. I. Tanishita	Chauffe-eau
	Tokai University Department of Architecture Shibuya-ku, Tokyo	Prof. S. Tanaka	Etudes fondamentales sur les systèmes de chauffage et de réfrigération solaires

PAYS	Institution/Organisme/Adresse	Responsables	Domaines d'activités
	Kogakuin University Department of Architecture Shinjuku-ku, Tokyo	Prof. Y. Nakajima	Réservoirs de chaleur ; théorie et expériences
	Osaka Institute of Technology Department of Mechanical Engineering Asahi-ku, Osaka	Prof. Y. Saito	Combinaison expérimentale de plaque collectrice et de foyer collecteur
	Tokyo Metropolitan University Department of Architectural Engineering Setagaya-ku, Tokyo	Prof. N. Ito	Bibliographie relative au chauffage, à la climatisation et à l'approvisionnement en eau chaude solaires
	University of Tokyo Sogoshikenjo School of Engineering Bunkyo-ku, Tokyo	Prof. Y. Matsuo	Solarimétrie ; mesure et théorie des charges de chauffage et de climatisation de bâtiments
REPUBLIQUE DU MALI	Solar Energy Laboratory Bamako	I. Touré, Directeur	Solarimétrie , réfrigération par absorption
NIGER	Office de l'énergie solaire Organization nigérienne de l'énergie solaire Niamey	Dr. Abdou Moumouni, Directeur Abdoulaye Hima, Technicien	Pompes à eau ; chauffe-eau
NIGERIA	University of Ife Ile-Ife	Dr. V. A. Williams	Photovoltaïques
	University of Lagos Department of Mechanical Engineering Lagos	Dr. S. O. Adenubi Dr. V. A. Akinsete	Solarimétrie ; plaques collectrices ; chauffe-eau solaires ; séchage de récoltes

NOUVELLE-GUINEE–PAPOUASIE	The Papua New Guinea University of Technology Department of Electrical Engineering Faculty of Engineering P. O. Box 793 Lae	Prof. J. L. Woodward	Pompes simples et béliers hydrauliques ; roues à eau ; génératrice électrique à petite échelle ; chauffe-eau ; réfrigération solaire ; chauffe-eau
		Prof. J. C. V. Chinappa	Réfrigération solaire
NOUVELLE-ZELANDE	Dominion Physical Laboratory Department of Scientific and Industrial Research Physics and Engineering Laboratory Private Bag, Lower Hutt	Dr. R. F. Benseman	Chauffe-eau et distribution du rayonnement solaire
PAKISTAN	Pakistan Council of Scientific and Industrial Research (P.C.S.I.R.) Labs. Kemal Ataturk Road, PPI Building Karachi	Directeur, Programme d'énergie solaire et éolienne	Pompes à eau ; séchage de récoltes ; complexe intégré (cultures/eau/énergie) éoliennes ; chauffage de bâtiments
PAYS-BAS	Eindhoven University of Technology Laboratory for Fluid Mechanics Eindhoven	Ir. P. T. Smulders	Energie éolienne pour les pays en voie de développement
	Mechanical Engineering Department	Prof. Ir. C. W. J. von Koppen	Production d'énergie hydro-électrique à partir de génératrices à turbine centrifuge pour faible charge d'eau, de type Banki, pour les pays en voie de développement ; réfrigération solaire
	Chemical Engineering Department	Ir. S. P. Bertram	Fermentation de matériaux organiques pour la production de méthane (pour les pays en voie de développement)

PAYS	Institution/Organisme/Adresse	Responsables	Domaines d'activités
	Koninklijk Institut voor de Tropen Department of Product Research Mauritskade, Amsterdam	Ir. F. W. Korthals Altes	Séchoirs solaires
	Ingenieursbureau Dwars Hederick en Verhey Laan 1914 35, Amersfoort	Ir. H. Deibel	Evaporateurs solaires
	Organization for Industrial Research TNO P. O. Box 406 Delft	Ir. P. van Staveren	Exploitation de l'énergie éolienne
	University of Technology Enschede	E. Odijk	Energie solaire, énergie éolienne
		Prof. W. P. M. van Swaay	Gazéification du bois
	Foundation TOOL (Technische Ontwikkeling Ontwikkelingslanden) P. O. Box 525 Eindhoven		Coordination de projets dans le cadre du développement de la technologie énergétique à petite échelle pour les pays en voie de développement
PEROU	Instituto de Investigaciones de Aplicaciones de la Energía Solar (INAES)	Dr. Maximiliano Duran Dr. Casio Ore Ing. Alfredo Oliveros Prof. Alejandro Duran	Fourneau solaire (pas de renseignements certains sur les activités actuelles de l'Institut)
ROYAUME-UNI	University College Solar Energy Unit Department of Mechanical Engineering P. O. Box 97 Cardiff	Dr. B. J. Brinkworth	Utilisation de l'énergie solaire à des fins commerciales, agricoles et industrielles

	College of Technology Department of Mechanical Engineering Brighton, Sussex	Dr. J. C. McVeigh	Plaques collectrices
	Electrical Research Association Cleve Road Leatherhead, Surrey KT22 7SA	A. H. Stodart, Directeur général Industrial Services Division	Energie éolienne
	University of Reading Department of Engineering and Cybernetics Whiteknights, Reading RG6 2AY	Prof. P. D. Dunn	Pompes hydrauliques à piston ; moteurs Stirling ; éoliennes ; appareils de chauffage solaires ; production de méthane
	University of Sheffield Department of Building Science Sheffield	Prof. J. K. Page, Directeur	Estimation de l'insolation directe ou diffusée sur des surfaces verticales ou inclinées à partir de la radiation reçue par des surfaces horizontales
	Intermediate Technology Development Group Ltd. Parnell House, 25 Wilton Road London SW1V 1JS	George McRobie, Directeur (Communications)	Source d'information sur les énergies éolienne, solaire et hydraulique, publie la revue trimestrielle "Appropriate Technology"
SENEGAL	Université de Dakar Institut de physique météorologique H. MASSON Faculté des sciences Dakar-Fann	Prof. Djibril Fall	Plaque collectrice ; moteur solaire ; chauffe-eau ; séchoir solaire
	Centre national de la planification de la recherche scientifique et technologique	Dr. Assad Takla	Pompes solaires ; réduction de coûts
SRI LANKA	University of Ceylon Peradeniya	Dr. N. S. Wijesundere, Professeur de génie mécanique	Chauffe-eau

PAYS	Institution/Organisme/Adresse	Responsables	Domaines d'activités
	Central Electricity Board	Dr. K. Ghanalingam	Piles CdS pour pompage de l'eau
	University of Ceylon Colombo Campus 61 Abdul Caffoor Mawatha, Colombo-3	Prof. K. Kularatnam	Extraction de sel et de minéraux à partir de l'eau de mer
SUEDE	Chalmers Institute of Technology Department of Geology Fack S-402 20 Goeteborg 5	Prof. K. G. Eriksson	Chauffage géothermique
	The Lund Institute of Technology Division for Building Construction Fack S-220 07 Lund	Prof. Bo Adamson	Chauffage et climatisation solaires
	State Power Board Fack S-162 87 Vaellingby	Benat Nordstroem	Génération d'énergie hydro-électrique ; production d'énergie éolienne
	Swedish Board for Technical Development Fack S-100 72 Stockholm 43	Olle Ljungstroem	Production d'énergie éolienne
	Svensk Kaembraenslefoersoerjuings AB Fack S-102 40 Stockholm	Ingemar Lindholm	Chauffage et climatisation solaires
	Royal Institute of Technology Department of Building Technology Fack S-100 44 Stockholm 70	Prof. Ingemar Hoeglund	Chauffage et réfrigération solaires

	Department of Chemical Technology	Prof. Olle Lindstroem	Pyrolyse de déchets et production de méthanol (pour être utilisé comme combustible)
THAILANDE	Asian Institute of Technology Division of Community and Regional Development P. O. Box 2754 Bangkok	Dr. R. H. B. Exell	Rayonnement solaire en Thaïlande ; distillation solaire de l'eau ; pompe d'eau solaire ; réfrigération solaire
		Dr. P. A. Cowell	Pompe à eau solaire
	Division of Environmental Engineering	Dr. Maung Nay Htun	Distillation solaire
	King Mongkut Institute of Technology Mechanical Engineering Department 91 Pracha Uthit Road Rachaburana	Dr. Prida Wibulswas Ken Cooper	Chauffe-eau solaires
TRINIDAD	University of the West Indies Department of Mechanical Engineering Faculty of Engineering St. Augustine	Dr. Suppramaniam Satcunanathan, Directeur de la Faculté	Evaporateurs solaires ; chauffage de l'air ; chauffe-eau ; séchage de récoltes ; réfrigération/climatisation
	University of the West Indies St. Augustine	Oliver St. C. Headley, Faculté de chimie	Séchage de récoltes solaire ; plaques collectrices ; évaporateurs solaires
TURQUIE	Middle East Technical University Ismet Inonu Bulvari Ankara	Dr. M. Kudret Selçuk (adresse actuelle ; Jet Propulsion Laboratory, Bldg 277, Rm. 202, Pasadena, Calif. 91103, U.S.A.) Prof. M. Akyrut	Solarimétrie ; propriétés thermiques de serres en milieu contrôlé ; moteurs thermiques ; séchage de récoltes
URSS	Ministry of the Electrical Engineering Industry Moscow	A. P. Landsmann	Génératrices photo-électriques

PAYS	Institution/Organisme/Adresse	Responsables	Domaines d'activités
	Power Engineering Institute *imeni* G. M. Krzhizhanovskiy Solar Energy Laboratory Leninskiy Prospekt 19, Moscow	Dr. Yuriy Nikolayevich Malevskiy, Directeur Dr. Sergey M. Lukomskiy Dr. Rafael Rafaelovich Aparisi Dr. Dmitriy Ivanovich Teplyakov Dr. Boris Arnol'dovich Garf	Evaporateurs solaires ; réfrigération par absorption ; génératrices thermo-électriques ; thermopompes ; collecteurs et concentrateurs ; fourneaux
	All Union Institute for Research in Solar Technology Leninskiy Prospekt 19, Moscow	Dr. B. V. Petukhov	Pompes solaires
	All Union Scientific Research Institute of Sources of Current Solar Energy Laboratory Moscow	Dr. Nikolay Stepanovich Liorenko, Directeur Dr. B. V. Tarnishevskiy	Pompes solaires ; photovoltaïques ; enduits de surfaces
	Turkmen Physico-Technical Institute Ashkhabad, Turkmen SSR	Dr. Aman Kh. Khanberdiyev Dr. R. Bairamov	Evaporateurs solaires ; réfrigération ; génératrices thermo-électriques ; photovoltaïques
ZAMBIE	University of Zambia P. O. Box 2379 Lusaka	Prof. J. M. K. Dake	Nappes d'eau solaires

Annexe 2
Fabricants de dispositifs pour le chauffage et la réfrigération solaires

(Cette liste est probablement incomplète ; elle représente toutefois les meilleures données qu'ait pu rassembler le personnel de la NAS au moment de la publication. Bien que celle-ci vise à présenter uniquement les organisations s'occupant actuellement de la commercialisation de dispositifs d'énergie solaire, il se pourrait que quelques-unes des sociétés qui y figurent ne soient pas encore arrivées au stade de commercialisation.)

Pays	Sociétés	Responsables	Produit ou domaines d'activités
REPUBLIQUE FEDERALE D'ALLEMAGNE	Dornier System GmbH Postfach 1360 7990 Friedrichshafen	K. Kögler, Chef, Dept. de Thermodynamique Dr. H. Reiche, Commercialisation	Appareils pour la déssalinisation de l'eau de mer transportée par des tuyaux chauffés à l'énergie solaire ; chauffage et refroidissement de l'eau ; production d'électricité
	AEG-Telefunken Abteilung Raumfahrttechnik und Neue Technologien 2000 Wedel, Industriestrasse	S. Korius H. Manthey	Petites piles solaires
AUSTRALIE	Braemar Engineering Co., Ltd. Bilsen and Zillmere Roads Geebung 4034 Queensland	—	Plaque collectrice en cuivre et systèmes de chauffe-eau
	Turbon Engineering Pty., Ltd. 12 Bailey Street West End, Brisbane 4101 Queensland	—	Plaque collectrice en cuivre et systèmes de bacs chauffe-eau
	Sola-ray Appliances 6 Boag Road Morley 6062 Perth	—	Plaque collectrice en cuivre et systèmes de bacs chauffe-eau
	S. W. Hart and Co., Pty., Ltd. 112 Pilbara Street Welshpool, W. A. 6106	—	Plaque collectrice en cuivre et systèmes de bacs chauffe-eau
	Smalls Sola Heeta Co., Pty., Ltd. 10 Goongarrie Street Bayswater, W. A. 6053	—	Plaque collectrice en cuivre et systèmes de bacs chauffe-eau

	Beasley Industries Pty., Limited Bolton Avenue Devon Park, South Australia 5008	—	Plaque collectrice en cuivre et systèmes de bacs chauffe-eau
CHILE	Compañía Química y Minera de Chile Departamento de Investigaciones Científicas Santiago	—	Nappes d'eau d'évaporation solaire
	Compañía Anglo-Lautaro Santiago	—	Etangs d'évaporation solaire ; production de sulfate de soude
ETATS-UNIS	Thermo Electron Corporation Waltham, Massachusetts	Jerry P. Davis	Moteur cyclique "Rankine" pour des sources de chaleur de basse température
	Sunwater Company 1112 Pioneer Way El Cajon, California 92020	Horace McCracken, Pres. Ed Smith	Bacs chauffe-eau ; évaporateurs solaires ; chauffage de locaux
	SES, Inc. 70 South Chapel Street Newark, Delaware	Dr. Steven DiZio, Pres.	Piles solaires CdS/Cu_2S
	PPG Industries, Inc. One Gateway Center Pittsburgh, Pennsylvania 15222	—	Plaque collectrice. Panneau à double revêtement d'aluminium Roll-bond®
	Kalwall Corporation 1111 Candia Road P. O. Box 237 Manchester, New Hampshire 03105	—	Plaque collectrice, à couvercles de plastique renforcé de laine de verre
	Olin Brass/Roll-Bond Products East Alton, Illinois 62024	—	Plaque absorbante en alliage d'aluminium pour plaques collectrices

Pays	Sociétés	Responsables	Produit ou domaines d'activités
	Tranter Manufacturing, Inc. 735 East Hazel Street Lansing, Michigan 48909	—	"Econocoil"–Echangeur de chaleur vendu actuellement comme absorbeur pour plaque collectrice
	Energex Corporation 5115 South Industrial Road Suite 513 Las Vegas, Nevada 89118	—	Plaques collectrices en cuivre
	U. S. Solar Corporation 6407 Ager Road West Hyattsville, Maryland 20782	—	Plaques collectrices en cuivre
	Solaron Corporation 4850 Olive Street Commerce City, Colorado 80022	John Bayless	Systèmes complets de chauffage et de climatisation solaires
	Copper Development Associates 405 Lexington Avenue New York, New York 10017	Paul Anderson	Collecteurs
	Sunworks, Inc. 669 Boston Post Road Guilford, Connecticut 06437	Everett M. Barber, Jr.	Plaques collectrices en cuivre
	E & K Service Co. 16824 74th Avenue, N.E. Bothell, Washington 98011	—	Plaques collectrices et système de chauffage pour maisons individuelles
	Free Heat P. O. Box 8934 Boston, Massachusetts 02114	—	Plaques collectrices et systèmes de chauffage pour maisons individuelles
	Garden Way Laboratories Charlotte, Vermont 05445	—	Système de chauffage par circulation d'eau chaude

Digitized by Google

Hitachi America Ltd. 437 Madison Avenue New York, New York 10022	—	Collecteur pour eau chaude de maisons individuelles
Reynolds Metals Co. Building E-A 2315 Dominguez Street Torranse, California 90509	Ingénieur responsable	Plaques collectrices ; échangeurs de chaleur ; systèmes de tubulures
Solar Power Corporation 930 Clocktower Parkway Village Square New Port Richey, Florida 33552	—	Plaques collectrices
Sunsource 9606 Santa Monica Boulevard Beverly Hills, California 90210	—	Plaques collectrices
CSI Solar Systems Division 12400 49th Street North St. Petersburg, Florida 33730	—	Système de chauffage par la circulation d'eau chaude pour maisons individuelles
Energy Systems, Inc. 634 Crest Drive El Cajon, California 92021	—	Plaques collectrices
Helio-Dynamics Inc. 518 South VanNess Avenue Los Angeles, California 90020	—	Plaques collectrices, eau chaude pour habitations ; chauffage et climatisation ; réfrigération (utilisant l'énergie solaire)
Raypak, Inc. 31111 Agoura Road West Lake Village, California 91360	—	Plaques collectrices

Pays	Sociétés	Responsables	Produit ou domaines d'activités
	Piper Hydro 2895 East La Palma Avenue Anaheim, California 92806	—	Plaques collectrices ; systèmes chauffe-eau et chauffage pour habitations ; thermopompes
	Rodgers and MacDonald 3003 N.E. 19th Drive Gainesville, Florida 32601	—	Plaques collectrices ; chauffe-eau
	Solar Water Heater Co. P. O. Box 341872 Coral Gables, Florida 33134	—	Chauffe-eau ; systèmes de chauffage pour maisons individuelles
	Wilcon Corporation 3310 S.W. 7th Street Ocala, Florida 32670	—	Systèmes de chauffage par la circulation d'eau chaude, utilisant un collecteur à tuyauterie de vinyl et un fluide coloré pour témoigner du transfert de chaleur
	W. R. Robbins and Son 1401 N.W. 20th Street Miami, Florida 33142	—	Plaques collectrices
	Youngblood Co., Inc. 1085 N.W. 36th Street Miami, Florida 33127	—	Plaques collectrices pour l'eau chaude de maisons individuelles
INDE	The Tata Iron and Steel Co., Ltd. 220 Outer Circle Road Jamshedpur	M. K. Ghosh	Fourneau solaire

JAPON	Yazaki Buhin Co., Ltd. Kosai-shi, Shizuoka-ken	T. Ishibashi, Directeur technique	Réfrigération par absorption solaire ; Maison solaire de Yazaki–climatisation, chauffage, eau chaude ; fabrication de surfaces sélectives
	Yanagimachi Laboratory Meguro-ku, Tokyo	M. Yanagimachi, Président	Système de chauffage solaire assisté d'une thermopompe ; réservoir pour stockage de chaleur
	Nihon Kogyo Co., Ltd. Minato-ku, Tokyo	H. Igarashi, Directeur technique	Absorbeur sélectif en cuivre
	Toshiba Electric Co., Ltd. Kaden Research Laboratory Kawasaki-shi, Kanagawa-ken	M. Sakamoto, Ingénieur en chef H. Koizumi, Ingénieur en chef	Appareil chauffe-eau pour maison individuelle
	Showa Aluminum Co., Ltd. 480 Imuzuka, Oyama City	Y. Asano, Directeur technique	Chauffe-eau solaire, absorbeur Roll Bond®
	Kawasaki Juko Co., Ltd. Minato-ku, Tokyo	S. Fijidai, Ingénieur chercheur	Appareil de réfrigération par absorption à double effet
	Ishikawajima-Harima Juko Co., Ltd. Chiyoda-ku, Tokyo	S. Ichikawa, Directeur du projet d'énergie solaire	Appareil de réfrigération solaire à turbine au fréon
	Sanyo Electric Co., Ltd. Hirakata-shi, Osaka	K. Hinotani, Ingénieur en chef	Appareil de réfrigération solaire par absorption ; surfaces sélectives
	Takenaka Research Laboratory Koto-ku, Tokyo	K. Maekawa, Directeur technique Y. Tanaka, Ingénieur résident	Collecteurs solaires pour le chauffage et la climatisation
MEXIQUE	Circuito Novelistas 59-A, Cd-Satelite (Ed. de Mexico)	Maximo Chauvet, Ingénieur E. C. P.	Appareils chauffage

Pays	Sociétés	Responsables	Produit ou domaines d'activités
ROYAUME-UNI	Alcoa Ltd. Gowerton, Swansea	—	Echangeurs de chaleurs Roll Bond®
	Air Distribution Equipment (Midlands and West) Ltd. 64 Whitebarn Road Llanishan, Cardiff Wales	—	Collecteurs, équipement de contrôle
	Commercial Solar Energy 163 Pelham Road Sherwood, Nottingham	—	Collecteurs
	A. T. Marston & Co., Ltd. Lancaster Road Shrewsbury, Salop	—	Collecteurs "Calorsol"
	Pilkington Brothers, Limited Latham, Ormskirk, Lancashire	H. C. Agrawal, Technicien en chef Laboratoire R&D	Séchage solaire
	Production Methods, Ltd. West Arthurlie Works Barrhead, Glasgow Scotland	—	Collecteurs "Raystore"
	Rolls-Royce Technical Institute Derby Engines Division Rolls-Royce Anti-Poverty Group P. O. Box 31 Derby	—	Chauffe-eau peu coûteux
	Solar Centre 171 Ifidel Road, Chelsea London, SW10 9AF	—	Collecteurs "Sunstore"

Solar Heat, Ltd. 99 Middleton Hall Road Kings Norton Birmingham B30 1AG	—	Collecteurs "Suntrap"
Solar Water Heaters, Ltd. Pillar House 21 South Parade Doncaster, York	—	Collecteurs
Stellar Heat Systems, Ltd. Upper York House 30 Upper York Street Bristol BS2 8Q3	—	Collecteurs ; cabinet-conseil

N.B. : La United States Energy Research and Development Administration (Administration de la recherche et du développement énergétiques, Etats-Unis) ainsi que le Department of Housing and Urban Development (Département du logement et du développement urbain) préparent actuellement une compilation pour la publication d'un catalogue de produits liés à l'énergie solaire. L'objectif visé est le suivant :

"–effectuer la dissémination de renseignements parmi le grand public et dans l'industrie solaire sur les types de matériel en cours de réalisation bientôt disponibles ;

"–fournir une documentation de base sur l'état présent de la technologie immédiatement accessible par le truchement des distributeurs commerciaux ;

"–rehausser les capacités de collaboration de particuliers et d'organismes pour travailler à monter, à développer et à commercialiser des systèmes et sous-systèmes complets ;

"–établir une norme de base pour la collecte et la dissémination de données relatives à l'industrie de l'énergie solaire."

Les demandes de renseignements peuvent être adressées aux bureaux suivants :

ERDA Technical Information Center P. O. Box 62 Oak Ridge, Tennessee 37830	ou	Division of Energy, Building Technology and Standards Room 8158, Department of Housing and Urban Development Washington, D.C. 20410

Annexe 3
Fabricants de dispositifs solaires terrestres photovoltaïques

(Cette liste comprend uniquement les fabricants connus dans le domaine de la fabrication de dispositifs solaires terrestres au moment de l'élaboration du présent document. Il se peut qu'elle ne soit pas complète, mais elle représente les meilleurs renseignements que nous ayons pu obtenir jusqu'ici.)

Fabricant	Adresse Telex	Téléphone
SOLAREX 1335 Piccard Drive Rockville, Maryland 20850 U.S.A.	TWX: 710 828 7909 Cable Address: SOLAREX	(301) 948-0202
Spectrolab, Inc. Division of Hughes Corporation 12484 Gladstone Avenue Sylmar, California 91342 U.S.A.	TWX: 910 496 1488	(213) 365-4611
Iran Solar Energy Company (Affiliate of Spectrolab, Inc.) 100 Hafez Avenue, Ehansi Building Teheran IRAN	Telex: 2516 Cable Address: 688 Teheran	43530-669775-8
Ferranti Limited Electronic Components Division Gem Mill Chadderton, Oldham OL9 8NP ENGLAND	Telex 668038	061-624-6661
Centralab Semiconductor Division 4501 Arden Drive El Monte, California 91734 U.S.A.	TWX: 910 587 3429	(213) 448-4001
Solar Power Corporation 23 North Avenue Wakefield, Massachusetts 02185 U.S.A.	TWX: 710 348 7674	(617) 246-2355
Sharp Corporation Industrial Instruments Group Yamatokooriyama, Nara 639-11 JAPAN	Telex: J63428 or J63429 Cable Address: LABOMETSANKI OSAKA	
R.T.C. La Radiotechnique-Compelec 130, Avenue Ledru-Rollin 75540 Paris FRANCE	Telex: 68495	355-44-99

SPECTROLAB:
CONVERTISSEUR D'ENERGIE LUMINEUSE DE 12 VOLTS PILES MODELE L.E.C.A.

CARACTERISTIQUES

Tension de sortie nominale
12 VCC

Tension minimum de fonctionnement
14,3 VCC à une température du convertisseur LEC™ +60°C. Charge des accumulateurs au plomb typiques de 2,25 volts par élément de pile et permet une chute normale dans la diode de bloquage de 0,8 V.

Courant de sortie nominal
De 0,3 à 7,2 ampères selon le nombre et la configuration des modules types LEC™ dans l'ensemble des piles. Voir tableau. Les piles peuvent être placées en rangées parellèles pour satisfaire des besoins plus importants.

Construction
Charpente de soutien :
Eléments de charpente en aluminum tréfilé. Enduit de résine epoxy acrylique—noir.
Modules :
Modules individuels facilement remplaçables. L'ensemble des piles se nettoie de lui-même s'il est installé normalement en plan incliné.

Puissance de sortie/superficie totale de l'ensemble
6,0 Watts/pied carré

Puissance de sortie/Poids total de l'ensemble
2,0 Watts/livre poids nominal

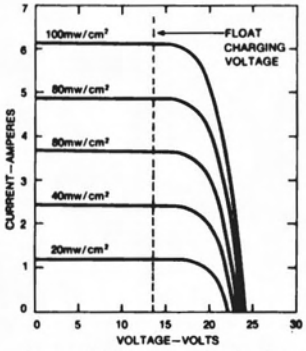
Dimensions et poids :
Se reporter au tableau.

CONDITIONS DE L'ENVIRONNEMENT

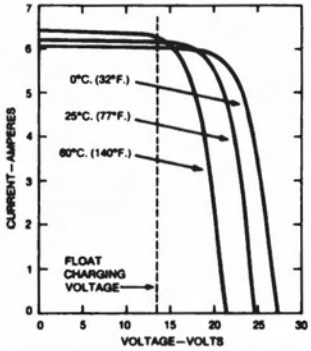
Humidité :
100 pour cent

Altitude :
Du niveau de la mer à 30.000 pieds (10.000 m).

CARACTERISTIQUES DU FONCTIONNEMENT ELECTRIQUE COURBES TYPIQUES DE COURANT/VOLTAGE



Courant de la pile en fonction du voltage selon les diverses intensités de lumière. Pile 12V 6A. Température de la pile 60°C.



Caractéristiques de voltage et température LEC. Pile 12V 6A. 100mw/cm² d'intensité.

Ces graphiques illustrent plusieurs faits importants :
La tension de sortie du L.E.C. monte presque immédiatement à la tension de charge constante. . . . La charge commence dès les premières lueurs du jour et continue jusqu'à la tombée de la nuit. Dans le cadre de l'application pratique, la sensibilité à la température empêche une charge sûre au point de puissance maximum . . . on doit faire fonctionner la pile pendant la partie plane de la courbe caractéristique.
La sortie du courant doit se faire à des conditions de température de 60° C dans les piles pour s'assurer que la production ne baissera pas par temps chaud.

Digitized by Google

Submersion :

Fonctionnement total assuré même après une longue période de submersion.

Vent :

Plein rendement et absence de dommage même dans des conditions de vent à 175 noeuds.

Glace et verglas :

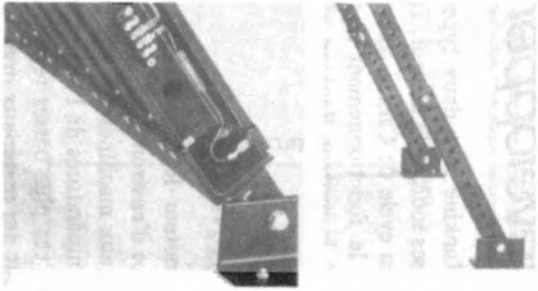
Peut tolérer une couche de verglas allant presqu'à 15 cm, 25 (6 pouces) sans subir de dommages structurels.

ACCESSOIRES

Régulateur de voltage transistorisé.

Pièces pour le montage en pile de petits assemblages.

Piles à l'acide de plomb et au nickel-cadmium à décharge automatique faible.



A gauche : *Les tubes sont protégés et renforcés par des cadres d'aluminium. Les modules sont fixés par des boulons aux deux extrémités à des traverses en cornières. Le rattachement des fils se fait rapidement et simplement. Les connecteurs superflus peuvent être retirés et le rattachement se faire rapidement.*
A droite : *Des étais extensibles "Telesper" et des pieds pivotants permettent facilement le montage sur n'importe quelle surface.*

PILES LEC (marque déposée) DE 12V. STANDARD

No. de Modèle	Dimensions approximatives en pouces (1 pouce=2cm,54)	Sortie de courant (en ampères)[1]	Heures-ampères durant conditions solaires quotidiennes variées[2]			Poids approximatif en livres
			Médiocre	Moyenne	Bonne	
12V ,3A	37 x 3 x 3	,3A	1,1	1,3	1,6	3,8
12V ,6A	37 x 6 x 3	,6A	2,2	2,6	3,1	9,3
12V ,9A	37 x 9 x 3	,9A	3,3	3,9	4,7	14,0
12V 1,2A	37 x 12 x 3	1,2A	4,4	5,2	6,3	18,6
12V 1,5A	37 x 15 x 3	1,5A	5,5	6,5	7,9	23,3
12V 1,8A	37 x 18 x 3	1,8A	6,6	7,8	9,4	28,0
12V 2,1A	37 x 21 x 3	2,1A	7,7	9,0	11,0	32,6
12V 2,4A	37 x 24 x 3	2,4A	8,9	10,4	12,6	37,3
12V 2,7A	37 x 27 x 3	2,7A	10,0	11,7	14,1	41,9
12V 3,0A	37 x 30 x 3	3,0A	11,1	13,0	15,7	46,6
12V 3,6A	37 x 37 x 3	3,6A	13,3	15,6	18,9	55,9
12V 4,2A	37 x 43 x 3	4,2A	15,5	18,2	22,0	65,2
12V 4,8A	37 x 49 x 3	4,8A	17,7	20,8	25,2	74,5
12V 5,4A	37 x 55 x 3	5,4A	20,0	23,4	28,3	83,8
12V 6,0A	37 x 61 x 3	6,0A	22,2	26,0	31,5	93,1
12V 6,6A	37 x 67 x 3	6,6A	24,4	28,6	34,7	102,4
12V 7,2A	37 x 73 x 3	7,2A	26,6	31,2	37,8	111,7

[1] Sortie de courant minimum d'après conditions spécifiées par le Test Standard (STC) Intensité = 100 mw/cm^2 ; Température = 0°C. à 60°C.

[2] Energie utilisable produite pour l'usage dans un système de production d'énergie solaire à piles-accumulateurs à l'acide de plomb, dans des conditions typiques et d'après les données de radiation solaire annuelles pour diverses régions et d'autres zones contiguës aux Etats-Unis.

FIGURE 58 Fiche signalétique pour les piles photovoltaïques commerciales (Communiquée à titre gracieux par Spectrolab, Inc.)

Digitized by Google

Annexe 4

Moteurs à combustion externe - moteurs Rankine et Stirling examinés sous l'angle de leur application comme sources d'énergie à petite échelle pour les pays en voie de développement

Les moteurs Stirling et Rankine sont deux types de moteurs à combustion externe adaptables à diverses sources de chaleur. Tous deux se fondent sur des modifications apportées au cycle de Carnot comme l'illustrent les Figures 59 et 64 ; toutefois, quand le fonctionnement se fait à des températures au-dessous de 300 à 350°C, le moteur Rankine offre un meilleur rendement thermique.

LES MOTEURS RANKINE

L'exemple classique du moteur Rankine est le moteur à vapeur bien connu d'un rendement thermique d'environ 5-15 pour cent. La présente discussion va se limiter, néanmoins, aux machines qui sont plus utiles à petite échelle et qui fonctionnent à des températures de l'ordre de celles obtenues grâce à des collecteurs solaires. Pour ces plus basses températures, on a conçu des moteurs Rankine qui utilisent des matériaux organiques à la place de l'eau, pour le fluide de travail. L'analyse suivante illustre le système d'installation typique d'une centrale électrique munie d'un moteur Rankine utilisant l'énergie solaire[1,2]. Elle se base sur les capacités actuelles de fabrication de ses diverses composantes.

Introduction

La Figure 60 représente le schéma du cycle du moteur Rankine utilisant un fluide organique et l'énergie solaire. Le système illustré montre le moteur entraînant une génératrice électrique. Toutefois, ce moteur pourrait tout aussi bien entraîner une pompe à eau ou le compresseur d'un système de climatisation.

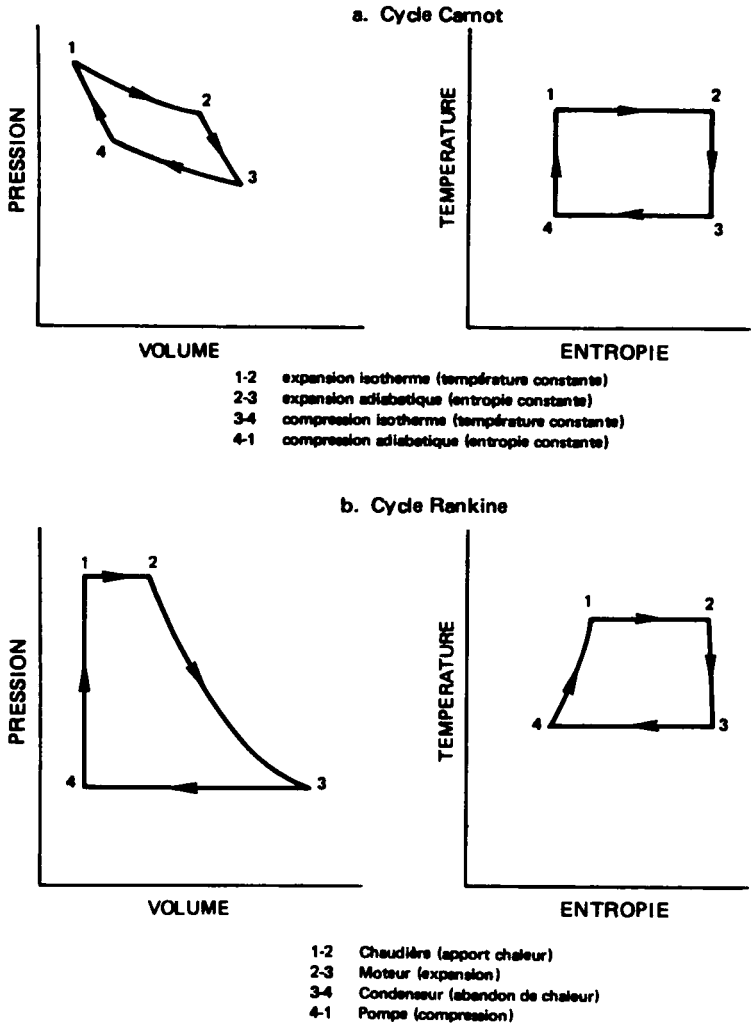


FIGURE 59 Les cycles Carnot et Rankine.

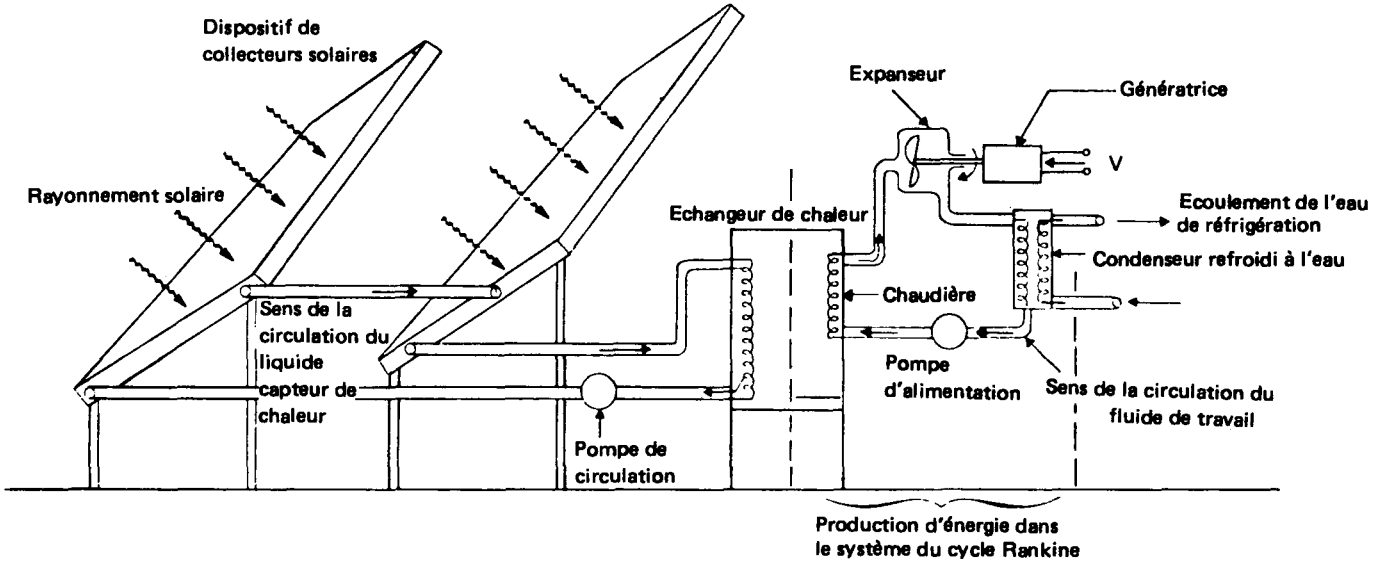


FIGURE 60 Centrale électrique solaire. [Avec l'autorisation de Arthur D. Little, Inc.]

Les moteurs Rankine utilisant une fluide organique conviennent particulièrement bien à l'utilisation de l'énergie solaire pour les raisons suivantes :

- Leur rendement thermique élevé*, même quand il fonctionne dans un milieu où la température varie de basse à modérée (80-200°C), obtenue à l'aide de collecteurs ou de plaques collectrices utilisant un pouvoir de concentration des rayons du soleil peu élevé.
- Le prix peu coûteux des pièces composantes est dû à l'utilisation de matériaux de construction courants (surtout de l'acier au carbone) et de composantes mécaniques simples. Ceci est potentiellement très important pour les pays en voie de développement, à cause de la possibilité d'employer du matériel et de la main-d'oeuvre locaux peu coûteux.
- Les moteurs Rankine à fluide organique ont une réputation de haute efficacité, étant donné leur construction hermétique qui les protège des effets nocifs du milieu (poussière, humidité, etc.).
- Puisque les fluides organiques utilisés ne gèlent qu'à des températures extrêment basses, on ne rencontre pas le genre de problèmes habituellement dûs à la congélation.
- Finalement, ils s'adaptent à toute une gamme de puissance, depuis les systèmes de pompage de 1 kW jusqu' à des centrales électriques de plusieurs mégawatts.

Description et Fonctionnement du Système

Ce moteur comprend quatre parties principales :

- expanseur
- chaudière
- pompe d'alimentation
- condenseur.

En cours de fonctionnement, le fluide de transfert thermique (typiquement de l'eau sous pression) coule à travers l'appareillage de collecte et est chauffé à des températures variant entre 100° et 200°C selon la configuration du collecteur solaire, la force de rayonnement et les conditions de marche de la machine. (Ceci nécessiterait un système capable de fonctionner à une pression d'environ 16,5 kg/cm^2.)

Ce fluide très chaud est alors utilisé pour transformer en vapeur le fluide de travail à l'intérieur d'un échangeur de chaleur ; un certain nombre de

*60-70 pour cent du rendement idéal, étant donné la chaleur d'arrivée et la température de l'échappement.

fluides de réfrigération courants peuvent très bien s'utiliser dans la boucle de la machine. Le fluide de travail arrivé à une haute température et à une haute pression va alors entraîner l'expanseur de la machine Rankine. Pour des applications où l'on veut une puissance plus élevée, (de plus de 100 kW), l'expanseur sera une turbine. Des systèmes de puissance moins élevée peuvent utiliser ailettes. A la sortie de l'expanseur, la vapeur du fluide de travail est condensée et le liquide est renvoyé par une pompe à l'échangeur de chaleur rattaché aux collecteurs solaires, et le circuit est ainsi bouclé.

Estimations du Fonctionnement des Systèmes

Pour estimer l'efficacité générale d'un système, il convient d'analyser l'efficacité de ses composantes principales.

EFFICACITE DU MOTEUR

L'efficacité du moteur dépend à la fois de l'efficacité idéale du système à l'étude (en présumant à 100 pour cent l'efficacité de l'expanseur) et de l'efficacité réelle des principales composantes du système, comme l'expanseur et la pompe d'alimentation. Des essais effectués par un certain nombre de compagnies, sur une variété de possibilités de combinaisons de pièces, ont révélé que, dans le cadre de la technologie actuelle, il était possible d'obtenir les pourcentages d'efficacité suivants :

- expanseur–70-85 pour cent
- pompe d'alimentation–70-93 pour cent.

L'efficacité de la machine, calculée sur la base de l'efficacité de l'expanseur à 80 pour cent et de celle de la pompe d'alimentation à 80 pour cent, indique qu'il est possible d'atteindre environ 65 pour cent de la capacité idéale Carnot quand la machine fonctionne dans la gamme des températures appropriées. Les chiffres des efficacités de la machine correspondantes, fonctions des températures à la prise de chaleur et à l'abandon de chaleur, sont indiqués en Figure 61. Ce graphique montre que l'efficacité du moteur thermique s'accroît si la température de prise de chaleur augmente et si la température d'abandon de chaleur diminue. La température de 50°C au point d'abandon de chaleur est considérée typique pour la réfrigération de l'air ; une de 40°C pour le refroidissement de la vapeur et 30°C pour le refroidissement de l'eau. L'effet de la température du condenseur est particulièrement important, surtout pour les machines fonctionnant à des températures plus basses (95°C) de prise de chaleur, fournissant ainsi de puissants arguments pour l'utilisation de la réfrigération par l'eau, si l'eau est disponible (comme dans le cas d'applications du pompage de l'eau).

RENDEMENT ANNUEL DU COLLECTEUR

On peut utiliser les deux types de collecteurs (qui concentrent on non les rayons du soleil) comme sources de chaleur pour les machines du cycle Rankine à fluide organique. Les plaques collectrices (les collecteurs qui ne concentrent pas les rayons) vont nous servir d'exemple pour démontrer l'effet des caractéristiques des collecteurs de chaleur sur le fonctionnement d'ensemble du système, pour les raison suivantes :

- Les plaques collectrices présentent l'avantage de pouvoir très bien fonctionner, même si elles sont montées en position fixe. Ces collecteurs et leur charpente de soutien constituent donc des structures simples, un avantage qui n'est pas négligeable dans des régions écartées.
- Les plaques collectrices peuvent utiliser le rayonnement du soleil direct ou indirect, ce qui les rend appropriées pour une grande variété de régions géographiques et des conditions variées de climat.
- La technologie des plaques collectrices est en progrès, en conséquence de projets lancés par les industries et par les gouvernements pour développer des systèmes de chauffage et de réfrigération solaires (particulièrement aux Etats-Unis).
- Les machines de cycle Rankine à fluide organique peuvent efficacement utiliser des températures s'étageant de basses à modérées, que peuvent créer les plaques collectrices.

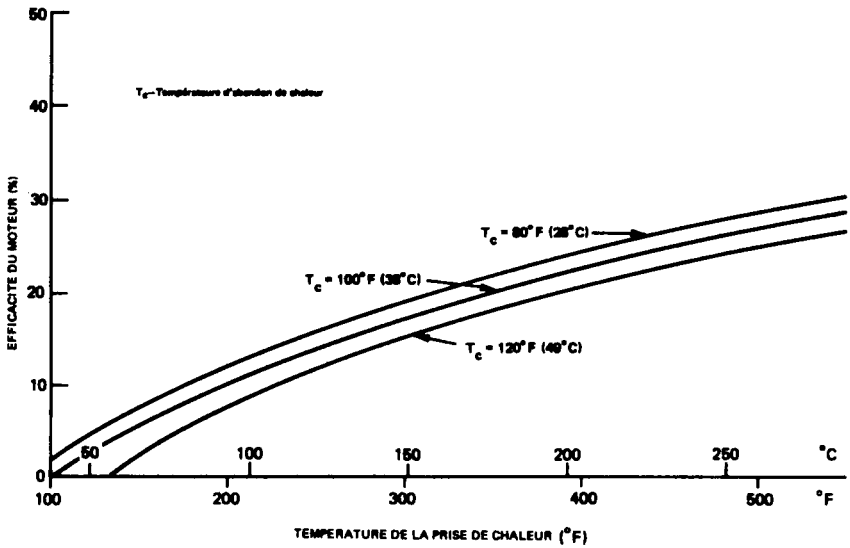


FIGURE 61 Efficacité du moteur thermique en fonction de la température pour un moteur fonctionnant à 65 pour cent de l'efficacité Carnot. [Avec l'autorisation de Arthur D. Little, Inc.]

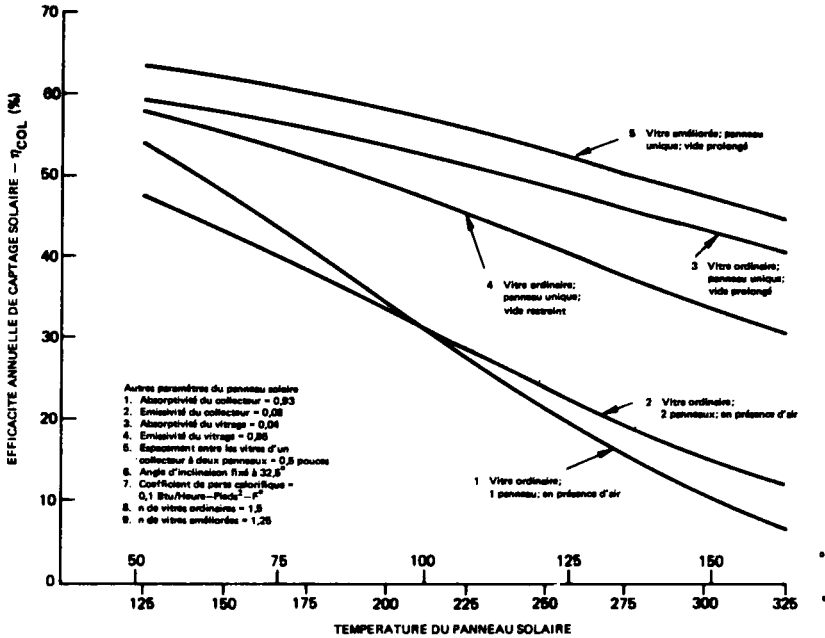


FIGURE 62 Rendement annuel du collecteur solaire en fonction de la température du collecteur (pour Yuma, en Arizona). [Source: Bartoszek, *et al.*, Réf. 2]

Si on veut évaluer les caractéristiques de fonctionnement de la combinaison collecteurs/machine, c'est être tout à fait réaliste que d'utiliser les chiffres des moyennes annuelles de l'efficacité des collecteurs comme mesures de fonctionnement du collecteur, plutôt que les chiffres indiquant son efficacité au milieu du jour (c'est-à-dire dans des conditions de rayonnement solaire élevé), comme le fait souvent la documentation publiée sur le sujet.

Les courbes qui résultent des calculs[2] sur l'efficacité annuelle des collecteurs dans une région aride située à une latitude de 32.5°N. pour une variété de collecteurs solaires inclinés (à 32,5° sur l'horizon) en position fixe montrent que l'efficacité des collecteurs peut beaucoup varier, selon les paramètres de l'assemblage des collecteurs (Figure 62). Toutes les courbes indiquées supposent que la plaque absorbante aura reçu un revêtement selon le choix approprié. (Un collecteur qui, ainsi que ses deux plaques de couverture, aurait recu un enduit noir ferait preuve d'un niveau d'efficacité d'environ 10 pour cent de moins que celle qu'indique la courbe 1.)

Comme l'indique le graphique, on peut grandement améliorer l'efficacité d'un collecteur en supprimant d'une manière ou d'une autre la convection entre la plaque absorbante et la ou les plaques de couverture, afin d'éliminer

les pertes en cours de transfert de chaleur dues à la convection. La Figure 62 indique l'utilisation d'un vide partiel ; des résultats semblables, cependant, peuvent être obtenus en utilisant des structures cellulaires (en nid d'abeilles).

La courbe 5 indique les améliorations qui seraient réalisées en utilisant des enduits ou traitements de surfaces anti-réfléchissants sur le glacis pour réduire les pertes en cours de transmission. Les avantages d'un enduit anti-réfléchissant seraient même plus grands pour les collecteurs d'un moins bon fonctionnement, représentés par les courbes 1 et 2.

EFFICACITE DU SYSTEME

L'efficacité générale du système qui, dans une large mesure, est le facteur déterminant les caractéristiques des collecteurs, se définit ainsi :

$$\eta_s = \eta_e \times \eta_c$$

quand

η_s = efficacité thermique générale du système
η_e = efficacité thermique du moteur
η_c = efficacité du collecteur

Puisque l'augmentation de la température dans le collecteur résulte en une augmentation de l'efficacité du moteur et en une diminution de l'efficacité du collecteur, il existe une gamme de températures de fonctionnement optimum pour chaque combinaison possible de moteur/collecteur. La variation dans l'efficacité annuelle du système est illustrée à la Figure 63 pour les collecteurs de la Figure 62. L'efficacité du moteur, utilisée pour les calculs qui ont permis d'établir les courbes de la Figure 63, correspond à la courbe représentée en Figure 61 où le condenseur fonctionne à 38°C.

Ainsi qu'il l'a été indiqué, les niveaux des moyennes annuelles d'efficacité sont d'environ 3,5 pour cent pour les collecteurs sans suppression du vide et 6,5 pour cent à 9 pour cent, lorsque les collecteurs qui utilisent la suppression du vide sont utilisés. On doit noter toutefois que le niveau maximum d'efficacité de ces systèmes dans les conditions du rayonnement solaire élevé de midi serait beaucoup plus élevé (∿ 50 pour cent) que ceux indiqués à la Figure 63. (Ces chiffres sont approximatifs ; pour un modèle et une application donnés, on peut calculer plus exactement le rendement attendu.)

Comparaison Avec des Moteurs de Cycles Différents

La chaleur produite par l'ensemble des collecteurs solaires peut, en principe,

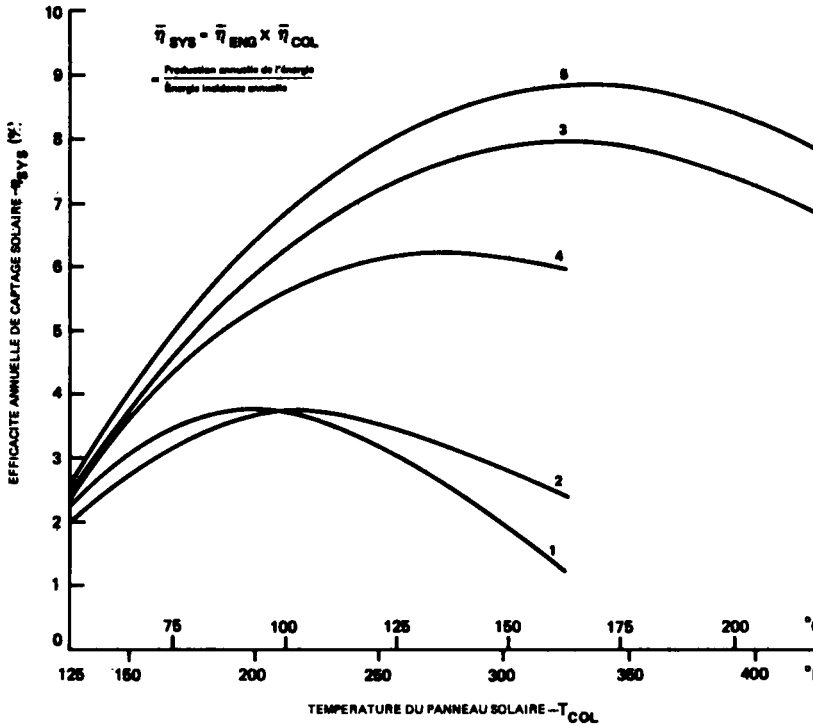


FIGURE 63 Rendement annuel d'ensemble du système et ses variations selon les températures de captage solaire. [Source: Bartoszek, *et al.*, Réf. 2]

être utilisée pour faire fonctionner toute forme de moteur thermique, y compris :

- le moteur Stirling
- le moteur Rankine (qui utilise l'eau)
- la machine Rankine (qui utilise des fluides organiques)
- la machine Ericsson
- la machine Brayton à circuit fermé
- la machine compound.

On a suggéré l'utilisation de toutes ces machines dans les systèmes d'énergie thermique solaire. Toutefois, il est très difficile de faire fonctionner efficacement des moteurs à gaz (type Stirling, Ericsson, Brayton) à de basses températures (100-180°C) reliés à des ensembles de plaques collectrices utilisant une basse concentration solaire, même si l'efficacité idéale des moteurs Stirling et Ericsson atteignait l'efficacité de Carnot. A ces températures de

prise de chaleur relativement basses, la force de compression obtenue dans le cycle à gaz se rapproche de la force d'expansion, si bien que le rendement net dépend beaucoup de l'efficacité des processus de compression et d'expansion. Même dans le cas de différentes basses températures de fonctionnement, l'efficacité du moteur Rankine reste élevée (60-70 pour cent de l'efficacité idéale de Carnot). Ceci est dû au fait que le pompage représente un pourcentage relativement réduit du travail d'expansion.

Si l'assemblage de collecteurs utilisé peut fonctionner à des températures élevées (550°C ou plus), les moteurs utilisant le cycle d'un gaz pourraient cependant constituer une solution très intéressante qui mériterait d'être examinée.

MACHINES STIRLING

Au contraire des machines Rankine, les moteurs Stirling sont des moteurs thermiques à combustion externe qui utilisent l'air ou d'autres gaz comme fluide actif. Il peuvent fonctionner à partir de n'importe quelle source de chaleur, y compris le soleil, le bois, le charbon ou les déchets de la nutrition des animaux dans les champs. Inventés en 1816 par Robert Stirling, ils firent concurrence aux moteurs à vapeur de l'époque, particulièrement dans les domaines de l'efficacité du combustible et de la sécurité qu'il offrait. (La Figure 64 illustre le cycle de base Stirling.) Au début des années 1900, plusieurs milliers de ces machines se sont vendues sous la forme de machines à pomper l'eau brûlant du charbon, qui produisaient un courant de 50 à 500 watts avec une efficacité thermique dans l'ensemble d'environ 2 pour cent[3]. Ces pompes utilisaient l'air à la pression atmosphérique pour leur fluide actif, et la partie chauffante était en fonte. En conséquence, c'étaient de très grandes et de très lourdes machines en comparaison de l'électricité qu'elles produisaient. Toutefois, elles étaient exceptionnellement silencieuses, durables, de fonctionnement et d'entretien faciles ; elles ont disparu seulement lorsque l'électrification s'est généralisée dans les années 20[4].

Vers la fin de la deuxième Guerre mondiale, un effort intensif de développement s'est déclenché, qui a eu pour résultat les moteurs Stirling de nos jours, puissants, efficaces et silencieux, destinés à l'industrie automobile (Figures 65 et 66). Il reste toutefois à résoudre un certain nombre de graves problèmes de conception avant de pouvoir commercialiser ces gros moteurs.

En conséquence, étant donné la disponibilité quasi-universelle et le très bas prix des moteurs à combustion interne, et outre les problèmes précités, le moteur Stirling classique à vilebrequin reste dans les laboratoires de développement, plutôt que sur les routes ou dans les chantiers. Aucune machine de ce type, pouvant produire plus de quelques watts, n'est actuellement commercialisée.

Moteurs Stirling à Piston Libre

Les difficultés pratiques que comporte la fabrication de moteurs Stirling à vilebrequin ont conduit au développement d'une grande variété de moteurs Stirling à piston libre et à mouvement linéaire qui, bien que fonctionnant d'après le même principe que les moteurs à vilebrequin (Figure 67), évitent un bon nombre de leurs problèmes. En outre, leur conception facilite la fabrication de modèles réduits. L'énergie est exploitée à partir de ces moteurs à l'aide de diverses pompes à mouvement linéaire ou d'alternateurs[5]. Il importe de souligner que *tous ces modèles sont actuellement en cours de développement* et ne sont pas encore commercialisés en quantités industrielles, facteur qui pourrait permettre d'obtenir un coût de fabrication réaliste. Ces moteurs sont actuellement à l'étude aux Etats-Unis sous les auspices de la United States Energy Research and Development Administration (Bureau de la recherche et du développement pour l'énergie des Etats-Unis) (centrale spatiale), les National Institutes of Health (Instituts Nationaux de la Santé) (coeurs artificiels) et l'American Gas Association (Association du gaz américaine) (climatiseur à gaz). Certains groupes privés s'occupent aussi du développement de certains de ces appareils.

Les Figures 68 à 71 illustrent divers moyens d'obtenir de l'énergie à l'aide de moteurs à mouvement linéaire. Tous ces moteurs ont été construits en prototypes et ont bien fonctionné. La pompe à inertie (Figure 68) est actuellement en fabrication aux Etats-Unis, aux fins d'une utilisation commerciale ultérieure dans un système de climatisation à gaz, selon lequel le moteur à piston libre Stirling (FPSE) entraîne une pompe à inertie qui envoie du fréon 12 dans un circuit de réfrigération classique. Lorsque des températures plus basses sont requises pour la congélation de produits alimentaires, une machine encore plus simple peut être utilisée. Dans ce cadre, un moteur thermique FPSE entraîne une pompe thermique FPSE ; cette combinaison est dynamiquement équilibrée, hermétiquement fermée ; il résulte de cette très simple construction que la machine est probablement la plus sûre et la moins coûteuse de celles qui combinent moteur et pompe à inertie.

La moteur à cylindre libre, illustré à la Figure 69, qui fonctionne à partir d'énergie solaire concentrée par une lentille Fresnel, est une variante du moteur FPSE.

Un moteur à piston libre/alternateur linéaire est en cours de développement aux Etats-Unis, dans le cadre d'un projet financé par la Energy Research and Development Administration. Ce projet vise à créer une centrale électrique spatiale de grande longévité d'une puissance de 1 kW, chauffée par un isotope radio-actif. Le moteur à alternateur linéaire pourrait fonctionner à l'énergie solaire, soit à haute température en utilisant un collecteur qui con-

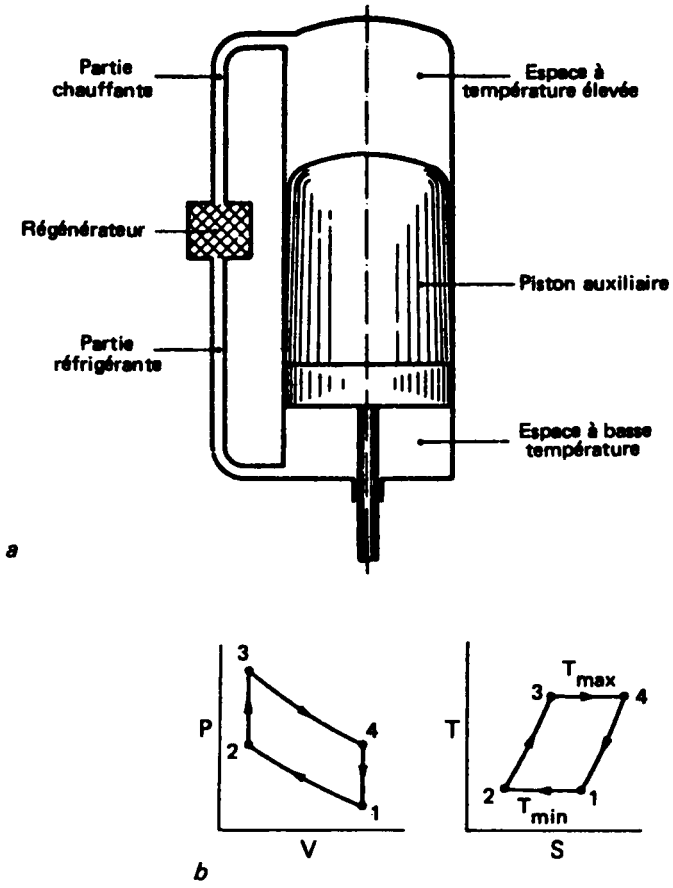
centrerait les rayons du soleil, soit à la basse température des plaques collectrices. L'utilisation de plaques collectrices pour faire fonctionner une pompe à diaphragme FPSE fait l'objet du schéma à la Figure 70. Si on utilise la plaque, il conviendrait mieux de condenser des fluides de travail plutôt qu'un gaz idéal, puisque les premiers ont un rendement cyclique plus élevé[6].

Moteur à Diaphragme

Une variation particulièrement attrayante dans le domaine de la production d'énergie électrique est illustrée à la Figure 71[7]. Cette machine utilise des diaphragmes et des ressorts sans garnitures ou fermetures. Le piston auxiliaire est entraîné par la force transmise à partir du cylindre au piston auxiliaire par le ressort de soutien du piston auxiliaire, pendant que ce dernier oscille à une fréquence de vibration déterminée par sa masse et la rigidité du ressort de support. Puisque le mouvement du cylindre présente une différence de phase de 180° par rapport au diaphragme, il en résulte une force d'énergie positive qui s'applique au piston auxiliaire. Les prototypes actuels fonctionnent à 110 Hz et produisent environ 25 W. Il est possible d'en fabriquer de plus grandes dimensions. Certains modèles chauffés au propane et par radio-isotopes sont en exploitation. Un prototype chauffé au propane est actuellement à l'essai et fournit l'énergie électrique à la National Data Buoy du Royaume-Uni (bouée nationale rassemblant des données dans la Mer du Nord) et une machine semblable actionnant un grand phare a fait l'objet d'une démonstration commerciale à l'Exposition de l'Association internationale des administrations de phares tenue à Ottawa en août 1975. Cette machine est activement développée par l'Institut de Recherche sur l'Energie Atomique d'Harwell, en Angleterre (Atomic Energy Research Establishment) et est placée aujourd'hui sur le marché par deux firmes anglaises[8].

Moteur Fluidyne

Une des variantes les plus récentes du moteur Stirling à piston libre est la pompe "Fluidyne" actuellement en cours de réalisation à Harwell[12]. Ce moteur, dont un schéma se trouve à la Figure 72, utilise des colonnes de fluides dans des tubes pour déplacer le gaz (air) entre la région froide et la région chaude ; et pour capter l'énergie produite. Cela permet l'intégration directe dans les systèmes de pompage de l'eau.

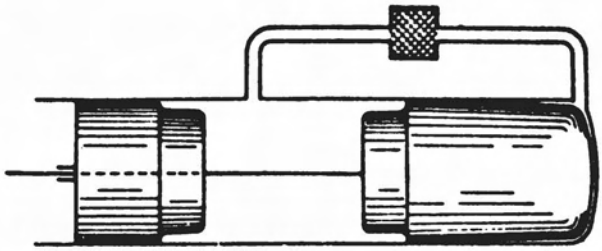


1-2 Compression isotherme au bas niveau de température.
2-3 L'apport de chaleur, sous volume constant, élevant la température du gaz à la haute température, augmente encore davantage la pression.
3-4 Expansion isotherme au haut niveau de température.
4-1 Gaz refroidi au bas niveau de température sous volume constant.

FIGURE 64 Moteur Stirling. [Avec l'autorisation de Philips Research Laboratories, Eindhoven]

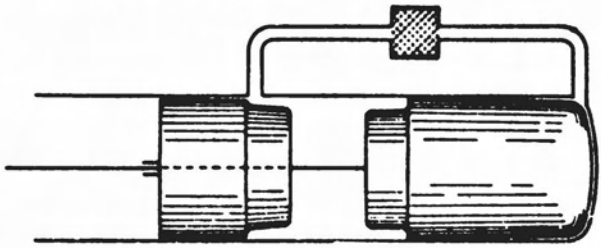
a. Principe du système à piston auxiliaire
b. Cycle thermodynamique
c. Diagramme du cycle

c



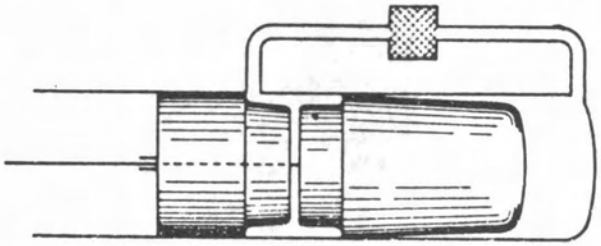
1

Piston au point mort au fond. Piston auxiliaire, au point mort supérieur. La totalité du gaz se trouve dans l'espace à basse température.



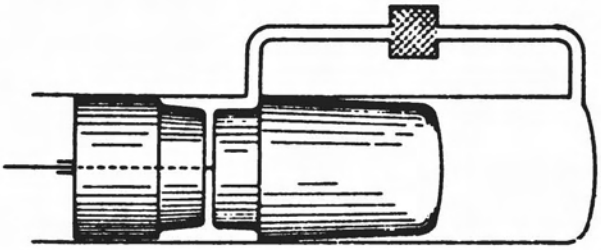
2

Le piston auxiliaire reste au point mort supérieur. Le piston a comprimé le gaz au bas niveau de température.



3

Piston reste au point mort, en haut. Le piston auxiliaire a poussé le gaz à travers la partie réfrigérante, le régénérateur, et la partie chauffante jusque dans la chambre chaude.



4

Expansion du gaz chauffé. Le piston auxiliaire et le piston simultanément au point mort inférieur. Le piston étant à l'état stationnaire, le piston auxiliaire force alors le gaz à passer par la partie chauffante, par le régénérateur et par la partie réfrigérante avant d'arriver à l'espace à haute température. Retour à la situation 1.

Digitized by Google

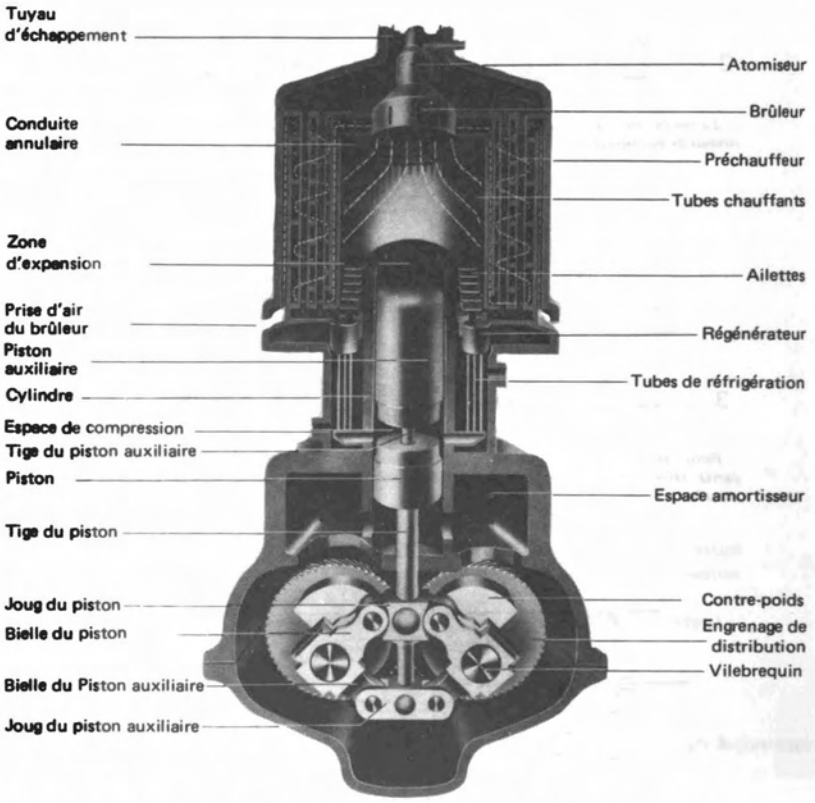


FIGURE 65 Moteur rhomboïdal Philips. [D'après: R. J. Meijer: 1970. *Philips Technical Review* 31:168-85]

Digitized by Google

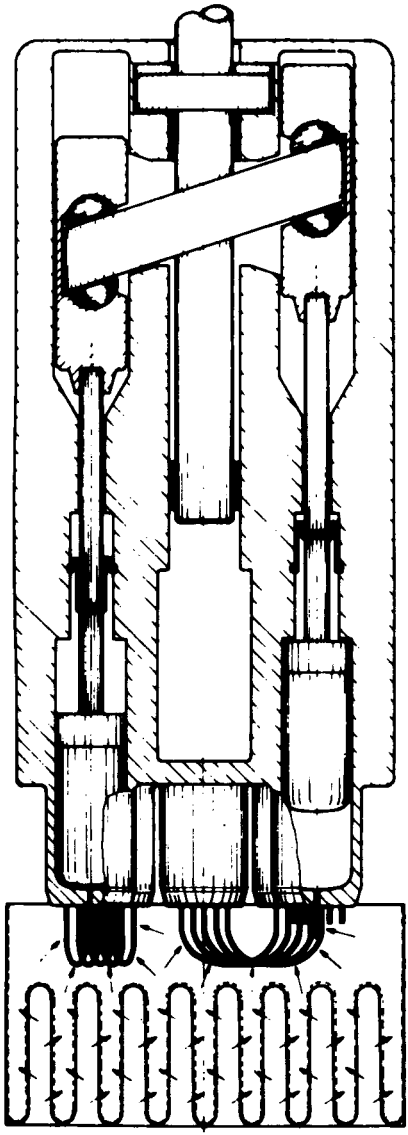
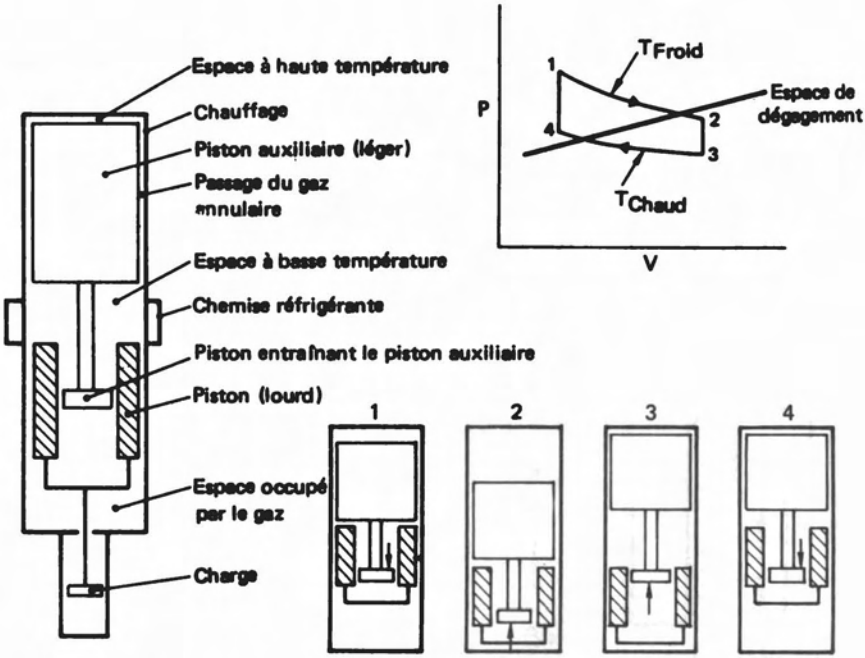


FIGURE 66 Moteur Stirling à plaque d'onde de translation. [D'après: R. J. Meijer. 1970. Philips Technical Review 31:168-85]



1-2 Le gaz de travail est dans l'espace à haute température, la pression du gaz de travail est plus élevée que la pression du gaz de rebondissement. Le gaz en expansion pousse le piston et le piston auxiliaire vers le fond. Possédant une masse moins élevée que celle du piston, le piston auxiliaire accélère plus rapidement, et vient toucher rapidement le piston; tous deux se déplacent ensemble pour comprimer le gaz.

2-3 La pression du gaz de rebondissement est plus élevée que celle du gaz de travail. La différence de pression agit sur le piston entraînant le piston auxiliaire, tandis que le gaz de rebondissement subit encore l'effet de compression du piston et entraîne le piston auxiliaire vers le haut, et pousse le gaz de travail dans l'espace à basse température. La pression du gaz de travail baisse rapidement.

3-4 La pression du gaz de rebondissement entraîne le piston vers le haut, et comprime le gaz de travail refroidi.

4-1 La hausse de pression du gaz de travail entraîne le piston auxiliaire vers le bas, renvoyant le gaz refroidi vers l'espace à haute température. La pression de l'espace de travail augmente rapidement.

FIGURE 67 Principe du fonctionnement du Moteur à piston libre Stirling. [Adapté de Beale, *et al.*, Réf. 8]

Digitized by Google

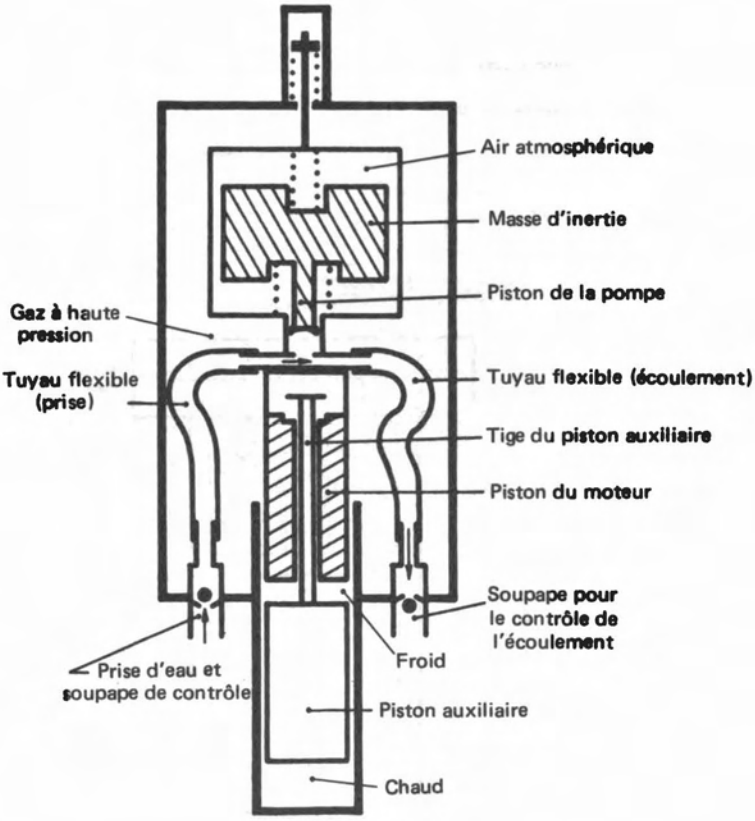


FIGURE 68 Moteur Stirling à piston libre de pompe à inertie.
[Source: Beale *et al.*, Réf. 8]

Digitized by Google

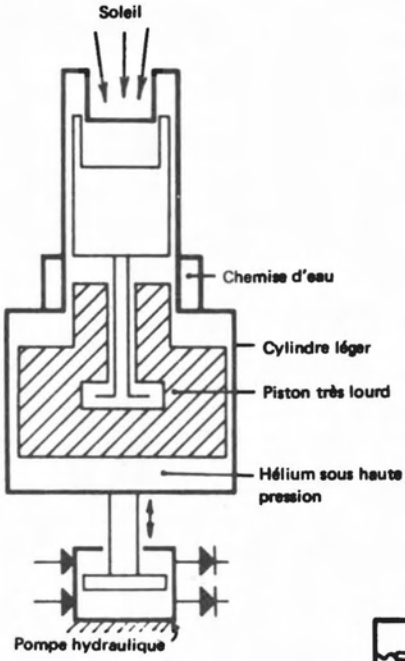


FIGURE 69 Moteur Stirling à cylindre libre. L'énergie est transmise par le cylindre qui se déplace en réaction au mouvement du piston lourd. [Source: Beale *et al.*, Réf. 8]

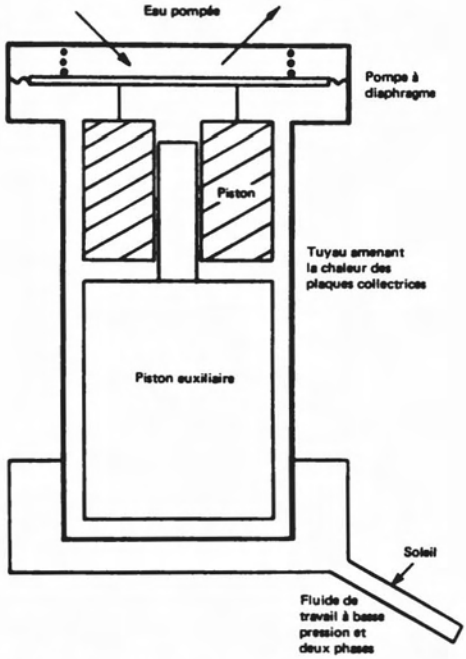


FIGURE 70 Pompe à diaphragme à moteur Stirling actionnée par plaques collectrices d'énergie solaire. [Avec l'autorisation de W. Beale]

Digitized by Google

A l'heure actuelle, les résultats suivants ont été obtenus avec certains prototypes de moteur Stirling du genre que nous avons déjà décrit ; on s'attend cependant à un meilleur rendement grâce aux travaux d'étude actuels.

Le fonctionnement d'un moteur de démonstration FPSE, illustré à la Figure 68, n'a produit au bout de 2.600 heures de service aucune détérioration de matériel ni de rendement[9]. Des composantes essentielles du moteur à diaphragme Harwell ont fonctionné pendant deux ans et demi sans panne[6].

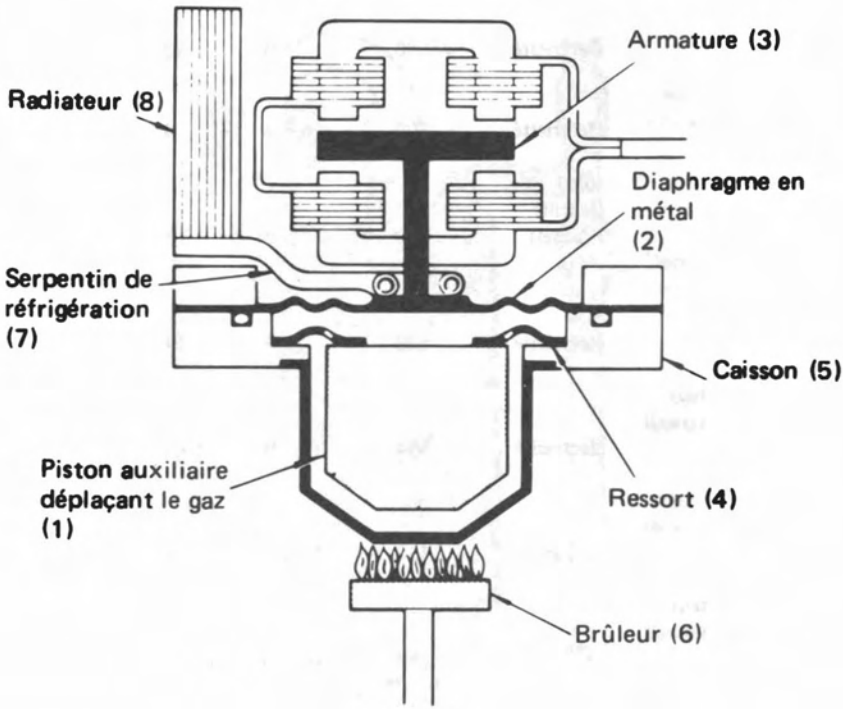


FIGURE 71 Moteur à diaphragme Harwell. [Source: Harwell Bulletin No. 74/26]

Digitized by Google

Type de Charge et Gaz de travail	Source de Chaleur	Embout Chauffé Température en degrés C	Energie obtenue	Rendement Thermique	Référence
compresseur au fréon inertie (hélium)	électricité	650	2kW	30%	9
pompe eau à inertie (air)	électricité	550	3 W	3%	9
alternateur linéaire (hélium)	électricité	600	34 W	12%	9
alternateur linéaire (air)	électricité	500	3,6 W	4%	9
pompe à eau à cylindre libre (hélium)	soleil (lentille Fresnel)	450	6 W	3,5%	9
pompe à eau à cylindre libre (hélium)	électricité	600	70 W	14%	9
moteur alternateur à diaphragme Harwell (hélium)	électricité	594	37,5 W	16,9%	10
moteur alternateur à diaphragme Harwell (hélium)	propane	450	31,8 W	10%	11
moteur alternateur à diaphragme Harwell (hélium)	Sr^{90}	280	10,7 W	7,8%	10

Deux de ces machines, l'une chauffée au propane et l'autre aux radio-isotopes, ont fonctionné pendant plus de 7.000 heures sans détérioration de matériel ni de rendement[8].

CONJONCTURE TECHNOLOGIQUE ACTUELLE

Jusqu'à présent, il n'y a guère de fabriques de moteurs Stirling. On peut toutefois construire un modèle à débit de 150 W, à piston libre pesant environ

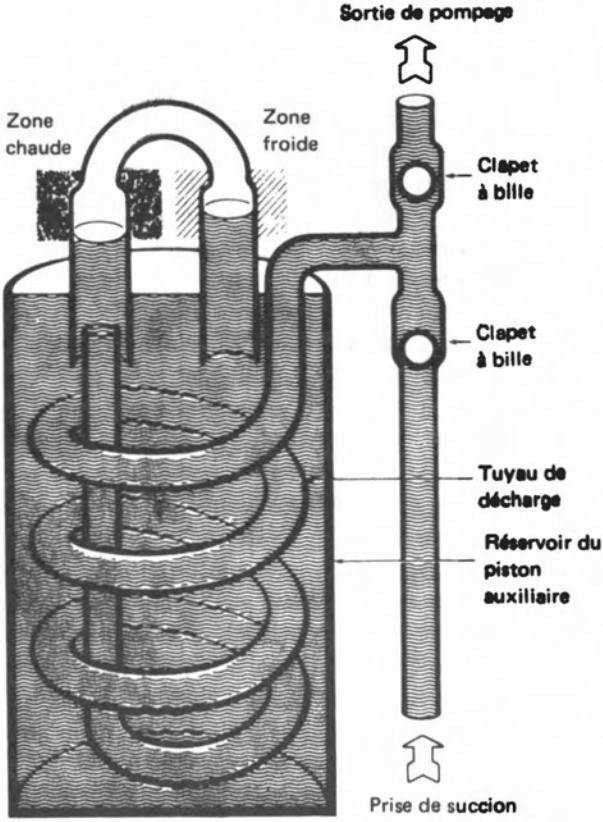


FIGURE 72 La pompe "Fluidyne" Harwell. Pendant le fonctionnement, l'air se déplace entre les zones chaudes et froides. Il en résulte une différence de pression, qui provoque un mouvement ascendant de l'eau dans la pompe, tout en maintenant le déplacement rythmique de l'air. (Avec l'autorisation d'AERE Harwell)

Digitized by Google

20 kg avec tous ses accessoires, y compris un dispositif pour la production de courant (pompe ou alternateur) et un système de réfrigération, d'une efficacité totale d'environ 5 pour cent en fonctionnant avec des combustibles solides, et pouvant aller jusqu'à 20 pour cent en fonctionnant à l'énergie solaire reçue sous lentille Fresnel[9], ensemble coûtant environ $100 chez un fabricant américain. Les coûts et les rendements cités sont des approximations tirées d'observations actuelles ; les coûts pourraient s'avérer moins élevés dans la mesure où ces machines seraient produites en quantités industrielles. Le coût du collecteur et du mécanisme pivotant de captage n'est pas compris et il est probable qu'il sera onéreux, (mettons de $200 pour un moteur de 100 W).

On estime que ce moteur aurait une durée de vie d'au moins 4.000 heures et probablement beaucoup plus. Les causes de pannes les plus probables seraient la corrosion de la chambre de chauffe et/ou la fuite du fluide de travail sous pression. On pourrait s'arranger pour faire les réparations uniquement dans un atelier central, où elles seraient simples et peu coûteuses n'exigeant probablement que le remplacement de la partie à haute température et la recharge. Les pièces mobiles internes fonctionneraient sur une légère couche de gaz et ne devraient pas s'endommager beaucoup. Les ressorts intérieurs ne subiraient de tension que peu de temps au départ.

La fabrication locale du FPSE dépendrait des détails de la conception. La seule opération difficile est de réussir l'ajustage précis entre piston/cylindre et la bielle du piston auxiliaire. Ceux-ci pourraient être conçus pour s'emboîter, ce qui résulterait en paires assorties non-interchangeables. Le matériau utilisé pourrait être la fonte ou l'acier, si on peut accepter une zone de chauffe de plus basse température. Il est possible qu'une solution préférable consiste à utiliser une relativement légère quantité d'acier inoxydable dans la zone de chauffe. Ceci permettrait d'accroître la durabilité de manière appréciable et pourrait être moins onéreux à long terme.

Le moteur à diaphragme évite le besoin de surfaces glissantes et, partant, ne s'use pas facilement et ne nécessite pas d'ajustement rigoureux. Toutefois, les coûts de fabrication actuels de ces machines en Grande-Bretagne est plus de 100 fois plus grand que l'estimation de $100 donnée pour le FSPE de 150 W. De plus, les machines à diaphragme sont beaucoup plus lourdes pour un rendement donné que les machines FSPE. Comme dans le cas des systèmes thermo-électriques et photo-voltaïques commercialisés, les machines à diaphragme s'utiliseraient surtout aujourd'hui quand il serait très important de pouvoir produire quelques dizaines de watts d'énergie électrique, pendant un an ou plus, sans avoir à surveiller ou à réalimenter la machine.

RECHERCHES ET REALISATIONS

Etant donné l'état actuel des réalisations du moteur à piston libre Stirling, on

s'attendrait à le voir commercialiser dans 5 ou 10 ans, si la demande justifiait un intérêt commercial accru.

Le futur développement du moteur à diaphragme pourrait résulter en la production d'un dispositif spécial dans 5 ou 10 ans. C'est une machine qui non seulement est intrinsèquement extrêmement durable, si elle est conçue et construite convenablement, mais aussi est potentiellement très peu coûteuse si elle est produite en modèles de moins de 100 W. Ce qui coûte le plus, ce sont l'alternateur et le diaphragme moteur qui doivent être impeccables. Elle pourrait en grande partie être montée à partir de pièces embouties. Ainsi, dans la mesure où un marché potentiel justifierait un investissement important à l'ordre de la conception et de l'outillage, il n'existerait apparemment aucune raison pour empêcher d'en réduire le coût de fabrication à celui d'un petit moteur à pétrole, si la machine est fabriquée dans les mêmes quantités industrielles.

Le niveau de connaissances technologiques actuel serait adéquat pour des centrales électriques de l'ordre de 100 W. Pour des centrales d'une puissance de plusieurs kilowatts, il faut effectuer des travaux supplémentaires dans la conception de zones de chauffe, de brûleurs de combustibles solides, de lentilles, de mécanismes de captation des rayons, de pompes, pour en faciliter la fabrication dans les pays en voie de développement.

Il résultera sans doute des programmes de développement actifs, entrepris actuellement dans les domaines de l'automobile, de la climatisation, des coeurs artificiels et des applications spatiales, des progrès rapides dans l'efficacité et la durabilité du moteur Stirling, ainsi qu'une réduction de coût.

UTILISATION DU MOTEUR STIRLING DANS LES PAYS EN VOIE DE DEVELOPPEMENT

En raison de l'état d'avancement actuel, il est peu probable que l'utilisation des moteurs Stirling dans les pays en voie de développement prenne une grande envergure pendant les cinq prochaines années. (A la seule exception du grand modèle lent de 1908 discuté ci-dessus et dont la fabrication est réalisable dans plusieurs pays en voie de développement.) Si l'intérêt et la demande qui existeront dans les pays industrialisés résultent en des économies de fabrication pour les machines prototypes d'aujourd'hui, on pourra peut-être les utiliser dans les pays en voie de développement dans 5 ou 10 ans.

Les moteurs Stirling peuvent fonctionner soit avec les collecteurs solaires mobiles à hautes températures, soit avec des collecteurs fixes à températures plus basses. Les pompes à eau à cylindre libre et l'alternateur linéaire à diaphragme seront vraisemblement les premiers à utiliser l'énergie solaire.

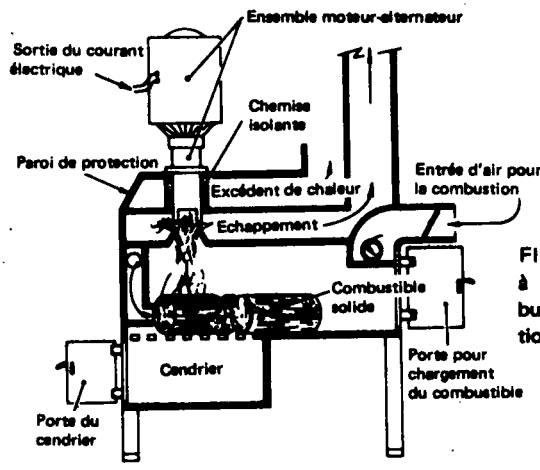


FIGURE 73 Combinaison poêle à bois et moteur Stirling à combustible solide. [Avec l'autorisation de W. Beale]

Chacun des moteurs Stirling mentionnés ci-dessus peut être conçu pour fonctionner avec un combustible solide, selon un rapport énergie/volume et un rendement qui dépendront de la conception des échangeurs de chaleur. Des combinaisons moteur/poêle à combustible solide peuvent être conçues pour servir d'appareils de chauffage ou de cuisinières, tout en fournissant de l'électricité (Figure 73). Ces poêles pourraient brûler de la paille, des excréments d'animaux, du charbon ou tout autre combustible disponible sur place.

Dans un moteur à cylindre libre à pompe à induction, les composantes de courte durée devraient être facilement accessibles et les composantes de précision protégées de toute contamination possible.

Une autre possibilité consisterait à utiliser un moteur électrique pour actionner une pompe et un moteur Stirling, une éolienne ou toute autre source d'énergie capable de maintenir la charge de l'accumulateur. Il s'agit là d'un arrangement complexe, mais il offre l'avantage de pouvoir exploiter parallèlement de nombreuses sources d'électricité, et on peut utiliser à des fins nombreuses l'électricité emmagasinée.

Une troisième possibilité de pompe à eau serait d'utiliser la grosse et lente machine du modèle 1908 fonctionnant à la pression atmosphérique. Une conception plus moderne obtiendrait un rendement d'au moins celle que donnait l'ancêtre (500 W, un pour cent). Un avantage éventuel de cette grosse et simple machine est qu'elle exige de moins sévères tolérances et qu'elle s'adapte plus facilement aux capacités locales de fonderie et d'outillage que les moteurs à haute pression plus minutieux. Cette machine nécessite toutefois une bien plus grande quantité de métal pour sa construction que d'autres

de la même puissance. Un autre avantage de cette machine plutôt primitive mais intéressante est sa valeur pédagogique. Son fonctionnement est évident pour l'observateur intéressé, ce qui n'est pas le cas des moteurs à piston libre.

REFERENCES

1. Prigmore, Daryl R., and Barber, Robert E. 1974. A prototype solar powered, Rankine cycle system providing residential air conditioning and electricity. Paper No. 749026. *Ninth Intersociety Energy Conversion Engineering Conference Proceedings*. 26-30 August, San Francisco, California. pp. 326-333. New York: American Society of Mechanical Engineers.
2. Bartosz, J. T.; Swanson, J. L.; and Teagan, W. P. 1975. A solar-powered water pumping system for the Yuma (Arizona) desalination plant. Paper No. 759114. *Record of the Tenth Intersociety Energy Conversion Engineering Conference. 18-22 August, University of Delaware, Newark*, pp. 765-771. New York: Institute of Electrical and Electronic Engineers.
3. Rider-Ericsson Engine Company. *Hot air pumping engines catalog–1908*. Lansing, Michigan: Robert Huxtable Company, Box No. 1107, Zip Code 48904.
4. Walker, Graham. 1973. *Stirling-cycle machines*. New York: Oxford University Press.
5. Beale, W. 1969. Free piston Stirling engine–some model tests and simulations. Paper 690230. Presented at the Society of Automotive Engineers Automotive Engineering Congress, 13-17 January, Detroit, Michigan.
6. Walker, Graham. 1974. Communication personnelle. University of Calgary, Mechanical Engineering Department, Alberta, Canada.
7. Cooke-Yarborough, E. H.; Franklin, E.; Geisow, J.; Howlett, R.; and West, D. D. 1974. Thermomechanical generator: an efficient means of converting heat to electricity at low power level. *Institute of Electrical Engineers, London, Proceedings* 121(7):749-751.

   Voir aussi Atomic Energy Research Establishment (of United Kingdom Atomic Energy Authority), Harwell, England (indiqué ci-dessus sous le sigle AERE), Report AERE-R7645.
8. Harrison, J. D. L. 1975. Communication personnelle. AERE Harwell, Energy Technology Support Unit.
9. Beale, W.; Holmes, W.; Lewis, S.; and Cheng, E. 1973. Free piston Stirling engines–a progress report. Paper 730647. Presented at the Society of Automotive Engineers Automotive Engineering Conference, 18-22 June, Chicago, Illinois.
10. Cooke-Yarborough, E. H., and Yeats, F. W. 1975. Efficient thermo-mechanical generation of electricity from the heat of radioisotopes. *Record of the Tenth Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, 18-22 August, University of Delaware, Newark*, pp. 1003-1011. New York: Institute of Electrical and Electronic Engineers.

    Voir aussi Harwell Report AERE-R8036.
11. *Ocean '74: IEEE International Conference on Engineering in the Ocean Environment Record*. Vol. 1. 21-23 August, Halifax, Nova Scotia, pp. 226-231. New York: Institute of Electrical and Electronic Engineers.

    Voir aussi Harwell Report AERE-R7753.

12. West, C. D. 1974. Fluidyne heat engine. Paper No. 5. *Record of the International Solar Energy Society (UK Section) Conference on Solar Energy Utilization*, 9 July, Brighton Polytechnic, England, pp. 54-79. London: International Solar Energy Society, UK Section.
Voir aussi Harwell Report AERE-R6775.

LECTURES SUGGEREES

Martini, W. R. 1972. Developments in Stirling Engines. ASME Paper 72-WA/ENER-9. New York: American Society of Mechanical Engineers.

Zarinchang, Jafar. 1972. *The Stirling engine: a bibliography*. London: Intermediate Technology Development Group.

Walker, Graham. 1973. The Stirling engine. *Scientific American* 229(2):80-87. Excellent résumé du développement du moteur Stirling. Bibliographie technique sommaire et détaillée sous la référence 4.

Annexe 5
Pompes et génératrices éoliennes actuellement en fabrication

(La présente liste n'est pas forcément complète ; toutefois, elle a été compilée à partir des meilleurs renseignments accordés au personnel de la NAS. Les renseignements proviennent des fabricants ; donc, ni le comité, ni la NAS/NRC ne peut assumer de responsabilité quant à leur véracité.)

Fabricant	Matériel
Aermotor Division of Braden Industries, Inc. Industrial Park P. O. Box 1364 Conway, Arkansas 72032 Etats-Unis (Note: La roue est fabriquée en Argentine, en vertu d'un accord de cession des procédés de fabrication, puis vendue par Aermotor. La tête est fabriquée en Afrique du Sud, en vertu d'un accord semblable.)	Eoliennes "AERMOTOR" roue à pales multiples (18) reliée à une pompe à cylindre alternatif.

Diam. des roues (en pieds)	Course (en pouces)	Coût (roue sans pylône) (f.a.b. entrepôt de la succursale aux E.-U.)
6	5½& 3	$ 465.
8	8 & 6	690.
10	10 & 7½	1165.
12	12 & 9	1945.
14	14 & 10	3125.
16	16 & 12	4235.

Des tours tronquées pour monter l'éolienne Aermotor sur le pylône du propriétaire peuvent être fournies en hauteurs de 3 à 14 pieds (environ 1 à 5 m.) à des prix allant de $44 à $965, selon les dimensions de la roue. Des pylônes de quatre poteaux peuvent être également fournis de 3 à 15 m 75 (21 à 47 pieds) de haut, de $535 à $3175, selon les dimensions de la roue. (Prix f.a.b. entrepôt de la succursale aux Etats-Unis.)

CAPACITE DE LA POMPE AERMOTOR

Diamètre du Cylindre (en pouces)	Débit gallons/heure		Elévation totale en pieds					
			DIMENSIONS DE L'AERMOTOR					
	6 Ft	8-16 Ft	6 Ft	8 Ft	10 Ft	12 Ft	14 Ft	16 Ft
1 3/4	105	150	130	185	280	420	600	1.000
1 7/8	125	180	120	175	260	390	560	920
2	130	190	95	140	215	320	460	750
2 1/4	180	280	77	112	170	250	360	590
2 1/2	225	325	65	94	140	210	300	490
2 3/4	265	385	56	80	120	180	260	425
3	320	470	47	68	100	155	220	360
3 1/4		550			88	130	185	305
3 1/2	440	640	35	50	76	115	180	265
3 3/4	–	730	–	–	65	98	143	230
4	570	830	27	39	58	85	125	200
4 1/4		940	–	–	51	76	110	180
4 1/2	725	1.050	21	30	46	68	98	160
4 3/4	–	1.170	–	–	–	61	88	140
5	900	1.300	17	25	37	55	80	130
5 3/4	–	1.700	–	–	–	40	60	100
6	–	1.875	–	17	25	38	55	85
7	–	2.550	–	–	19	28	41	65
8	–	3.300	–	–	14	22	31	50

Les capacités indiquées par le tableau ci-dessus sont approximatives, établies en fonction d'un réglage sur la longue course sous un vent de 15 a 34 Km/h. Un réglage sur la course brève augmente l'élévation d'un tiers et réduit d'un quart la capacité de pompage.

Fabricant	Matériel

Aerowatt
37, Rue Chanzy
75011 Paris
France
(Renseignements fournis par son représentant aux E.-U. :
Automatic Power, Inc.
P. O. Box 18738
Houston, Texas 77023)

Génératrice (accumulateur de batterie) "Aerowatt" entraînée par le vent. Hélice à deux pales à pas variable. Génératrice de courant alternatif triphasée permettant l'émission de courant continu de 12 ou 24 volts à partir d'un régulateur transistorisé. Frein électrique.

No. de modèle	Diamètre de l'hélice (en mètres)	Energie débitée à 7,15 m/s (kW)	Moyenne de rendement annuelle sous des vents de vélocité annuelle de 7,2 m/s	
			Puissance (kW)	Energie (kW/hr)
24FP7	1,0	28	14	126
150FP7	2,04	130	72	628
300FP7	3,16	350	184	1600
1100FP7	5,09	1125 volt-amps	450	3900
4100FP7	9,34	4100 volt-amps	1500	13.100

Prix (f.a.b. Houston, Texas)

Génératrice éolienne*		Gouverneur	
27FP7	$2.380	24FP12 (12 volt)	$ 462
150FP7	3.865	150FP12 (12 volt)	1.070
300FP7	5.680	150FP24 (24 volt)	1.070
1100FP7	9.740	300FP24 (24 volt)	1.120
4100FP7	22.360		

*Pour les machines standard à pales en bois dur peintes à l'uréthane ; ne comprend ni pylône ni batterie.

P. Andrag & Sons (Pty.) Ltd.
P. O. Box 364
Belleville, Cape Province
Republic of South Africa

Fabrique des roues de 8 à 10 pieds sous brevet Aermotor (EU). Voir rubrique Aermotor pour détails afférents.

Fabricant	Matériel
Dempster Industries P. O. Box 848 Beatrice, Nebraska 68310 Etats-Unis	Eolienne, roue à pales multiples reliée à pompe à cylindre alternatif.

Diamètre de la roue (en pieds)	Prix*
6	$465
8	670
10	1150
12	1900
14	2970

Capacités de pompage typiques, vitesse du vent de 18 miles/h (29 km environ), pompe à cylindre de 2 ponces :

Diamètre de la roue (en pieds)	Elévation totale (en pieds)	Débit en Gallons EU/h
6	95	130
8	135	195

*F.a.b. au point d'expédition

Dunlite Electrical Co. Pty. Ltd. 21-27 Frome Street Adelaide, S.A. Australie	Accumulateur de batterie électrique entraîné par le vent. Hélice à pas variable de 13 pieds de diamètre à trois pales, automatiquement commandée par un régulateur centrifuge, se fait en deux modèles de base : • courant continu de 12 V et 1000 watts • courant continu de 12 V et 2000 watts

Fabricant	Matériel
Electro GmbH Winterthur St. Gallerstrasse 27 CH-8400 Winterthur Suisse	Génératrices de courant alternatif entraînées par le vent, qui s'utilisent comme accumulateur de batterie ou comme source directe de courant alternatif mono- ou triphasé. Hélice à deux ou trois pales à pas variable (sauf exceptions indiquées) avec aileron de queue ajustable à la main.

Modèle	Vitesses du Vent prévues et admissibles[a] (m/s)	Rendement Watts	Volts[b]		Diamètre (en mètres)	No. de pales	Coût (FAB Sortie usine, en fr. suisses) Générateur[c]	Commandes	Régulateur de Tension
W50	18	50	DC	6/12/24	0,45 x 1 m de h.[d]		2400.	310.	350.
W250	18	250	DC	12/24	0,66 x 1,3 m de h.[d]		3100.	330.	380.
WV05	9	600	DC	25/36	2.5	2	3350.	330.	400.
WV15G	10	1200	DC	24/36/48/65/110	3.0	2	4100.	400.	150.
WV25G	11	2200	DC	36/48/65/110	3.6	2	5150.	500.	150.
WV35G	11	4000	DC	48/65/110	4.4	3	6850.	580	150. } e
WVG50G	12	5/6000	DC	65/110	5.0	3	7900.	680.	150.
WV15W	10	1200	AC	110, monophasé (30-70Hz)	3.0	2	4750.	900.	compris
WV25D	11	2000	AC	110, triphasé (40-70Hz)	3.6	2	5850	1200.	compris
WV35D	10	3500	AC	110/220, triphasé (35-60Hz)	4.4	3	7600.	1550.	compris
WVG50D	10	5000[f]	AC	110/220, triphasé (50-80Hz)	5.0	3	8700.	1550.	compris

Commande automatique des générateurs WV15-WVG 50 :

274-212 DC 24/36 durant fonctionnement contrôlé S Fr. 1650.
266-213 DC 24/36 durant fonctionnement non-contrôlé S Fr. 2200.
} FAB sortie d'usine

Notes:
a. Vitesse à laquelle l'éolienne développe le maximum de courant prévu.
b. WV05 et WV15G disponibles avec l'option d'un courant de 12 V pour un supplément de 5%. Modèle WV25G peut s'obtenir avec l'option d'un courant de 24 volts pour un supplément de 5%.
c. Le coût ne comprend pas le pylône, le tableau de commandes ni le régulateur (sauf exceptions indiquées).
d. Turbine à axe verticale.
e. Uniquement avec contrôle automatique.
f. Un générateur de 10 kW sera bientôt commercialisé.

Fabricant	Matériel
The Heller-Aller Co. Perry and Oakwood Streets Napoleon, Ohio 43545 Etats-Unis	Eolienne pompe à eau "Baker", roue à pales multiples reliée à pompe à cylindre alternatif.

Diamètre de la roue (en pieds)	Nombre de pales	Prix (éolienne uniquement) FAB Napoleon, Ohio
6	20	$ 401,20
8	36	522,90
10	30	712,70
12	32	1145,00

Capacités de pompage d'éoliennes "Baker" à engrenage arrière
(vitesse du vent : 15 miles/h – 24 km/h)

	"BAKER" DE 6 PIEDS		"BAKER" DE 8 PIEDS		"BAKER" DE 10 PIEDS		"BAKER" DE 12 PIEDS	
Elévation totale en pieds	Diamètre du cylindre (en pouces)	Gallons EU par heure	Diamètre du cylindre (en pouces)	Gallons EU par heure	Diamètre du cylindre (en pouces)	Gallons EU par heure	Diamètre du cylindre (en pouces)	Gallons EU par heure
25	3	350	3 1/2	900	4	1250	6	2400
35	2 1/2	240	3	720	3 1/2	925	5	1625
50	2 1/4	200	2 1/2	450	3	700	4 1/2	1425
75	2	160	2 1/4	350	2 1/2	475	4	1125
100	2	150	2	250	2 1/2	460	3	600
125	1 5/8	120	1 7/8	240	2	280	2 1/2	525
150	....	....	1 3/4	220	2	280	2 1/2	525
200	....	....	....	....	1 7/8	260	2	325
250	....	....	....	....	1 3/4	215	2	325
300	....	....	....	....	....	....	1 3/4	200

Les capacités indiquées ci-dessus ne sont qu'approximatives. Par élévation totale en pieds, nous ne voulons pas dire profondeur du puits, mais la distance de la roue au cylindre. Ne pas utiliser de tuyauterie plus petite que celle pour laquelle est conçu le cylindre pour le frottement convenable.

Bien que nous préférions recommander les dimensions indiquées ci-dessus, de plus grands diamétres de cylindre peuvent très souvent s'utiliser de manière satisfaisante.

Fabricant	Matériel
Maschinenfabrik Ludwig Bening 2847 Barnstorf Postfach 171 République fédérale d'Allemagne	Générateur éolien "Lubing" (accumulateur de batterie), courant produit de 24 volts, hélice (gouverneur centrifuge) de trois pales à pas variable avec pales en plastique renforcé à la laine de verre.

Modèle		Diamètre (mètres)	Prix (FAB sortie d'usine) (DM)	
M 022-3	G024-400	2,2	$5224.	Modèle de base ; comprend générateur ; rotor ; ailettes de rotor ; engrenage ; bagues collectrices ; rectificateur ; régulateur de tension ; voltmètres ; ampèremètres.
M 022-3-6	G024-400	2,2	7058.	Idem, ainsi que pylône de 6 m, fil de fer hauban, ferrures, boulons pour montage sur fondations treuil à main, plans des fondations.
M 022-3-9	G024-400	2,2	7448.	Idem, ainsi qu'un pylône de 9 m.
M 022-3-12	G024-400	2,2	7858.	Idem, ainsi qu'un pylône de 12 m.

Pompes éoliennes "Lubing," rotors de 3, 4, et 6 pales reliés à une pompe à mouvements alternatifs en laiton capable de soulever à des hauteurs maximum de 7 à 16 mètres. Pales du rotor conçues de manière aérodynamique en plastique moulé. Rotor de 6 pales equipé d'un régulateur de vitesse centrifuge sur 3 ailes et avec trois ailes fixes. Prix non coté.
Disponible en diverses variétés de pompes reliées au modèle M 022-3-6 (rotor à 3 ailes monté sur une tour de 6 m) ; coûte environ DM 6500 f.a.b., sortie d'usine selon la pompe choisie.

Fabricant	Matériel
Winco Division Dyna Technology, Inc. P. O. Box 3263 Sioux City, Iowa 51102 Etats-Unis	Eolienne "Wincharger" Modèle No. 1222H, accumulateur de batterie électrique entraîné par le vent. • Hélice en bois, de 6 pieds de diamètre, à 2 pales, régulateur de frein pneumatique à action centrifuge réglé pour intervenir lorsque la vitesse du vent dépasse 11,8 mètres/seconde • Générateur de courant continu de 200 watts, 12 volts Commence à charger sous des vents de 3,6 mètres/seconde Courant de charge maximum de 14 ampères à 11,8 mètres par seconde Tension maximum 15 volts • Pylône de 4 poteaux de 10 pieds chacun (cornières en fer) • Coffre des commandes muni d'un ampèremètre Prix, modèle complet–$445 f.a.b. sortie d'usine.

Annexe 6
Sociétés commerciales pour la création de machines éoliennes

(Cette liste n'est pas forcément complète ; elle a toutefois été établie à partir des meilleurs renseignements fournis aux services de la NAS. Les renseignements ont été fournis par les sociétés ; ni le comité, ni la NAS/NRC ne peut garantir leur véracité.)

1. American Energy Alternatives, Inc.
   P. O. Box 905
   Boulder, Colorado 80302
   Etats-Unis

Prototype de génératrice éolienne fondé selon le principe de la turbine "route de bicyclette" (voir Figure 31) de 7 pieds de diamètre, alternateur en directe muni de rectificateur produisant un courant continu de 12, 24, 48 etc. volts. Les plans envisagent les modèles suivants :

Rendement	Vitesse du vent prévue (m par heure)	Prix anticipé (F.a.b. de Boulder)
1,5	?	$2100-2200
2,5	33 (à 1.500 m d'alt.)	$2650
5	42 (à 1.500 m d'alt.)	$2900-3000

2. American Wind Turbine Co.
   1016 East Airport Road
   Stillwater, Oklahoma 74074
   Etats-Unis

Turbine modèle "roue de bicyclette" (voir Figure 31) reliée à un alternateur de haute vitesse à entraînement direct ; pour conversion des modulations de fréquence transistorisée pour fournir un courant alternatif de fréquence constante. Système prototype déjà construit ; en projet : turbines mesurant 15 à 30 pieds de diamètre y compris des systèmes de pompage actionnés par des pompes électriques. Les plans incluent un jeu "outillage" destiné à faciliter la fabrication de ces turbines dans les pays en voie de développement.

3. Windworks
   Box 329, Route 3
   Mukwonago, Wisconsin 53149
   Etats-Unis

Société sans but lucratif pour la conception de systèmes de génératrices éoliennes, y compris des inverseurs de synchronisation et des pylônes et fournit des renseignements relatifs à la conception de telles machines sur une base consultative.

4. Noah Energy Systems GmbH
   Wippenhohner Str. 32
   D-5202 Hennef 1
   Suisse

Prototype de génératrice éolienne fournissant un courant d'une puissance de 30 kW (fréquence variable) à des vitesses de vent de 10 mètres/seconde et de 90 kW maximum (à des vitesses de rafale). Rotor de 12 mètres de diamètre, à 6 pales aérodynamiques fixes. On rapporte que ce modèle a été développé pour l'exploitation dans les pays en voie de dévelopement, et adapté aux conditions d'entretien locales. Prix anticipé : FS 75.000, f.a.b. sortie d'usine.

5. Jacobs Wind Electric Company, Inc.
   Box 722, Route 11
   Fort Myers, Florida 33901
   Etats-Unis

Ancien fabricant de la génératrice éolienne Jacobs, 1930-1960. Actuellement, conçoit un nouveau modèle de génératrice électrique éolienne–aucun détail disponible.

6. Grumman Aerospace Corp.
   Bethpage, New York 11714
   Etats-Unis

Réalisation commerciale d'une éolienne à ailes garnies de toile inventée à Princeton University. La version Grumman a trois ailes à bras d'aluminium et des voiles de Dacron, de 12,5 pieds de diamètre, reliées à un alternateur automobile d'une puissance de 1 kW sous des vents d'une vitesse de 32 km/h. Le moulin à vent devait être également vendu pour le pompage et pour servir de génératrice thermique une fois relié à une pompe à engrenage disposant d'une adduction d'eau limitée. Prix non cotés. Grumman a également à l'étude une génératrice éolienne de 15 kW, de 25 pieds de diamètre, de 3 ailes à pas réglé, munie de pales d'aluminium tréfilé et d'un générateur standard courant. La machine doit produire 35.000 kWh annuellement sous des vents d'une vitesse de 23 km/h. Prix non cotés.

7. Dornier-System GmbH
   Postfach 1360
   7990 Friederichshafen
   République fédérale d'Allemagne

Prototype de génératrices éoliennes Darrieus, puissance de 10 kW. Fabrication du rotor conçue pour pouvoir être fabriquée dans les pays en voie de développement.

Annexe 7
Pylônes d'éoliennes destinés à l'érection dans des exploitations agricoles

(Extrait du Catalogue de Smith & Thayer Co., Boston, Massachusetts.)

Pour tous renseignements concernant des pylônes de poids léger, peu coûteux et de conception moderne, s'adresser à :

Windworks
Box 329
Route 3
Mukwonago, Wisconsin 53149
Etats-Unis

INDICATIONS RELATIVES A LA CONSTRUCTION D'UN PYLONE DE DOUZE METRES DESTINE A SUPPORTER UN MOTEUR EOLIEN A TURBINE EN FER A ENGRENAGE ARRIERE

LISTE DES MATERIAUX NECESSAIRES A LA CONSTRUCTION D'UN PYLONE DE 12 M DESTINE A SUPPORTER DES MOTEURS DE 8,5 ET DE 10 PIEDS (3 m-3,5 m)

4 Pièces de bois de 4 pouces sur 4, de 18 pieds de long pour le poteau principal.
4 Pièces de bois de 4 pouces sur 4, de 20 pieds de long pour le poteau principal.
1 Pièce de bois de 2 pouces sur 6, de 12 pieds de long pour le plateau sur lequel sera construite la plate-forme.
2 Pièces de bois de 2 pouces sur 4, de 16 pieds de long pour l'échelle
2 Pièces de bois, de 2 pouces sur 4, de 12 pieds de long pour la plate-forme.
2 Pièces de bois, de un pouce sur 4, de 12 pieds de long pour l'échelle.
24 Pièces de bois, de un pouce sur 6, de 16 pieds de long pour les écharpes, les frettes et entretoises.
4 Poteaux d'ancrage de 8 pieds de long, solides, de pas moins de 6 pouces sur 6.
4 Poteaux de traverse.
5 Livres de clous 20d pour la plate-forme.
15 Livres de clous 10d pour les écharpes.
8 Boulons et rondelles de 4½ x ½ (pouces) pour enter le poteau principal.
8 Boulons et rondelles de 10½ x ½ pour boulonner les poteaux principaux aux poteaux d'ancrage.

Les matériaux ci-dessus ne coûteront pas plus de $12, et le coût de la main-d'oeuvre pour la construction du pylône et la mise en place de l'éolienne sera de $8 à $12, puisque cela nécessitera le travail de deux hommes pendant deux jours. Nous ne fournissons pas les pylônes, sauf en cas d'arrangement spécial, puisqu'ils sont difficiles et onéreux à expédier, et on peut les construire sur place à moins cher. Ils sont généralement fournis, soit par l'acheteur, soit par l'intermédiaire qui installe l'éolienne sur la plate-forme. N'importe quel menuisier peut, à partir de nos indications, formuler un devis et, en suivant nos descriptions, ériger un pylône sans problèmes.

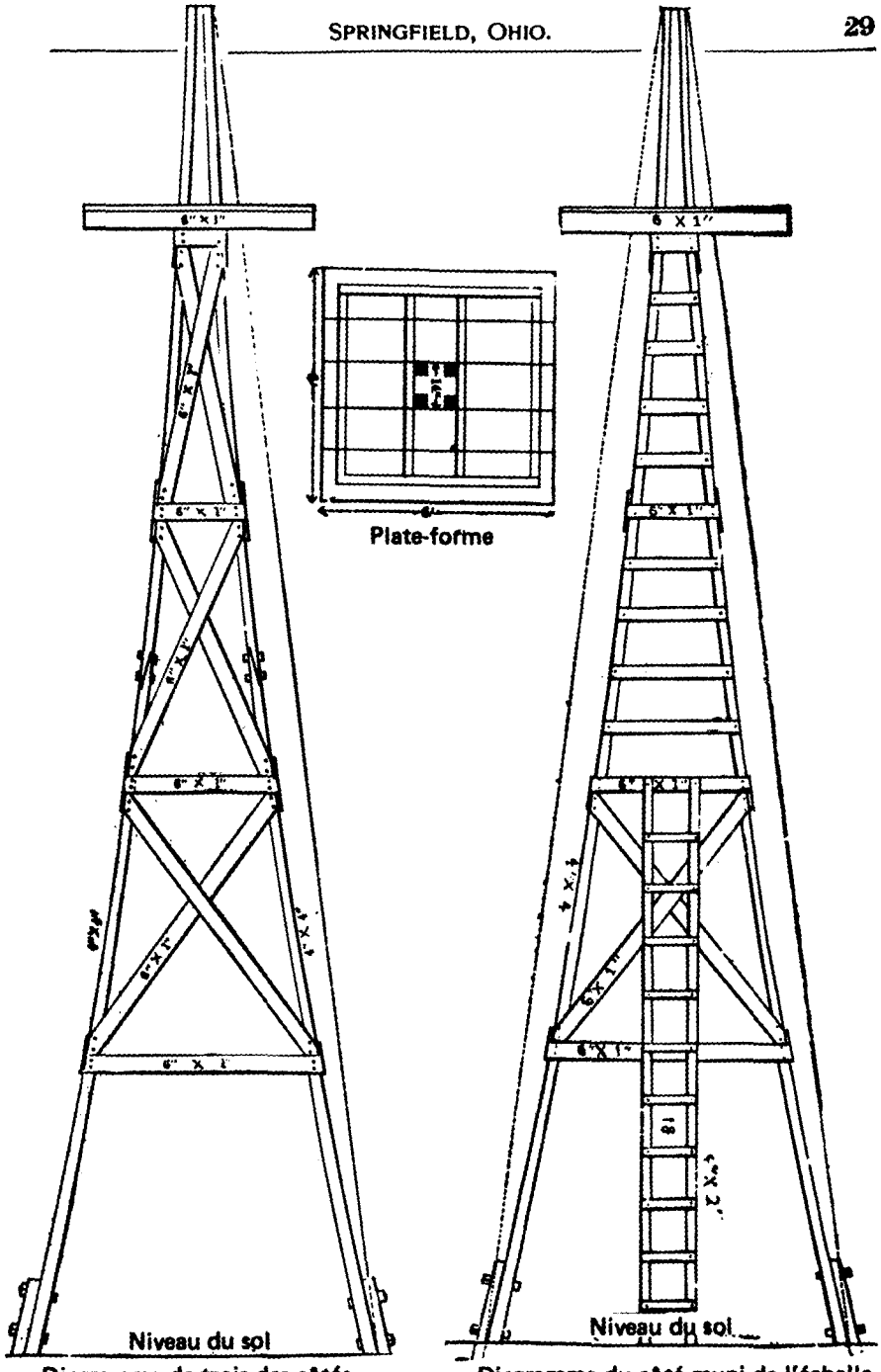
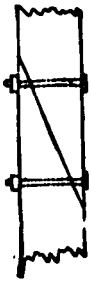


Diagramme de trois des côtés

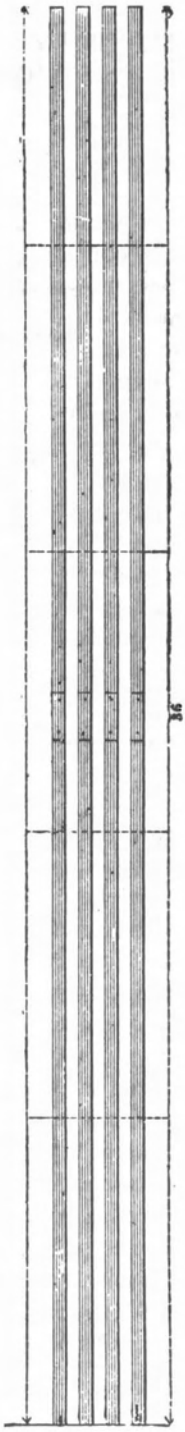
Diagramme du côté muni de l'échelle

RECOMMANDATIONS POUR LA CONSTRUCTION D'UN PYLONE DE 12 m DESTINE AU SUPPORT DE MOTEURS DE 8,5 ET 10 PIEDS

Choisir les quatre poteaux de 4 pouces sur quatre pour le sommet du pylône ; scier en diagonale les coins intérieurs de chacun de ces poteaux, en commençant sur le dessus à deux pouces du bord et en amenuisant régulièrement à zéro sur une longueur de quatre pieds. Enter les poteaux de 4 pouces sur 4 entre eux selon une enture de deux pieds de long, comme le montre le schéma de la coupe ci-contre ; scier les extrémités des poteaux en carré, et s'assurer qu'ils sont bien tous les quatre de la même longueur : les placer côte à côte, puis marquer la place des entretoises, en marquant quatre distances égales sur les quatre poteaux en même temps (comme le montre le dessin à la page 306). Le bord supérieur de la première entretoise du bas devrait être à 90 pouces du pied des poteaux ; diviser également la distance entre l'entretoise du haut et l'entretoise du bas pour placer les deux autres.



Placer deux poteaux côte à côte en s'assurant que leurs extrêmités sont exactement au même niveau, insérer une pièce de bois, d'une épaisseur de 1 pouce, d'une largeur de 2 pouces, et d'une longueur de 4 pouces, entre les extrêmités supérieures, ce qui donnera une longueur de 9 pouces à travers le dessus des poteaux, de bord extérieur à bord extérieur. Disposer les poteaux de manière à obtenir une distance de 14 pouces de bord extérieur à bord extérieur à 62 pouces du sommet. Clouer la frette supérieure, en utilisant la première pièce comme modèle des trois autres, dont deux devraient avoir 2 pouces de plus de long que les deux autres pour tenir compte du chevauchement. Observer la même règle en sciant les entretoises. Clouer la première entretoise à 9 pouces du sommet et la seconde à 68 pouces du sommet, comme déjà indiqué. Prendre le pied des poteaux et écarter les deux pieds de poteaux sur une distance de 9 pieds. (La règle à observer est 1 pied d'écartement pour 4 pieds de hauteur.) Fixer en place provisoirement ces deux poteaux pour les empêcher de bouger ; puis dessiner une ligne à la craie à partir du pied d'un des poteaux jusqu'en haut, puis passant sur l'autre poteau jusqu'au pied de celui-ci. Mesurer la distance entre cette ligne et le bord extérieur de chaque poteau, et faire un va-et-vient de mouvements entre les poteaux pour arriver à leur donner la même distance entre la ligne à la craie et le bord extérieur de chaque poteau au niveau de chaque entretoise ; cela doit donner une retombée correcte aux poteaux. (Ces recommandations doivent être très exactement suivies.) Clouer l'entretoise inférieure à 90 pouces du bas, et les deux autres à distances égales, comme indiqué. Clouer les écharpes

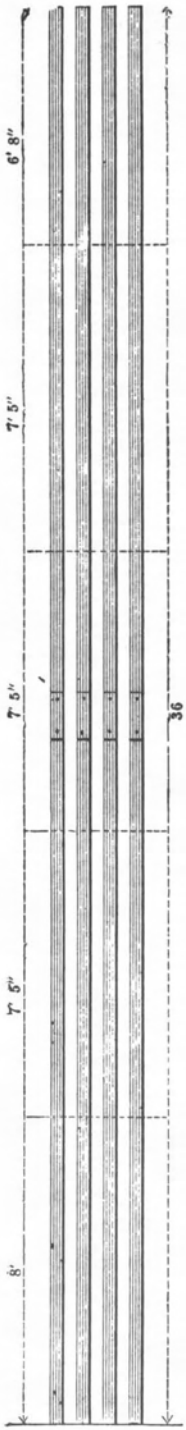


en diagonale entre chaque entretoise et s'assurer que le coin intérieur de chaque écharpe rencontre exactement la face intérieure de chaque poteau, aplanir le coin extérieur pour qu'il rencontre exactement le bord extérieur du poteau ; prendre la première écharpe comme modèle des sept autres de cette section, en tenant compte d'une longueur supplémentaire de 2 pouces pour les quatre qui vont chevaucher (comme dans le cas des entretoises). Clouer le plateau qui va servir de rebord à la plate-forme (2x6x6), faire reposer le bord inférieur du plateau sur le rebord supérieur de la première entretoise. Quand ce côté du pylône sera terminé, le retourner, si bien que les entretoises et les écharpes seront contre terre ; placer les deux autres poteaux sur les deux premiers et construire ce nouveau côté du pylône exactement comme le premier, en faisant attention à clouer les entretoises bien en face des premières. Insérer les minces pièces de bois de 1 pouce entre les poteaux de dessus et les poteaux de dessous et clouer les deux dernières frettes au sommet et les premières entretoises, puis placer des blocs dessous les poteaux d'en dessous pour faire donner à tous les poteaux la même retombée au niveau de chaque entretoise sur chaque côté. Clouer les entretoises qui restent à clouer sur deux côtés, et les écharpes sur un côté, et terminer le côté à échelle comme le montre le schéma. Elever le pylône avec des perches. Une corde attachée autour du sommet facilitera grandement la tâche de l'érection, une fois le pylône à moitié redressé. Laisser tomber un fil à plomb du haut du pylône en son centre ; quand le pylône aura atteint la verticale, le boulonner aux quatre poteaux d'ancrage, qui ne devraient pas avoir moins de 6 pouces[2] ni être enterrés de moins de 4 pieds avec une ancre de traverse près du pied de chaque poteau d'ancrage. Finir la plate-forme comme l'illustre la coupe p. 304

Digitized by Google

RECOMMANDATIONS POUR LA CONSTRUCTION D'UN PYLONE DE 12 m DESTINE AU SUPPORT D'UN MOTEUR DE 4 m (12 pieds)

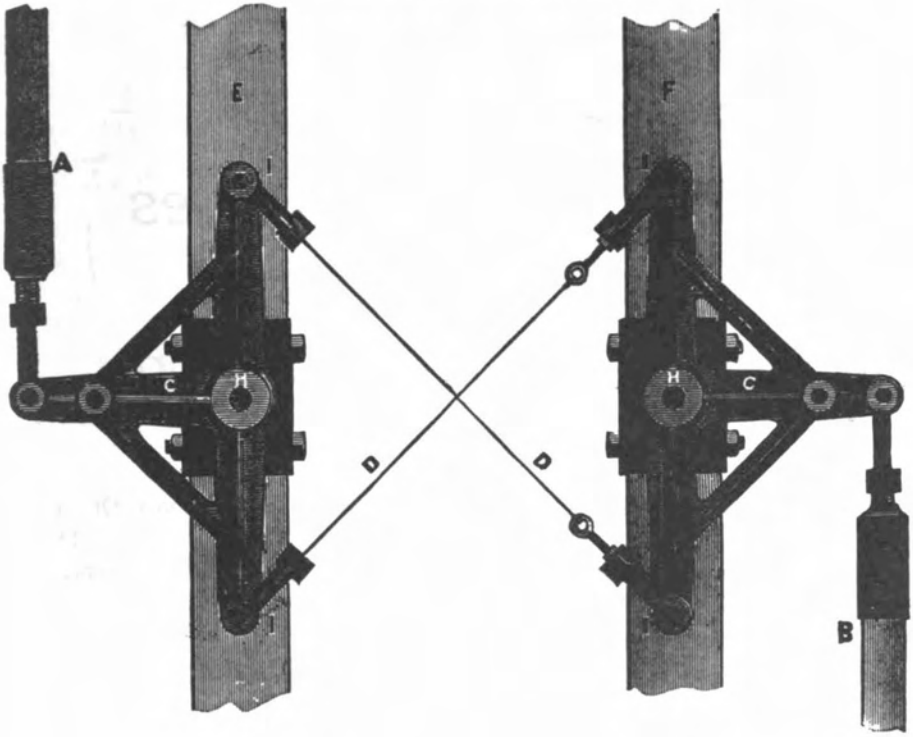
Choisir les quatre poteaux, de 4 pouces sur 6, pour le sommet du pylône ; scier en diagonale le côté intérieur de chacun de ces poteaux, en commençant sur le dessus à deux pouces du bord et en amenuisant régulièrement à zéro sur une longueur de seize pieds, ce qui rendra carré le dessus des poteaux (4 x 4 pouces). Scier les coins intérieurs de chaque poteau de 2 pouces au sommet, puis diminuer en diagonale à zéro sur une longueur de 5 pieds. Enter les poteaux de 4 pouces sur 6 entre eux selon une enture de deux pieds de long, comme le montre le schéma ci-contre ; scier les extrêmités des poteaux en carré, et s'assurer qu'ils sont bien tous les quatre de la même longueur ; les placer côte à côte, puis marquer la place des entretoises, en marquant quatre distances égales sur les quatre poteaux en même temps (comme le montre le dessin à la page 308). Le bord supérieur de la première entretoise devrait être à 80 pouces du haut du pylône. Le bord supérieur de l'entretoise du bas devrait être à 96 pouces du pied des poteaux ; diviser également la distance entre l'entretoise du haut et l'entretoise du bas pour placer les deux autres. Placer deux poteaux côte à côte en s'assurant que leurs extrêmités sont exactement au même niveau, insérer une pièce de bois, d'une épaisseur de 2 pouces, d'une largeur de 2 pouces, et d'une longueur de 10 pouces à travers le dessus des poteaux, de bord extérieur à bord extérieur. Disposer les poteaux de manière à obtenir une distance de 16 pouces de bord extérieur à bord extérieur à 72 pouces du sommet. Clouer la frette supérieure, en utilisant la première pièce comme modèle des trois autres, dont deux devraient avoir 2 pouces de plus de long que les deux autres pour tenir compte du chevauchement. Observer la même règle en sciant les entretoises. Clouer la frette à 9 pouces du sommet et la première entretoise à 80 pouces du sommet, comme il est indiqué. Aller au pied des poteaux et écarter les deux pieds sur une distance de 9 pieds. (La régle à observer est un pied d'écartement pour 4 pieds de hauteur.) Fixer en place provisoirement ces deux poteaux pour les empêcher de bouger, puis dessiner une ligne à la craie à partir du pied d'un des poteaux jusqu'en haut, puis passant sur l'autre poteau jusqu'au pied de celui-ci. Mesurer la distance entre cette ligne et le bord extérieur de chaque poteau, et faire un va-et-vient de mouvements entre les poteaux pour arriver à leur donner la même distance entre la ligne à craie et le bord extériur de chaque poteau au niveau de chaque entretoise ; cela doit donner une retombée correcte aux poteaux. (Ces recommandations doivent être très exactement suivies.) Clouer l'entretoise du bas à 96 pouces du bas, et



les deux autres à égales distances, comme indiqué. Clouer les écharpes en diagonale entre chaque entretoise et s'assurer que le coin intérieur de chaque écharpe rencontre exactement la face intérieure de chaque poteau, aplanir le coin extérieur pour qu'il rencontre exactement le bord extérieur du poteau ; prendre la première écharpe comme modèle des sept autres de cette section, en tenant compte d'une longueur supplémentaire de 2 pouces pour les quatre qui vont chevaucher (comme dans le cas des entretoises). Clouer le plateau qui va servir de rebord à la plate-forme (2x6x6), faire reposer le bord inférieur du plateau sur le rebord supérieur de la première entretoise. Quand ce côté du pylône sera terminé, le retourner si bien que les entretoises et les écharpes seront contre terre ; placer les deux autres poteaux sur les deux premiers et construire ce nouveau côté du pylône exactement comme le premier, en faisant attention de clouer les entretoises bien en face des premières. Insérer les minces pièces de bois de 2 pouces entre les poteaux de dessus et les poteaux de dessous et clouer les deux dernières frettes au sommet et les premières entretoises, puis placer des blocs dessous les poteaux d'en dessous pour faire donner à tous les poteaux la même retombée au niveau de chaque entretoise sur chaque côté. Clouer les entretoises qui restent à clouer sur deux côtés, et les écharpes sur un côté, et terminer le côté à échelle comme le montre le schéma. Elevez le pylône avec des perches. Une corde attachée autour du sommet facilitera grandement la tâche de l'érection, une fois le pylône à moitié redressé. Laisser tomber un fil à plomb du haut du pylône en son centre ; quand le pylône aura atteint la verticale, le boulonner aux quatre poteaux d'ancrage, qui ne devraient pas avoir une surface de moins de 6 pouces x 8, ni être enterrés de moins de 5 pieds avec une ancre de traverse près du pied de chaque poteau d'ancrage. Finir la plate-forme comme l'illustre la coupe p. 304.

Digitized by Google

SECTEURS CRENELES POUR LA TRANSMISSION DE L'ENERGIE DE MACHINES EOLIENNES



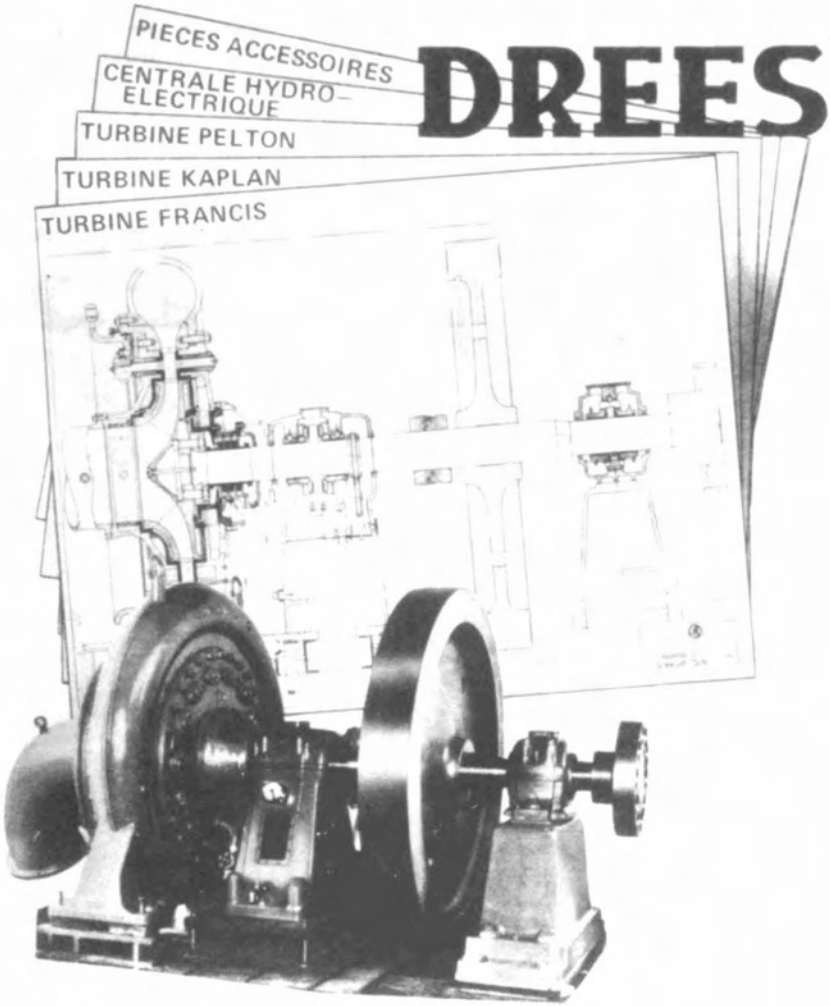
Il est souvent désirable afin de permettre au vent d'avoir le passage libre pour atteindre la roue, de placer le moteur à une certaine distance de la pompe et du puits. L'illustration ci-dessus représente les secteurs crénelés (de l'appareil de mise en marche) spécialement conçus dans ce but. A représente la tige d'actionnement du moteur ; B la tige du plongeur de la pompe ; E et F correspondent aux deux poteaux qui ne devraient pas mesurer moins de 4 pouces sur 4 pouces. Le poteau E est ancré dans le pylône, son centre situé à 9 pouces du centre de la tige d'actionnement A, le haut est entretoisé au pylône et le pied du poteau solidement enterré. Le poteau F est attaché solidement à la plate-forme du puits, son centre situé à 9 pouces du centre du plongeur de la pompe B. Les deux secteurs crénelés C sont placés sur le goujon H, sur un châssis boulonné aux poteaux E et F et sont reliés entre eux par les fils entre croisés D D. Par ce dispositif, nous obtenons le même mouvement sur la pompe que si elle était placée directement sous le pylône, la course descendante de la tige d'actionnement du moteur entraînant la course descendante du plongeur de la pompe avec une perte d'énergie minime.

Digitized by Google

Annexe 8
Machines hydro-électriques de petites dimensions actuellement en fabrication

(Les renseignements indiqués ici ont été fournis par les fabricants. On ne prétend pas qu'ils soient complets ; mais on voudrait qu'ils servent de référence utile aux lecteurs qui désireraient s'informer en plus de détails auprès du fabricant.)

Digitized by Google

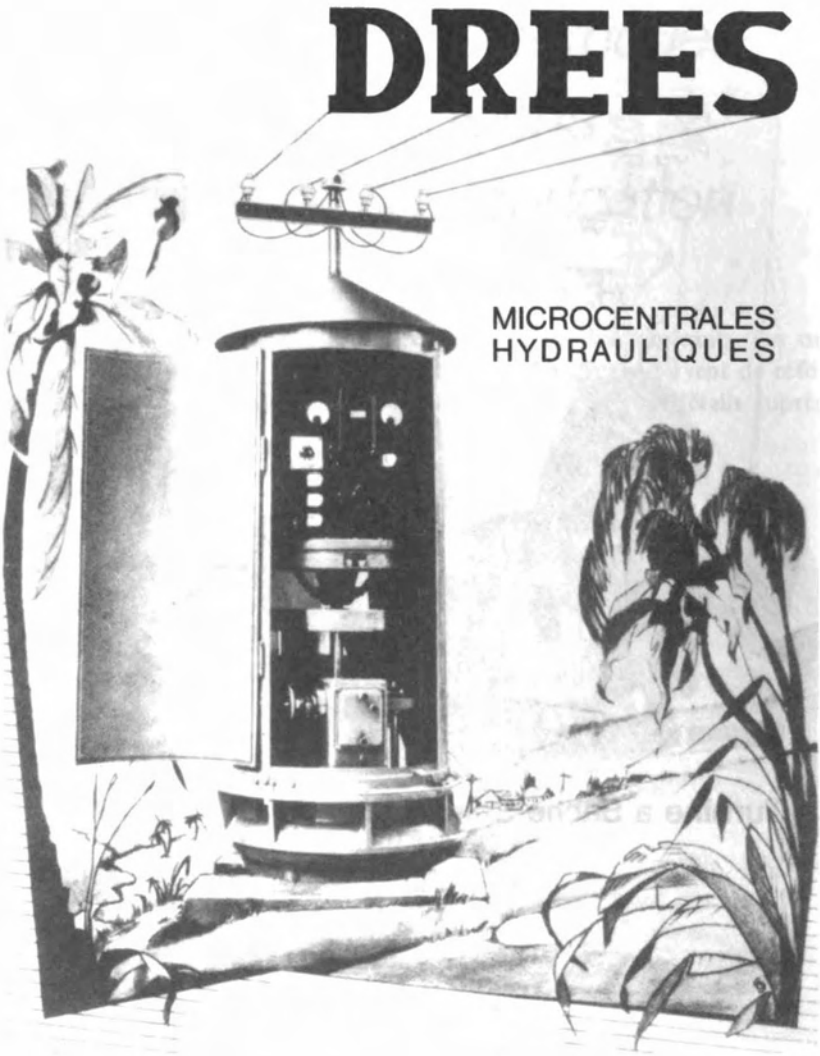


Turbine a Bâche Spirale Francis

Digitized by Google

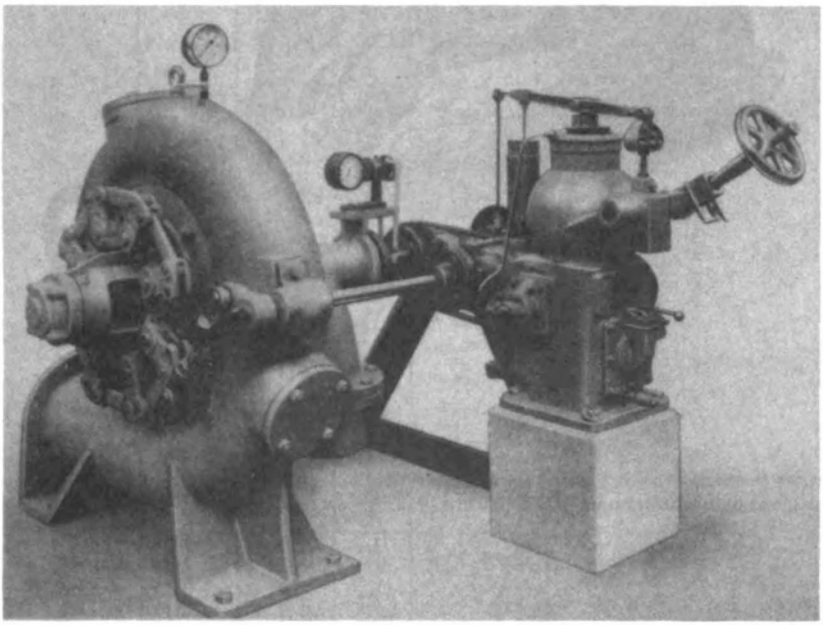
DREES & CO GMBH - 476 WERL i. WESTF.

MASCHINENFABRIK UND EISENGIESSEREI - ABT.: WASSERTURBINENBAU
Schützenstraße 36-38 Telefon 02922 5071/5072 - Telegramme: Dreesco Werl -
Telex: 8421404 dres d



Digitized by Google

GILBERT GILKES & GORDON LTD
WATER TURBINE & PUMP MANUFACTURERS
Kendal - England - Telephone: KENDAL 20028 - Telex: 65125
Fabricants de turbines à eau et de pompes

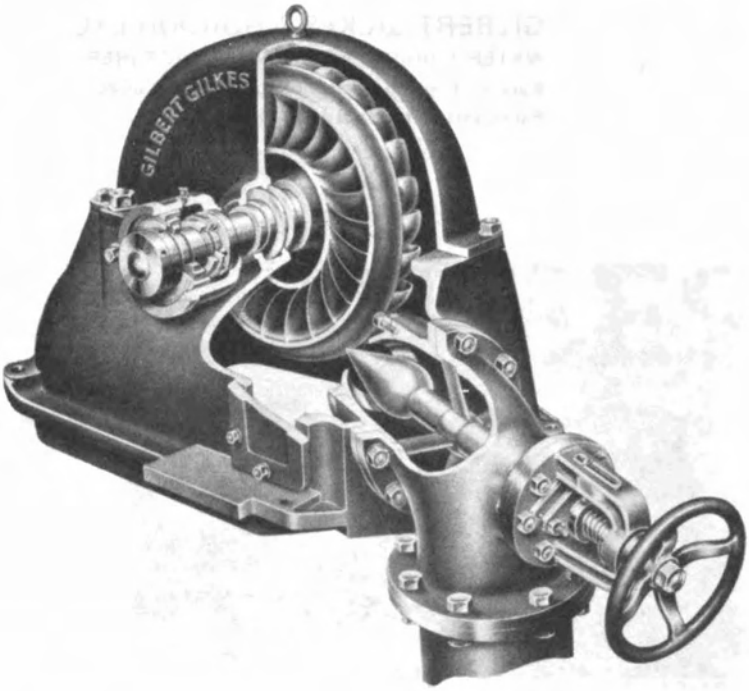


Roué-turbine à compulsion, convenant à des chutes d'eau de 15 à 120 mètres, d'une puissance pouvant atteindre 500 B.H.P.

Exemples de capacités de turbines et prix, fournis par le fabricant :

kW	Chute (en pieds)	Débit (en pieds cubes/min)	Type	Prix
10	50	376	Francis	£6.300
10	100	106,5	Turgo	£4.500
25	50	512	Francis	£7.800
10	200	45,5	Pelton	£4.200

Digitized by Google



Petites turbines Francis à bâche spirale, convenant aux chutes d'eau de 7,5 à 60 m, d'une puissance pouvant atteindre 100 à 150 chevaux.

Digitized by Google

THE JAMES LEFFEL & CO.
SPRINGFIELD, OHIO, U.S.A.

Tableau des capacités prévues des microcentrales hydro-électriques Hoppes

PUISSANCE ELECTRIQUE	Chute en Pieds	Modèle	Débit d'eau en pieds³/minute	PUISSANCE ELECTRIQUE	Chute en Pieds	Modèle	Débit d'eau en pieds³/minute
½ KILOWATT OU 500 WATTS	* 8	HL	104	5 KILOWATTS OU 5000 WATTS	8	OT	760
	* 9	HJ	92		9	OT	600
	* 10	HJ	82		10	LR	590
	* 11	F	74		11	LR	535
	* 12	F	68		12	LR	490
1 KILOWATT OU 1000 WATTS	* 8	IL	190		13	JP	470
	* 9	HL	175		14	JP	435
	* 10	HL	155		15	JP	400
	11	HL	140		16	JP	365
	12	HJ	127		17	JP	340
	13	HJ	118		18	JP	330
	14	HJ	110		19	JP	320
	15	HJ	105		20	JP	315
	16	HJ	100		21	HL	300
	17	HJ	94		22	HL	290
	18	HJ	90		23	HL	285
	19	F	84		24	HL	275
	20	F	80		25	HL	260
	21	F	76				
	22	F	74				
	23	F	72				
	24	F	70				
	25	F	68				
2 KILOWATTS OU 2000 WATTS	* 8	JP	330	7½ KILOWATTS OU 7500 WATTS	11	OT	800
	* 9	JP	290		12	OT	740
	* 10	JP	260		13	LR	680
	* 11	HL	245		14	LR	630
	* 12	HL	225		15	LR	590
	* 13	HL	215		16	JP	550
	14	HL	190		17	JP	515
	15	HL	178		18	JP	490
	16	HL	166		19	JP	480
	17	HL	156		20	JP	450
	18	HJ	153		21	JP	430
	19	HJ	148		22	JP	410
	20	HJ	140		23	JP	400
	21	HJ	133		24	JP	390
	22	HJ	127		25	JP	380
	23	HJ	120				
	24	F	116				
	25	F	110				
3 KILOWATTS OU 3000 WATTS	8	LR	470	10 KILOWATTS OU 10000 WATTS	12	OT	980
	9	JP	415		13	OT	900
	10	JP	370		14	OT	840
	11	JP	340		15	OT	780
	12	JP	310		16	LR	715
	13	JP	280		17	LR	670
	14	JP	260		18	LR	650
	15	IL	250		19	JP	610
	16	IL	240		20	JP	580
	17	HL	225		21	JP	550
	18	HL	210		22	JP	525
	19	HL	200		23	JP	500
	20	HL	190		24	JP	490
	21	HL	180		25	JP	480
	22	HL	170				
	23	HL	165				
	24	HJ	162				
	25	HJ	158				

La hauteur de chute en pieds en référence ci-dessus est illustrée à la page 316.

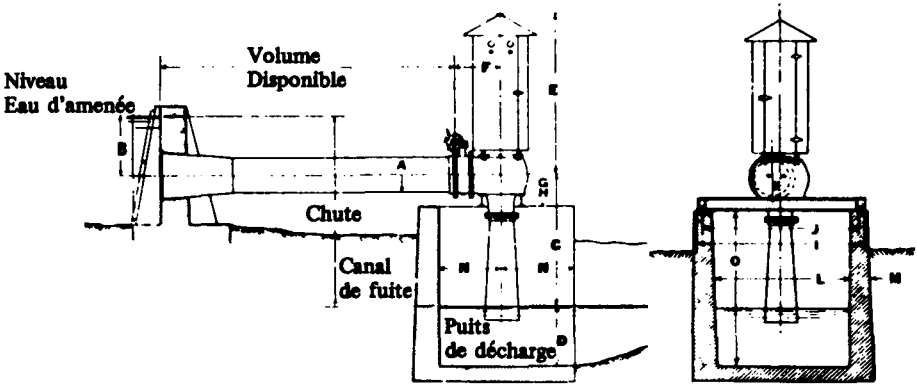
Le mot MODELE s'adresse aux différentes tailles des modèles de centrale hydro-électriques Hoppes. Voir dimensions à la page 316.

Quantité d'eau utilisée par la centrale à capacité maximum prévue figure ci-dessus en pieds cubes par minute.

*Une astérisque indique que l'ensemble Hoppes est fourni en continu uniquement.

Les caractéristiques standard des microcentrales à courant alternatif sont 3 phases, 60 cycles, et/ou 120 ou 240 ou 480 volts. Ces microcentrales Hoppes peuvent être également équipées pour courant de 50 cycles.

Lorsque vous nous écrirez, veuillez nous indiquer très exactement les paramètres électriques exigés.



Modèle	Débit (pieds cubes/m.)	Prix
HJ	82	$ 3,850.00
F	68	3,550.00
HL	155	5,200.00
HJ	105	4,525.00
F	68	4,150.00
JP	260	5,300.00
HL	178	4,850.00
JP	370	6,750.00
IL	250	5,950.00
HJ	158	5,200.00
LR	590	9,950.00
JP	400	8,950.00
HL	260	5,400.00
OT	800	11,950.00
LR	590	9,375.00
OT	980.	12,550.00
LR	715	10,250.00
JP	610	7,300.00
JP	480	7,300.00

DIMENSIONS GENERALES DES MODELES

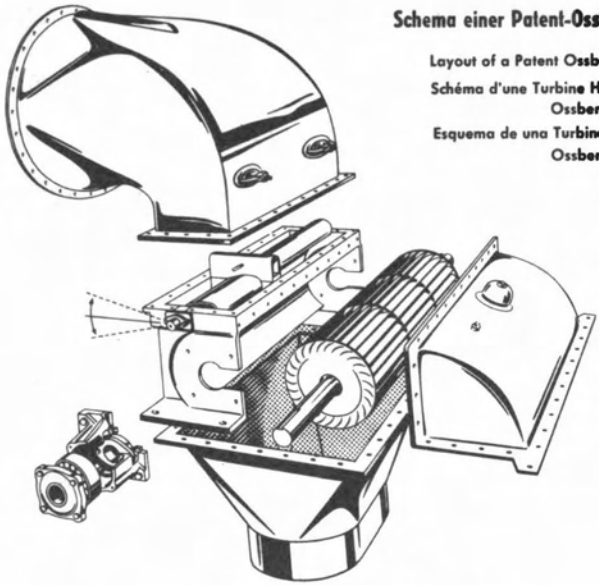
	F	HJ	HL IL	JP	LR	OT
A	6"	10"	12"	16"	18"	20"
B	18"	24"	24"	36"	36"	36"
C	60"	60"	60"	60"	60"	60"
D	24"	30"	30"	36"	42"	48"
E	58"	72"	72"	88"	90"	90"
F	20½"	18"	18"	22"	23"	27"
G	5½"	8⅝"	9⅝"	11⅛"	11⅞"	14¼"
H	5"	5"	5"	6"	6"	7"
I	72"	72"	72"	84"	84"	96"
J	66"	66"	66"	78"	78"	90"
K	3⅛"	4¾"	4"	4"	4"	4½"
L	60"	60"	60"	72"	72"	84"
M	8"	8"	8"	9"	10"	10"
N	30"	30"	30"	36"	42"	48"
O	73½"	73⅜"	75⅜"	78⅞"	84½"	86¾"

OSSBERGER-TURBINENFABRIK

WEISSENBURG/BAYERN

Allemagne

Schliessfach - P.O. Box 8 P - Apartado 32 - Telefon 23 62



Schema einer Patent-Ossberger-Wasserturbine

Layout of a Patent **Ossberger Water Turbine**

Schéma d'une Turbine **Hydraulique Brevetée Ossberger**

Esquema de una Turbina **Hidráulica Patente Ossberger**

Charakteristiken:

- 2-Zellen-Bauweise
- Ganzstahlbauweise
- Wenig drehende Teile
- Leitapparat bestehend aus einer Drehschaufel im Dreipunktsystem
- Wasserzu- und Abführung durch Rohrleitungen
- Nur 5 Schmierstellen
- Unempfindlich gegen verschmutztes Triebwasser

- Garantie für günstigsten Wirkungsgrad ab 1/4 Q
- Garantie für geringen Verschleiß und große Lebensdauer
- Garantie für unkomplizierten Einbau an ungefährdetem Standort, anspruchslose Wartung und Pflege

Salient features:

- 2-cell construction
- All steel construction
- Few rotating parts
- Guide equipment consists of one rotary blade with a 3 point contact
- Water supply and discharge through piping
- Only 5 lubricating points
- Unaffected by polluted propellant water

- Guarantees highest efficiency from 1/4 Q upwards
- Guarentees low wear and long life
- Guarantees trouble-free installation on a safe site, undemanding in maintenance or servicing

Caractéristiques:

- Construction à double compartiment
- Construction tout acier
- Peu de pièces tournantes
- Directrice se composant d'une palette rotative en un système à trois points
- Amenée et évacuation des eaux par conduites
- Cinq points de graissage seulement
- Insensible aux eaux polluées ou chargées de feuilles

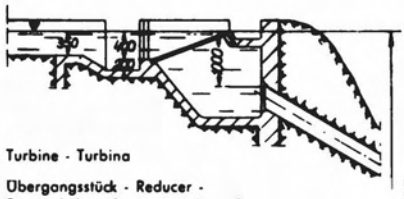
- Garantie d'un degré d'efficacité le plus favorable à partir de 1/4 Q
- Garantie d'une usure minimum et d'une longévité maximum
- Simplicité d'installation garantie. Entretien et soins quasi nuls

Caracteristicas:

- Tipo de dos celdas
- Modelo totalmente de acero
- Menos piezas giratorias
- El órgano de conducción consta de una paleta directriz con el sistema de tres puntos
- Conducciones de entrada y salida de agua por tuberias
- Solamente cinco puntos de engrase
- Insensible para aguas motrices ensuciadas

- Garantia para rendimientos favorables a partir de 1/4 Q
- Garantia de un desgaste minimo y gran duración
- Garantia para sencilla instalación en lugares fuera de peligro, modesta vigilancia y conservación

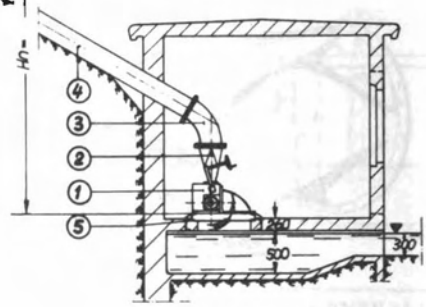
Digitized by Google

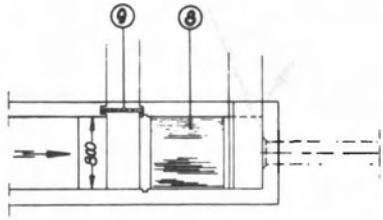


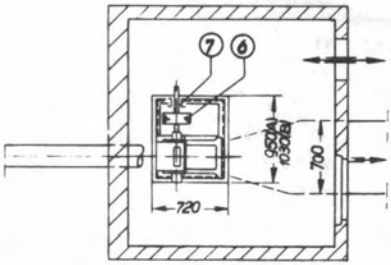
Einbaubeispiel

Mounting sketch - Projet d'installation
Ejemplo para instalación

1. Turbine - Turbina
2. Übergangsstück - Reducer - Raccord de réduction - Adaptador
3. Krümmer - Bend - Courbure - Codo
4. Druckrohrleitung - Penstock - Conduite forcée - Tuberia de presión
5. Trägerrahmen - Fundament frame - Cadre de fondation - Bastidor
6. Riemenscheibe - Pulley - Poulie - Polea
7. Außenlager - Bearing - Palier - Chumacera
8. Feinrechen - Screen - Grille - Rejilla
9. Spülschütze - Sluice gate - Vanne - Compuerta de descarga







PATENT-OSSBERGER-WASSERTURBINE TYPE: UNIVERSAL A

H m	Gefälle · Head · Chute · Caída	4	5	6	7	8	9	10	Maße · Measures · Dimensions · Medidas 1030 x 750 x 950 mm; Gewicht · Weight · Poids · Pesos 370 kg; Preis · Price · Prix · Precio
Q Litr./sec.	Wassermenge · Supply · Débit · Caudal	49	55	60	66	70	75	80	
N PS/HP/CV/HP	Leistung · Output · Puissance · Potencia	2,1	2,9	3,8	4,9	6,0	7,2	8,5	
n U/min. r.p.m. - t/min.	Drehzahl · Speed · Vitesse · Velocidad	380	430	470	510	550	580	615	
mm	Rohrleitung · Penstock · Conduite forcée · Tuberia	250	250	250	250	250	250	250	

PATENT-OSSBERGER-WASSERTURBINE TYPE: UNIVERSAL B

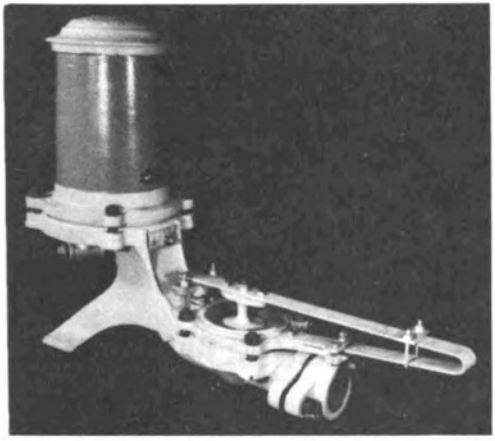
H m	10	15	20	25	30	950 mm · 750 · 950; 340 kg	Preis · Price · Prix · Precio
Q Litr./sec.	22	27	31	35	37,5		
N PS · HP · CV ·	2,3	4,3	6,6	9,3	12		
n U/min. r.p.m., t/min.	615	755	870	980	1070		
mm	200	200	200	200	200		

Im Lieferumfang enthalten - Parts of delivery - Le prix de livraison comprend - El precio contiene: Pos. 1, 2, 3, 5, 6, 7, 8

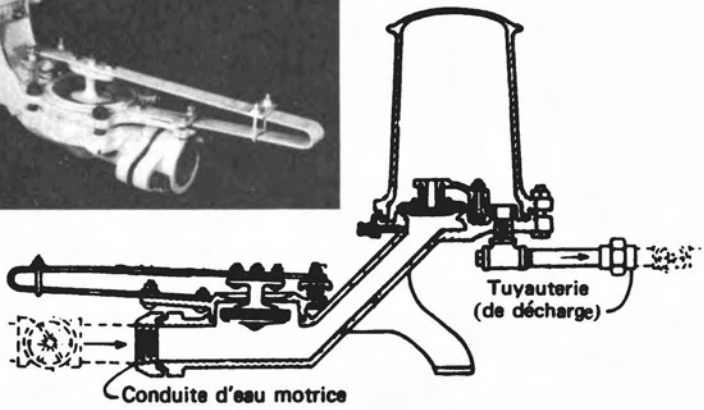
Digitized by Google

RIFE RAM AND PUMP WORKS

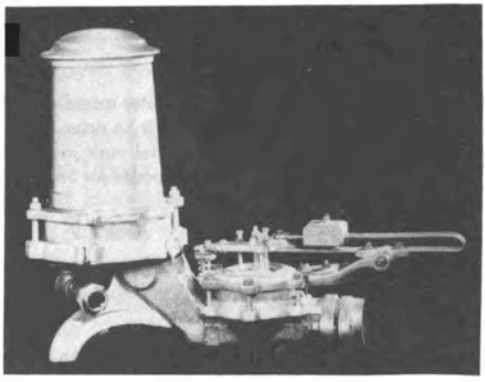
RIFE HYDRAULIC ENGINE MANUFACTURING CO.
Box 367, Millburn, New Jersey 07041

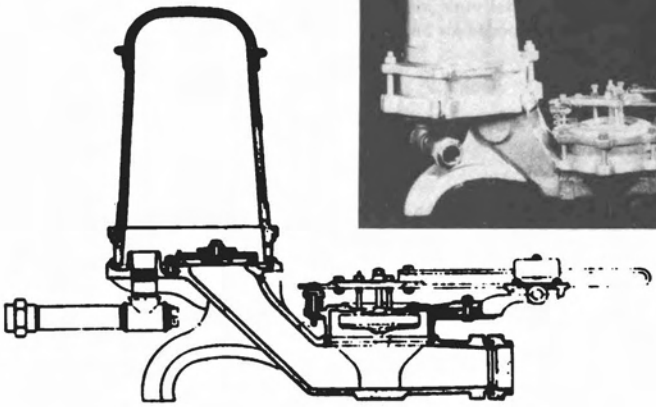


Bélier, Rife "Série B"



Bélier standard "Everlasting" de RIFE





Digitized by Google

SPECIFICATIONS RELATIVES AUX BELIERS HYDRAULIQUES RIFE
Nouveaux Modèles à haut rendement

Modèle No.	Dimensions de la conduite de prise d'eau (d'eau motrice)	Dimensions de la conduite d'écoulement (de décharge)	Capacité à la prise (gallons par min. utilisés) Min. Normal Max.	Chute Minimum Vertical (chute nécessaire en pieds)	Poids Emballé en livres (approx.)
Béliers hydrauliques de série B "Nouveau Modèle" de RIFE (conception à 4 boulons) Chute vericale maximum 15 pds. Levage maximum vertical 150 pieds. L'appareil comprend une crépine en fer à la prise d'eau en fin de conduite d'eau motrice					
10B	1-1/4"	3/4"	1½ – 6 – 7	2	94
15B	1-1/2"	3/4"	6 – 10 – 13	2	102
20B	2"	1"	8 – 18 – 20	2½	150
25B	2-1/2"	1"	12 – 28 – 35	2½	202
30B	3"	1-1/4"	20 – 40 – 55	3	263
Béliers standard "EVERLASTING" de RIFE Un modèle plus robuste évolué à partir de la série "A" précédente à 6 boulons Chute verticale maximum de 25 pieds. Levage vertical maximum de 250 pieds comprend une crépine en acier spéciale à la prise d'eau en fin de la conduite d'eau motrice. Toutes les pièces de fer et d'acier sont galvanisées on zinquées.					
10S	1-1/4"	3/4"	3 – 7 – 10	3	160
15S	1-1/2"	3/4"	5 – 11 – 15	3	171
20S	2"	1"	10 – 20 – 25	3½	249
25S	2-1/2"	1"	15 – 30 – 45	3½	273
30S	3"	1-1/4"	25 – 45 – 70	4	339
40S*	4"	2"	35 – 90 – 125	4	565
60S*	6"	3"	75 – 225 – 350	4	1325
80S	8"	4"	Pièces de rechange seulement		

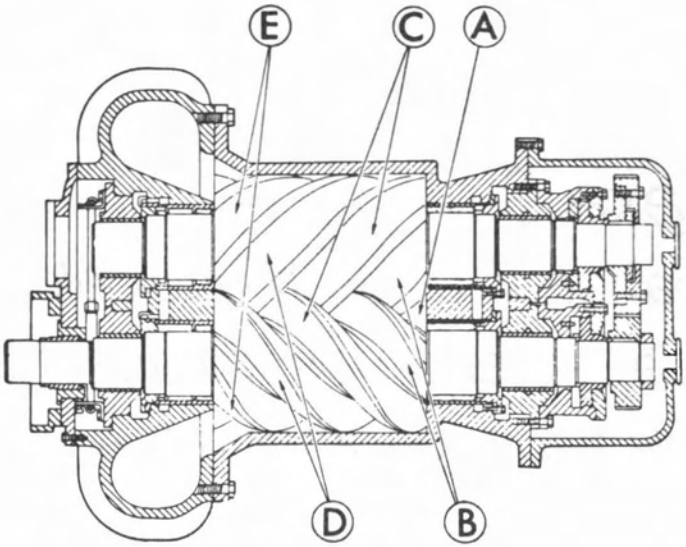
***Les modèles numéros 40S et 60S sont équipés d'une chambre à air en acier. Le modèle numéro 60S comprend un embout soudé spécial pour joindre la conduite d'eau motrice en pente au bélier à niveau.**

Annexe 9

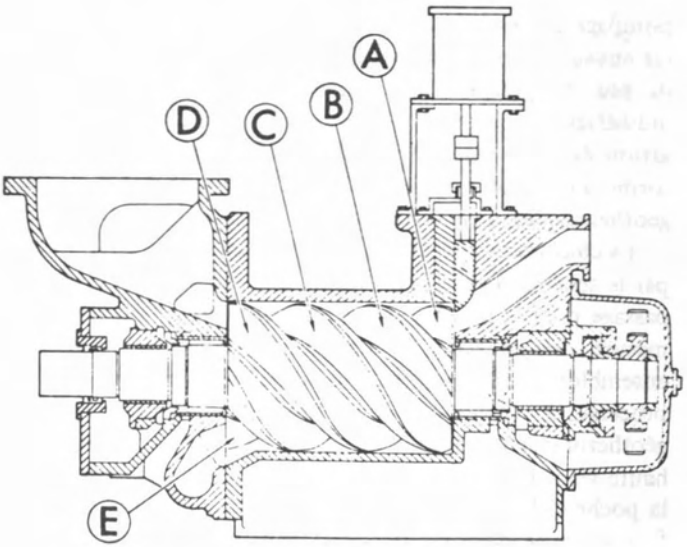
L'expanseur à vis hélicoïdale rotative et ses possibités d'application géothermique

L'expanseur à vis hélicoïdale est composé de deux vis à filet conique tournant en sens contraire l'une de l'autre, comme le montre le dessin ci-joint. Ce genre de machine est utilisé depuis de nombreuses années comme dispositif de pompage et s'est avéré durable et sûr. Le prototype, développé en Suède dans les années 30, est connu sous le nom de "vis de Lysholm". Par la suite, il a été de plus en plus utilisé comme compresseur de gaz dans des installations industrielles, si bien que, dans les années 50, il était d'usage courant. L'utilisation de cette machine à titre expérimental, pour l'application inverse sous forme d'expanseur de gaz, comme moyen essentiel d'extraction de ressources géothermiques, a commencé en 1971[1].

La construction, et partant le fonctionnement de la machine, sont indiqués par le schéma. Les canaux formés par l'engrenage des vis rotatives créent un passage pour le liquide, ce qui permet le passage continu de jets de vapeur à mesure que la pression baisse ; la totalité du fluide (liquide et vapeur ensemble) est transportée tout au long de la machine pendant l'ensemble du processus d'expansion. Comme l'ont décrit MacKay et Sprankle : "Le fluide géothermique passe par la soupape de contrôle du nez interne, et pénètre à haute vélocité dans la poche à haute pression créée par l'engrenage des rotors, la poche s'allonge, se divise en V et s'écarte du point d'arrivée du liquide pour former l'espace désigné en "B". La continuation de la rotation allonge le V, qui s'étend successivement aux positions "C", "D", et "E" ; en même temps, le point de rencontre des engrenages des vis semble s'écarter axialement du fluide en expansion. Le fluide ayant subi l'expansion à basse pression passe ensuite par la sortie d'écoulement"[1].



VUE COUPE HORIZONTALE



VUE COUPE DE PROFIL

Digitized by Google

Les avantages éventuels de l'expanseur à vis hélicoïdale rotative consistent en des économies d'exploitation possibles pour l'utilisation des boues saumâtres riches en minéraux dans le processus de production d'électricité. Le dépôt de minéraux à la surface des vis peut être un avantage, en éliminant la nécessité de sévères restrictions en cours de fabrication. A mesure que les dépôts s'accumulent, les interstices de frottement disparaissent, tandis que se forme une meilleure étanchéité entre les vis de sens inverse d'une part, et entre les vis et leur caisson, d'autre part. Le frottement continu, de tartre contre tartre, sert également à empêcher une incrustation totale et peut devenir un mécanisme d'autoréparation au cas où le caisson, ou les rotors, se corroderaient, en permettant aux dépôts minéraux de remplir les dépressions créées.

Des tests ont montré que ce dispositif tolère une grande variété de fluides géothermiques. Il peut fonctionner avec des boues géothermiques qui laissent des dépôts de silice et de carbonate dans des systèmes classiques, et semble aussi tolérer les fluides géothermiques contenant de l'argile, ou des vases, ou du sable, sans que son bon fonctionnement s'en trouve gêné. D'autres essais ont montré également qu'il tolère une longue gamme d'enthalpie du fluide géothermique. Les fluides de basse enthalpie produisent moins d'électricité que ceux d'enthalpie élevée ; mais, dans une situation de test, le système s'est montré capable de fonctionner selon un niveau remarquable d'efficacité en utilisant des fluides présentant des gammes étendues d'enthalpie particulièrement intéressantes.

Cet expanseur peut être fabriqué par tout fabricant de compresseur à vis héliocoïdale rotative. Etant donné une capacité de fabrication internationale, le temps de fabrication de petites génératrices électriques de ce genre serait relativement court, et des efforts de standardisation permettraient d'en faciliter l'entretien. Comme dans le cas de matériel classique, ces machines pourraient être facilement transportables[1], et cette qualité devrait leur assurer une grande souplesse d'utilisation.

Si de nouveaux progrès de conception et de plus nombreuses utilisations en chantier de l'expanseur à vis hélicoïdale rotative devaient corroborer les résultats des tests, les ressources géothermiques que les techniques actuelles ne permettent pas d'exploiter économiquement pourraient devenir exploitables. Son efficacité thermodynamique est un peu plus basse que celles des turbines à gaz classiques, mais son efficacité énergétique sera une qualité moins importante que celles de souplesse et de sûreté pour son utilisation dans des régions rurales. Le coût anticipé de systèmes complets de générateurs est de l'ordre de $100 à $200 au kilowatt. Le bas niveau du coût d'équipement, la simplicité inhérente et le potentiel de sûreté offerts par l'expanseur dans un environnement peu avantagé en technologie lui donnent un potentiel de valeur considérable pour son utilisation dans des régions rurales de pays en voie de développement.

REFERENCE

1. McKay, R. A., and Sprankle, R. S. 1974. Helical rotary screw expander power system. In *Proceedings of the Conference on Research for the Development of Geothermal Energy Resources, Pasadena, California, 23-25 September*, pp. 301-307. Pasadena: California Institute of Technology, Jet Propulsion Laboratory.

COMITE CONSULTATIF SUR LES INNOVATIONS TECHNIQUES

MEMBRES

GEORGE BUGLIARELLO, President, Polytechnic Institute of New York, Brooklyn, New York, *Chairman*

E. R. PARISER, Senior Research Scientist, Department of Nutrition and Food Science, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts

LEWIS PERINBAM, Vice President Special Programs, Canadian International Development Agency, Ottawa, Canada

CHARLES A. ROSEN, Staff Scientist, Stanford Research Institute, Menlo Park, California

VIRGINIA WALBOT, Department of Biology, Washington University, St. Louis, Missouri

CONSEIL DE LA SCIENCE ET DE LA TECHNOLOGIE POUR LE DEVELOPPEMENT INTERNATIONAL

DAVID PIMENTEL, Professor, Department of Entomology and Section of Ecology and Systematics, Cornell University, Ithaca, New York, *Chairman*

CARL DJERASSI, Department of Chemistry, Stanford University, Stanford, California, *Chairman*, 1973-1975

MEMBRES

GEORGE S. HAMMOND, Foreign Secretary, National Academy of Sciences

RUTH ADAMS, American Academy of Arts and Sciences, Boston, Massachusetts

EDWARD S. AYENSU, Director, Department of Botany, Smithsonian Institution, Washington, D.C.

JOHN D. BALDESCHWIELER, Division of Chemistry and Chemical Engineering, California Institute of Technology, Pasadena, California

IVAN L. BENNETT, JR., Dean, School of Medicine, New York University Medical Center, New York, New York

DWIGHT S. BROTHERS, International Agricultural Development Service, The Rockefeller Foundation, New York, New York

GEORGE BUGLIARELLO, President, Polytechnic Institute of New York, Brooklyn, New York

CHARLES DENNISON, Former Vice President, International Minerals and Chemicals Corporation, New York, New York

WILLIAM A. W. KREBS, Vice President, Arthur D. Little, Inc., Cambridge, Massachusetts

FRANKLIN A. LONG, Program on Science, Technology, and Society, Cornell Universify, Ithaca, New York

FREDERICK T. MOORE, Economic Advisor, International Bank for Reconstruction and Development, Washington, D.C.

JOSEPH PETTIT, President, Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia

JOSEPH B. PLATT, President, Harvey Mudd College, Claremont, California

HELEN RANNEY, Chairman, Department of Medicine, University Hospital, San Diego, California

ROBERT M. WALKER, McDonnell Professor of Physics, Director, Laboratory of Space Physics, Washington University, St. Louis, Missouri

STERLING WORTMAN, Vice President, The Rockefeller Foundation, New York, New York

PERSONNEL

VICTOR RABINOWITCH, Director

JULIEN ENGEL, Deputy Director, *Head, Special Studies*

CONSEIL DE LA SCIENCE ET DE LA TECHNOLOGIE
POUR LE DEVELOPPEMENT INTERNATIONAL
COMMISSION DES RELATIONS INTERNATIONALES
NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES–NATIONAL RESEARCH COUNCIL
2101 Constitution Avenue, N.W., Washington, D.C. 20418, U.S.A.

Etudes consultatives et Rapports spéciaux

Il est possible d'obtenir un exemplaire gratuit des rapports publiés dont la liste apparaît ci-dessous en s'adressant au Conseil de la science et de la technologie pour le développement international. Sauf indication contraire, les rapports sont publiés en anglais.

5. **The Role of U.S. Engineering Schools in Development Assistance**. 1976. 30 pp. Etudie les possibilités et les obstacles rencontrés par les écoles d'ingénierie aux Etats-Unis lors de la mobilisation de leurs ressources pour les pays en développement.
8. **Ferrocement: Applications in Developing Countries**. 1973. 93 pp. Evalue la situation actuelle et mentionne des applications d'un intérêt particulier pour les pays en développement–construction de navires, bâtiment, installations de stockage des aliments et de l'eau.
11. **Aquatic Weed Management: Some Perspectives for Guyana**. 1973. 44 pp. Rapport d'une conférence-atelier avec le Conseil national de la recherche scientifique de la Guyane. Décrit de nouvelles méthodes de lutte contre les herbes aquatiques qui se prêtent bien aux pays en développement tropicaux.
14. **More Water for Arid Lands: Promising Technologies and Research Opportunities**. 1974. 153 pp. (Egalement disponible en français). Définit des technologies peu connues mais prometteuses pour l'adduction et la conservation de l'eau dans les régions arides.
15. **International Development Programs of the Office of the Foreign Secretary**, by Harrison Brown and Theresa Tellez. 1973. 68 pp. Historique et analyse, 1963-1972 ; donne une liste du personnel, des participants et des publications.
16. **Underexploited Tropical Plants with Promising Economic Value**. 1975. 187 pp. Décrit 36 plantes tropicales peu connues qui, grâce à la recherche, pourraient devenir d'importantes cultures vivrières et de rapport dans l'avenir. Comprend des céréales, des racines et des légumineuses, des légumes, des fruits, des graines oléagineuses, des plantes fourragères et autres.

17. **The Winged Bean: A High Protein Crop for the Tropics.** 1975. 43 pp. Décrit un légume tropical négligé de l'Asie du Sud-est et de la Papouaise Nouvelle-Gruinée qui semble offrir une arme pour combattre la malnutrition à l'échelle mondiale.

18. **Energy for Rural Development: Renewable Resources and Alternative Technologies for Developing Countries.** 1976. 305 pp. (Egalement disponible en français).

19. **Methane Generation from Human, Animal, and Agricultural Wastes.** 1977. 131 pp. Examine comme l'homme peut profiter par le contrôle de la fermentation anaërobique des matières organiques, et les techniques d'utilisation du méthane produit comme combustible.

20. **Systems Analysis and Operations Research: A Tool for Policy and Program Planning for Developing Countries.** 1976. 98 pp. Examine l'utilité et les limitations de la méthode SA/OR (analyse méthodologique et recherche opérationnelle) susceptible d'être appliquée dans un pays en développement ainsi que les moyens d'acquérir les aptitudes autochtones.

21. **Making Aquatic Weeds Useful: Some Perspectives for Developing Countries.** 1976. 175 pp. Décrit diverses manières d'utiliser les herbes aquatiques pour le pacage. Soulève la possibilité de les récolter puis de les transformer en fumier, aliments pour animaux, pâte à papier, papier et combustible. Décrit également leur utilisation pour le traitement des eaux noires et des eaux résiduaires industrielles.

22. **Guayule: An Alternative Source of Natural Rubber.** 1977. 80 pp. Décrit un buisson peu connu qui pousse à l'état sauvage dans certains déserts de l'Amérique du Nord et produit un caoutchouc quasiment identique à celui de l'hévéa. Recommande que des fonds soient affectés à l'exploitation du guayule.

23. **Resource Sensing from Space: Prospects for Developing Countries.** 1977. 202 pp. Examen des applications actuelles et futures d'un intérêt particulier pour les pays en développement, de certaines implications d'un système de télédétection pour la réglementation à long terme, et d'initiatives souhaitables de coopération technique pour diffuser les capacités des usagers.

24. **Appropriate Technologies for Developing Countries.** 1977. 140 pp. Examine divers critères de bien-fondé en insistant sur les complexités et les contraintes inhérentes à un choix technologique. (En vente à l'intention des lecteurs qui ne sont pas les ressortissants de pays en développement).

Publications apparentées

D'autres rapports (élaborés en collaboration avec le BOSTID) peuvent être obtenus en écrivant à l'adresse mentionnée plus haut. Ce sont :

An International Centre for Manatee Research. 1975 34 pp. Décrit l'emploi du lamantin, grand mammifère pratiquement disparu, pour éliminer les herbes aquatiques des canaux. Propose la création d'un laboratoire de recherche pour mettre au point la reproduction et l'élevage du lamantin. Publié par le Conseil national de la recherche scientifique de Guyane.

Ferrocement, a Versatile Construction Material: Its increasing use in Asia. 1976. 106 pp. Rapport de la conférence-atelier avec l'Institut asiatique de technologie, Bangkok, Thaïlande. Etudie les applications de la technique du ferrociment en Asie et dans les Iles du Pacifique. Comprend la construction de silos de céréales, de réservoirs d'eau, de toits et de bateaux. Publié par l'Institut asiatique de technologie.

Natural Products for Sri Lanka's Future. 1975. 53 pp. Rapport d'une conférence-atelier avec le Conseil national de la science de Sri-Lanka. Identifie les produits végétaux négligés et non conventionnels qui peuvent contribuer dans une mesure significative au développement économique du pays. Publié par le Conseil national de la science de Sri-Lanka.

Publications épuisées

Les rapports ci-après du BOSTID ne peuvent être obtenus qu'en s'adressant au Service national de l'information technique (NTIS). Pour passer une commande, envoyez le titre du rapport, le numéro d'accession NTIS et le montant indiqué. (Note : les prix en vigueur sont les mêmes pour les premiers mois de 1977 mais peuvent être modifiés sans avis préalable). Les intéressés peuvent payer par compte de dépôt NTIS, chèque, virement postal ou carte de crédit American Express. Les commandes passées aux Etats-Unis sans paiement préalable sont facturées dans les 15 jours ; une commission de cinq (5) dollars est ajoutée au prix. Pour les acheteurs étrangers, les prix sont le double des prix indiqués ci-dessous et les commandes doivent comporter le montant total de l'achat. Envoyer les commandes à :

National Technical Information Service
Springfield, Virginia 22161, U.S.A.

1. **East Pakistan Land and Water Development as Related to Agriculture.** January 1971. 67 pp. Examine le programme d'action envisagé par la Banque mondiale dans le domaine de l'exploitation des eaux et des terres. NTIS Accession No. PB 203-328. $5.25.
2. **The International Development Institute.** July 1971. 57 pp. Fait sien le concept d'un nouvel organisme d'assistance technique à base scientifique

qui remplacerait l'AID. Examine la nature, les objectifs et les fonctions de cet organisme. NTIS Accession No. PB 203-331. $5.25.

3. **Solar Energy in Developing Countries: Perspectives and Prospects.** March 1972. 49 pp. Evalue la situation actuelle, identifie les domaines prometteurs de la recherche et du développement et propose la création d'un institut régional de recherche énergétique pour le monde en développement. NTIS Accession No. PB 208-550. $5.25.

4. **Scientific and Technical Information for Developing Countries.** April 1972. 80 pp. Examine le problème de l'accès du monde en développement aux sources d'informations scientifiques et techniques, donne la raison d'être de l'assistance dans ce domaine et propose des programmes destinés à renforcer l'infrastructure d'informations et à promouvoir le transfert d'informations. NTIS Accession No. PB 210-107. $6.00.

6. **Research Management and Technical Entrepreneurship: A U.S. Role in Improving Skills in Developing Countries.** 1973. 40 pp. Recommande l'exécution d'un programme systématique et indique les éléments prioritaires. NTIS Accession No. PB 225-129. $4.50.

7. **U.S. International Firms and R, D & E in Developing Countries.** 1973. 92 pp. Examine les buts et les intérêts d'entreprises internationales et de pays hôtes en voie de développement et suggère d'atténuer les différences en demandant aux entreprises de faire un effort continu pour renforcer les capacités de recherche, de développement et d'ingénierie. NTIS Accession No. PB 222-787. $6.00.

9. **Mosquito Control: Some Perspectives for Developing Countries.** 1973. 63 pp. Examine les techniques de lutte biologique susceptibles de remplacer les pesticides classiques ; évalue l'état des connaissances et le potentiel de recherche de plusieurs approches. NTIS Accession No. PB 224-749. $6.00.

10. **Food Science in Developing Countries: A Selection of Unsolved Problems.** 1974. 81 pp. Décrit 42 problèmes techniques non résolus et donne des informations de base, des méthodes possibles pour les résoudre et les sources d'information. NTIS Accession No. PB 235-410. $6.00.

12. **Roofing in Developing Countries: Research for New Technologies.** 1974. 74 pp. Souligne la nécessité de procéder à des recherches sur des toits à bon marché, en particulier au moyen des matériaux disponibles dans les pays en développement. NTIS Accession No. PB 234-503. $6.00.

13. **Meeting the Challenge of Industrialization: A Feasibility Study for an International Industrialization Institute.** 1973. 133 pp. Avance le concept de la création d'un institut de recherche indépendant et interdisciplinaire pour éclaircir les nouvelles options de politique que comportent tous les pays. NTIS Accession No. PB 228-348. $7.25.

Rapports épuisés (préparés en collaboration avec le BOSTID) qu'il est possible de se procurer auprès du service national de l'information technique (NTIS) :

Products from Jojoba: A Promising New Crop for Arid Lands. 1975. 30 pp. Décrit la composition chimique de l'huile extraite du *Simmondsia chinensis*, taillis du désert de l'Amérique du Nord. NTIS Accession No. PB 253-126. $4.50.

Aquatic Weed Management: Some Prospects for the Sudan and the Nile Basin. 1975. 47 pp. Rapport d'une conférence-atelier 1975 avec le Conseil national du Soudan pour la recherche. Suggère des méthodes modernes et innovatrices pour l'exploitation de la hyacinthe d'eau. Publié par le Conseil national pour la recherche—Conseil de la recherche agricole du Soudan. NTIS Accession No. PB 259-990. $5.25.

Rapports en préparation (Titres de travail)

Le BOSTID satisfera les demandes d'exemplaire unique des rapports en préparation quand ceux-ci paraîtront.

25. Tropical Legumes: A Resource for the Future.
26. Leucaena: New Forage and Tree Crop for the Tropics.
27. Firewood Crops: Bush and Tree Species for Energy Production.

Table des matières

Introduction 1

La Technologie énergetique et le développement économique–
Tour d'horizon 3

Conclusions et propositions 12

SECTION NON TECHNIQUE

Première partie EMPLOIS DIRECTS DE L'ENERGIE SOLAIRE 23

Chauffage, refroidissement, distillation, séchage des cultures
et production d'electricité 25

Dispositifs photovoltaïques 29

Deuxième partie EMPLOIS INDIRECTS DE L'ENERGIE SOLAIRE 33

L'énergie éolienne 35

L'énergie hydraulique 39

La photosynthèse 43

Conversion microbiologique de matière végétales en carburants liquides 46

Troisième partie AUTRES TECHNIQUES 49

Energie géothermique 51

Stockage de l'énergie 54

SECTION TECHNIQUE

Première partie EMPLOIS DIRECTS DE L'ENERGIE SOLAIRE 61

Chauffage, refroidissement, distillation, séchage des cultures et production d'électricité 63

Dispositifs photovoltaïques 91

Deuxième partie EMPLOIS INDIRECTS DE L'ENERGIE SOLAIRE 117

L'énergie éolienne 119

L'énergie hydraulique 144

La photosynthèse 173

Conversion microbiologique de matières bégétales en carburants liquides 190

Troisième partie AUTRES TECHNOLOGIES 203

Energie géothermique 205

Stockage de l'énergie 214

ANNEXES

1. Recherche et développement dans le domaine de l'énergie et possibilités d'application à petite échelle 225

2. Fabricants de dispositifs pour le chauffage et la réfrigération solaires 251

3. Fabricants de dispositifs solaires terrestres photovoltaïques 260

4. Moteurs à combustion externe—moteurs Rankine et Stirling examinés sous l'angle de leur application comme sources d'énergie à petite échelle pour les pays en voie de développement 264

5. Pompes et génératrices éoliennes actuellement en fabrication 291

6. Sociétés commerciales pour la création de machines éoliennes 299

7. Pylônes d'éoliennes destinés à l'erection dans des exploitations agricoles 301

8. Machines hydro-électriques de petites dimensions actuellement en fabrication 310

9. L'expanseur à vis helicoïdale rotative et ses possibilités d'application géothermique 321

Digitized by Google

Digitized by Google