

PROCEEDINGS OF THE UNITED NATIONS CONFERENCE ON NEW SOURCES OF ENERGY

SOLAR ENERGY, WIND POWER AND GEOTHERMAL ENERGY

Rome, 21-31 August 1961

VOLUME 1. GENERAL SESSIONS

ACTES OFFICIELS DE LA CONFÉRENCE DES NATIONS UNIES SUR LES SOURCES NOUVELLES D'ÉNERGIE

ÉNERGIE SOLAIRE, ÉNERGIE ÉOLIENNE ET ÉNERGIE GÉOTHERMIQUE

Rome, 21-31 août 1961

VOLUME 1. SÉANCES GÉNÉRALES



UNITED NATIONS/NATIONS UNIES

New York, 1963

E/CONF.35/2

UNITED NATIONS PUBLICATION

Sales No. : 63. I. 2

Price : \$ U.S. 2.50
(or equivalent in other currencies)

PUBLICATION DES NATIONS UNIES

Numéro de vente : 63. I. 2

Prix : 2 dollars 50 (USA)
(ou l'équivalent en monnaie du pays)

INTRODUCTION

The United Nations Conference on New Sources of Energy was held in Rome from 21 to 31 August 1961. A brief review of the proceedings and a synthesis of the papers submitted to the Conference and of the related discussions have been printed in *New Sources of Energy and Energy Development, Report on the United Nations Conference on New Sources of Energy* (United Nations publication, Sales No. : 62.I.21). The same volume also contains the agenda and lists of attendance and conference officers, as well as lists of all the papers and reports.

The present volume of the Proceedings contains the papers and reports relating to the following agenda items:

I. *New sources of energy and energy development ;*

II.D. *Combined use of various energy sources and energy storage problems.*

The Rapporteurs' general reports and their summations of the proceedings in connexion with the various agenda items are published in full in both English and French. This is true also of those individual papers which were submitted to the Conference in both languages. The papers are summarized in both English and French, with the exception of those which related to agenda item I, of which there are no summaries.

The material is arranged according to subject with the Rapporteur's general report on the agenda item, together with his summation, serving as introduction. Then follow the individual papers and their summaries. Within each section, the papers are printed in alphabetical order of authors' names.

As a general rule, the reports and papers are printed in the form in which they were presented to the Conference. However, corrections have been incorporated, some of the figures rearranged and, in a few instances, small editorial changes have been made. Diversity in usage and style of the original texts has usually been allowed to remain. Bibliographical and other references have generally been recast for the sake of clarity, and, where possible, verified. Some of the bibliographical lists have been omitted and the references printed as footnotes.

The views and opinions expressed are those of the individual authors and do not imply the expression of any opinion on the part of the Secretariat of the United Nations.

The symbols appearing after the titles of the papers and reports, and in references to them in the text, correspond to the symbols under which they were presented at the Conference. They have here been abbreviated by the elimination of the prefix "E/CONF.35/" which should be included in all full references.

INTRODUCTION

La Conférence des Nations Unies sur les sources nouvelles d'énergie s'est tenue à Rome du 21 au 31 août 1961. Le document intitulé *Sources nouvelles d'énergie et production d'énergie, Rapport sur les travaux de la Conférence des Nations Unies sur les sources nouvelles d'énergie* (publication des Nations Unies, n° de vente : 62.I.21) donne un aperçu des travaux ainsi qu'une synthèse des mémoires soumis à la Conférence et des débats dont ils ont fait l'objet. Il contient en outre l'ordre du jour, la liste des membres du Bureau et des autres personnes ayant pris part à la Conférence ainsi qu'une liste de tous les mémoires et rapports présentés.

Le présent volume des Actes de la Conférence groupe les mémoires et rapports ayant trait aux deux points suivants de l'ordre du jour :

I. *Les sources nouvelles d'énergie dans le cadre du développement énergétique ;*

II.D. *Emploi combiné de diverses sources d'énergie ; problèmes d'emmagasinement de l'énergie.*

Les rapports généraux des rapporteurs et le résumé des débats sur chaque point de l'ordre du jour qui a été établi par le rapporteur intéressé sont publiés intégralement, en anglais et en français. Il en est de même des mémoires qui ont été soumis à la Conférence dans les deux langues. Ils sont tous résumés en anglais et en français, à l'exception de ceux qui ont trait au point I de l'ordre du jour.

La documentation est classée par sujet, le rapport général du rapporteur sur le point de l'ordre du jour et le résumé établi par ses soins servant d'introduction. Suivent les mémoires et leurs résumés.

Dans chaque section, les mémoires sont classés dans l'ordre alphabétique des auteurs.

En règle générale, les rapports et mémoires sont publiés sous la forme dans laquelle ils ont été présentés à la Conférence. Toutefois, les corrections nécessaires ont été apportées et certaines figures ont été remaniées; des modifications de rédaction mineures ont de même parfois été faites. On a, dans l'ensemble, conservé aux textes l'originalité de leur présentation. Les références bibliographiques et autres ont d'ordinaire été refondues par souci de clarté, et vérifiées lorsque cela était possible. Cer-

taines des listes bibliographiques ont été omises et les références voulues ont été portées dans des notes de bas de page.

Les vues exprimées n'engagent que leur auteur et n'impliquent aucune prise de position de la part du Secrétariat de l'Organisation des Nations Unies.

Les cotes indiquées après les titres des mémoires et des rapports et dans les renvois qui y sont faits dans le texte correspondent aux cotes utilisées pour la Conférence. On les a cependant abrégées en éliminant « E/CONF.35 », qui doit être maintenu dans les cas où la référence complète est donnée.

Part One. General session

Agenda item I

NEW SOURCES OF ENERGY AND ENERGY DEVELOPMENT

TUESDAY MORNING, 22 AUGUST 1961

Première partie. Séance générale

Point I de l'ordre du jour

LES SOURCES NOUVELLES D'ÉNERGIE DANS LE CADRE DU DÉVELOPPEMENT ÉNERGÉTIQUE

MARDI MATIN, 22 AOÛT 1961

Chairman — Président

Sir Vincent Z. DE FERRANTI

Rapporteur

Emmanuel S. DE BREUVERY

TABLE OF CONTENTS* — TABLE DES MATIÈRES*

General report — Rapport général

			<i>Page</i>
GR/1(GEN)	Les sources nouvelles d'énergie dans le cadre du développement énergétique	E. S. de Breuvery	3
	<i>New sources of energy and energy development</i>		10

Individual papers — Mémoires

GEN/11	Social aspects of the sources of energy	I. H. Abdel-Rahman	16
	<i>Les aspects sociaux des sources d'énergie</i>		22
GEN/12	L'abondance des flux naturels d'énergie et les choix entre les moyens de les capter	P. Ailleret	29
	<i>The abundance of natural energy and the choice of the means of harnessing it</i>		32

* The first title refers to the original language; whenever appropriate, the translation follows in italics.

Le premier titre est celui de la version originale; il est suivi, en caractères italiques, de sa traduction suivant le cas.

			Page
GEN/1	Réflexions sur la valeur économique de l'énergie d'origine géothermique, éolienne et solaire, en particulier après transformation en énergie électrique.	A. M. Angelini	35
	<i>Reflections on the economic value of geothermal energy, wind power and solar energy, especially after conversion to electrical energy</i>		40
GEN/4	Energy as a factor in the progress of under-developed countries	H. Hartley	45
	<i>L'énergie, gage de progrès pour les pays sous-développés</i> . .		51
GEN/8	Socio-economic considerations in the utilization of solar energy in under-developed areas	J. C. Kapur	58
	<i>Considérations sociales et économiques ayant trait à la mise en œuvre de l'énergie solaire dans les régions sous-développées</i>		67
GEN/7	Problems of energy supply in under-developed countries, with special regard to new sources of energy	H. F. Mueller	77
	<i>Les problèmes posés par la fourniture d'énergie aux pays sous-développés, en tenant particulièrement compte des sources nouvelles de force motrice</i>		83
GEN/10	New sources of energy in the world energy economy	B. C. Netschert and G. O. G. Löf	89 103
	<i>Les nouvelles sources d'énergie et l'économie énergétique du globe</i>		
GEN/15	New sources of energy and energy development	M. S. Thacker	120
	<i>Les sources nouvelles d'énergie dans le cadre du développement énergétique.</i>		131

Part Two. Technical session

Agenda item II.D

COMBINED USE OF VARIOUS ENERGY SOURCES AND ENERGY STORAGE PROBLEMS

TUESDAY AFTERNOON, 29 AUGUST 1961

Deuxième partie. Séance technique

Point II.D de l'ordre du jour

EMPLOI COMBINÉ DE DIVERSES SOURCES D'ÉNERGIE; PROBLÈMES D'EMMAGASINAGE DE L'ÉNERGIE

MARDI APRÈS-MIDI, 29 AOÛT 1961

Chairman — Président

Pierre AILLERET

Rapporteurs

Edward W. GOLDING

Farrington DANIELS

TABLE OF CONTENTS* — TABLE DES MATIÈRES*

II.D.1 *Combined use of various energy sources*

Emploi combiné de diverses sources d'énergie

		<i>Page</i>
Rapporteur's statement	E. W. Golding	147
<i>Exposé du rapporteur</i>		148
GEN/5 Power from local energy sources	E. W. Golding	149
<i>La production d'énergie à partir des ressources locales (résumé) . .</i>		154

* The first title refers to the original language; whenever appropriate, the translation follows in italics.

Le premier titre est celui de la version originale; il est suivi, en caractères italiques, de sa traduction suivant le cas.

II.D.2 *Energy storage problems* *Problèmes d'emmagasinement de l'énergie*

General report — Rapport général

		<i>Page</i>
GR/2(GEN)	Energy storage problems	F. Daniels 156
	<i>Problèmes d'emmagasinement de l'énergie</i>	163
	Rapporteur's summation	F. Daniels 171
	<i>Résumé du rapporteur</i>	172

Individual papers — Mémoires

GEN/9	Energy storage based on electrolyzers and hydrogen-oxygen fuel cells	F. T. Bacon 174
	<i>Emmagasinement ou accumulation d'énergie employant les processus électrolytiques et les cellules à hydrogène-oxygène (résumé)</i> . . .	179
GEN/3	Electrochemical energy storage for intermittent power sources .	G. E. Evans 181
	<i>Accumulation électrochimique de l'énergie pour les sources de force motrice à fonctionnement intermittent (résumé)</i>	185
GEN/2	Chemical conversion and storage of concentrated solar energy .	R. J. Marcus and H. C. Wohlers 187
	<i>Conversion chimique et emmagasinement d'énergie solaire concentrée (résumé)</i>	195
GEN/6	The chemical conversion of solar energy to electrical energy . . .	C. R. McCully 196
	<i>Conversion chimique de l'énergie solaire en énergie électrique (résumé)</i>	201
GEN/13	Gas production by destructive distillation using solar heat in combination with a self-sufficient gas generator and gas storage tank for continuous gas and power supply	H. Melzer 203
	<i>Production de gaz par la distillation destructive réalisée au moyen de l'énergie solaire en combinaison avec un générateur à gaz autonome et en réservoir pour la fourniture continue de gaz et de force motrice (résumé)</i>	210
GEN/14	Metal hydride fuel cells as energy storage devices	R. C. Werner and T. A. Ciarlariello 213
	<i>Les cellules à hydrure métallique en tant qu'accumulateurs d'énergie (résumé)</i>	217

EXPLANATORY NOTE

The following symbols have been used in this volume:

A full stop (.) is used to indicate decimals; a comma (,) is used to distinguish thousands and millions.

References to "tons" indicate metric tons, and to "dollars" United States dollars. The term "billion" signifies a thousand million.

Certain commonly accepted abbreviations have been used.

For conversion factors to be used in obtaining metric equivalents of British units, or British equivalents of metric units, see *World Weights and Measures*, Statistical Papers, Series M, No. 21, prepared by the Statistical Office of the United Nations in collaboration with the Food and Agriculture Organization of the United Nations.

NOTE EXPLICATIVE

Les signes suivants ont été employés dans ce volume :

Espace pour séparer les tranches de trois chiffres (milliers et millions) ; virgule (,) pour indiquer les décimales.

Le terme « tonne » s'entend de la tonne métrique et le terme « dollar » du dollar des États-Unis d'Amérique.

Certaines abréviations d'usage courant ont été employées.

Pour la conversion des mesures métriques en mesures anglaises et pour l'opération inverse, consulter la brochure *World Weights and Measures* (Études statistiques, série M, n° 21), que le Bureau de statistique des Nations Unies a établi avec le concours de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture.

Part One

Agenda item I

NEW SOURCES OF ENERGY AND ENERGY DEVELOPMENT

Première partie

Point I de l'ordre du jour

LES SOURCES NOUVELLES D'ÉNERGIE DANS LE CADRE DU DÉVELOPPEMENT ÉNERGÉTIQUE

Rapporteur

Emmanuel S. de BREUVERY, S. J.

Director, Resources and Transport Branch
Department of Economic and Social Affairs
United Nations, New York

Directeur, Ressources et transports
Département des Affaires économiques et sociales
Organisation des Nations Unies, New York

LES SOURCES NOUVELLES D'ÉNERGIE DANS LE CADRE DU DÉVELOPPEMENT ÉNERGÉTIQUE

Emmanuel S. de Breuvery, S. J.

Les perspectives que présente l'utilisation de nouvelles sources d'énergie autres que l'atome, ont été passées en revue dans un rapport d'ensemble des Nations Unies, publié en 1957¹. De grands progrès ont été accomplis depuis lors dans les domaines de l'énergie solaire, de l'énergie éolienne et de l'énergie géothermique comme en témoigne la documentation dont est saisie la Conférence².

Cette Conférence qui se préoccupe essentiellement des applications pratiques est la première à envisager le problème sous cet angle et à traiter en profondeur de l'énergie d'origine solaire, éolienne et géothermique³. C'est un maillon de la chaîne des efforts consacrés au développement économique, en particulier dans les régions sous-développées.

Il était désirable qu'avant d'aborder les différents problèmes que chacune des nouvelles sources d'énergie soulève en ce qui concerne la technique et l'économie de leurs applications on eût l'occasion d'avoir une vue générale des problèmes posés par les sources nouvelles dans leur ensemble et c'est le but poursuivi par cette séance générale sous le titre « Sources nouvelles d'énergie dans le cadre du développement énergétique ».

Huit mémoires ont été préparés pour cette séance. La plupart d'entre eux, plutôt que de se limiter à un aspect particulier du sujet proposé, en abordent plusieurs et en étudient les interconnexions. Pris dans leur ensemble, ces mémoires constituent une remarquable vue d'ensemble des problèmes qui doivent être abordés au cours de la Conférence.

Plutôt que de rendre compte séparément des vues exprimées par chacun des auteurs, il a semblé

préférable, pour mieux répondre au but que poursuit cette session, de présenter ici une sorte de synthèse des idées exprimées et de les grouper sous les quatre rubriques suivantes : *Situations énergétiques et leurs perspectives dans le monde* ; *Énergie et pays sous-développés* ; *Caractéristiques principales des nouvelles sources d'énergie* ; et *Quelques observations liminaires*.

Situations énergétiques et leurs perspectives dans le monde

Plusieurs mémoires (GEN/8, GEN/10, GEN/15) analysent en détail la consommation récente et future d'énergie dans le monde. Cette consommation s'est accrue à un taux accéléré et elle atteint actuellement un niveau d'un peu plus de quatre milliards de tonnes d'équivalent-charbon par an pour les seules sources commerciales d'énergie dite classique. A cela, comme le notent Netschert et Löf, il convient d'ajouter quelque 15 p. 100 pour les sources « non commerciales » (déchets agricoles, bois), qui représentent encore un pourcentage compris entre un tiers et la moitié de la consommation totale d'énergie en Amérique latine, en Afrique et en Asie (GEN/10). Les projections à long terme pour l'avenir sont nécessairement incertaines, les évaluations de la consommation mondiale totale s'inscrivant entre environ quinze et vingt milliards de tonnes d'équivalent-charbon pour l'an 2000. Quelle que soit la valeur de ces évaluations, il n'est toutefois pas douteux que la consommation d'énergie s'accroîtra beaucoup plus rapidement que la population du monde que l'on s'attend à voir à peu près doubler pendant la même période.

L'accélération d'emploi de l'énergie est intimement liée aux espoirs de développement économique et d'accroissement des revenus. Un rapport étroit existe, en effet, entre le revenu national par habitant et la consommation d'énergie, comme le démontre sir Harold Hartley au moyen de données concernant 49 pays (GEN/4). Ce rapport toutefois n'est pas uniforme : Mueller constate des variations dues à des facteurs tels que des différences de ressources naturelles en matière d'énergie, de climat (qui influe sur les besoins de chauffage), de structure de l'industrie et de systèmes de transports, ainsi que des difficultés qu'entraîne la computation statistique dans ce domaine (GEN/7). Des réserves analogues s'appliquent à l'électricité dont la consommation peut, elle aussi, et peut-être mieux encore, servir d'indication pour le niveau de vie atteint.

¹ *Sources nouvelles d'énergie et développement économique* (publication des Nations Unies, n° de vente : 57.II.B.1).

² Cette documentation consiste en 20 rapports généraux de rapporteurs, un pour chaque session ou sujet, et en 250 mémoires.

³ Un certain nombre de réunions internationales spécialisées, tenues au cours de la dernière décennie, ont été consacrées essentiellement à l'examen des principes scientifiques et de la recherche fondamentale, surtout dans le domaine de l'énergie solaire, notamment à Tucson et Phoenix (Arizona [États-Unis d'Amérique]) en 1955, à Phoenix en 1957, à Montlouis (France) en 1958 et à New Delhi en 1954, lors d'un colloque organisé par l'Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture (UNESCO) et portant également sur l'énergie éolienne. Jamais l'énergie géothermique n'a été traitée de façon comparable sur le plan international. Les trois sources d'énergie ont aussi été discutées dans une certaine mesure une fois ou l'autre dans le cadre de réunions plus étendues, par exemple celles de la Conférence mondiale de l'énergie à Londres en 1950, à Rio de Janeiro en 1954, à Vienne en 1956, à Belgrade en 1957, à Montréal en 1958 et à Madrid en 1960.

Les modifications des revenus et de la consommation d'énergie influent les unes sur les autres. On ne saurait dire nettement que l'un de ces éléments est la cause de l'autre. Mais on peut formellement conclure qu'un développement économique de quelque importance ne peut avoir lieu si l'on ne dispose pas de ressources d'énergie et surtout d'énergie électrique que l'on puisse mettre en valeur. C'est là un fait largement reconnu, et dont se sont inspirés divers plans de développement économique.

La relation revenu-énergie apparaît clairement lorsque l'on étudie la répartition géographique de la consommation d'énergie. Kapur constate par exemple qu'en 1960 les pays dont l'industrialisation est avancée représentaient 30 p. 100 de la population totale, mais absorbaient 84 p. 100 de la consommation totale d'énergie (GEN/8), les pourcentages correspondants étaient 50 et 15 pour les pays près d'atteindre une autonomie économique ou s'en rapprochant, tandis que les pays moins avancés d'Afrique, d'Asie et d'Amérique latine représentaient seulement 1 p. 100 de la consommation mondiale d'énergie, bien que leur population constituât 20 p. 100 du total. Ses projections pour 1975 et 2000 montrent qu'il y aura une légère variation relative de la population et de l'utilisation d'énergie, dans le deuxième groupe surtout, mais aussi dans le troisième du point de vue de la consommation à long terme. Cette variation est confirmée par les taux moyens de croissance dans chacune des régions considérées (GEN/10).

On satisfait aux besoins énergétiques en recourant à plusieurs sources (analysées dans GEN/10), principalement au charbon et au pétrole. L'emploi varié de ces sources est largement fonction des ressources naturelles d'énergie, qui sont très inégalement réparties entre les divers pays, fait qui en soi est d'une importance capitale si l'on veut évaluer le rôle futur des sources nouvelles d'énergie. Le recours à diverses sources reflète également des différences dans l'utilisation finale de l'énergie, laquelle parfois (pour les transports automobiles, par exemple) est liée à des sources particulières d'énergie qui ne peuvent être facilement remplacées.

L'importance relative, dans la consommation de telles ou telles sources d'énergie a changé rapidement; des déchets agricoles et du bois on est passé au charbon, au pétrole et au gaz naturel. La situation, à l'heure actuelle, est encore en pleine évolution. On peut envisager qu'on doive faire appel à des sources nouvelles, mais il faut aussi tenir compte du fait que des améliorations ne cessent d'être apportées dans la production et l'utilisation des sources classiques, ainsi que le montre la très claire analyse de Thacker (GEN/15). Cette analyse mentionne, entre autres, les possibilités que peuvent présenter à cet égard : la réduction de l'évaporation de l'eau des réservoirs, l'introduction de turbopompes réversibles, de turbines à contre-pression et des procédés de conversion directe; la transmission sous des tensions plus élevées, une meilleure répartition des facteurs de charge, une meilleure utilisation du

charbon, l'emploi de moteurs diesel pour les transports, ainsi qu'une politique d'implantation plus rationnelle des entreprises industrielles.

La configuration fonctionnelle de l'utilisation de l'énergie présente aussi de l'importance lorsqu'il s'agit d'évaluer les sources nouvelles et de faire des plans pour la production d'énergie. On peut la diviser en deux catégories fondamentales : la chaleur et la force motrice. A l'échelle mondiale, on peut estimer que l'utilisation de l'énergie sous forme de chaleur représente environ 62 p. 100 (dont 33 pour l'industrie et 29 pour les usages domestiques) et sous forme de force motrice 38 p. 100 (dont 16 pour l'industrie, 2 pour les usages domestiques, 19 pour les transports et 1 pour l'agriculture) [GEN/10]. La configuration fonctionnelle varie très sensiblement d'un pays à l'autre, et d'une région à l'autre dans certains pays. Dans les pays industrialisés, par exemple (comme le souligne Mueller dans le mémoire GEN/7, où il utilise une définition légèrement différente de la « force motrice »), 85 à 90 p. 100 vont à la production de chaleur, dont un tiers pour le chauffage des locaux, et seulement 10 à 15 p. 100 sont destinés à l'électricité, dont un peu plus de la moitié s'applique à des moteurs électriques. D'autre part, comme le remarquent justement Netschert et Löf, « compte tenu de l'augmentation bien connue de la productivité et des revenus qu'assure l'électrification, on peut admettre en confiance que, tout au moins dans les pays sous-développés du monde, la place de l'électricité dans le bilan énergétique total sera plus considérable à l'avenir » (GEN/10).

Constatons, pour conclure, que les sources nouvelles, du fait même qu'elles sont « nouvelles », n'apportent qu'une contribution proportionnellement insignifiante à la consommation totale actuelle d'énergie dans le monde. A ce propos, nos auteurs le notent souvent, l'adjectif « nouvelles » qualifie surtout les méthodes récemment imaginées pour la mise en valeur des sources; celles-ci en elles-mêmes existent et ont été utilisées depuis fort longtemps dans une mesure limitée. Les promesses qu'elles comportent reposent en fait pour beaucoup sur des « percées » technologiques, récentes ou à venir.

Il est difficile d'évaluer, dans cet ensemble, le rôle futur des sources nouvelles d'énergie. Il se peut qu'il ne soit jamais quantitativement considérable, malgré la raréfaction des ressources connues de combustibles et des lieux où l'énergie hydro-électrique peut encore être mise en valeur. Mais cela ne doit pas faire sous-estimer l'importance de la contribution qu'elles peuvent apporter à l'échelon des besoins énergétiques locaux dans le monde et tout particulièrement dans les régions sous-développées⁴.

⁴ Il convient de noter que certaines applications de l'énergie éolienne pour l'électricité ou celles de l'énergie solaire pour le chauffage de l'eau et le chauffage des locaux semblent, dans certains cas, pouvoir entraîner des économies non négligeables même dans les pays les plus avancés. Quant à l'énergie géothermique, lorsqu'on peut en disposer dans des conditions favorables comme en Italie ou en Nouvelle-Zélande, par exemple, elle peut fournir de l'électricité à meilleur compte que toute autre source.

Énergie et pays sous-développés

Nous n'avons pas de critère valable qui soit généralement applicable quand il s'agit d'élaborer un plan pour l'approvisionnement en énergie des pays sous-développés, et les besoins à cet égard aussi bien que la manière de les satisfaire au mieux sont à déterminer dans chaque cas particulier (GEN/7).

Certains traits cependant sont communs aux pays sous-développés et nous pouvons les passer brièvement en revue en commençant par ceux qui concernent l'électrification et en abordant ensuite les situations qui se présentent à l'échelon local pour les autres applications de l'énergie. Ces situations disparaissent dans les vues d'ensemble qui nous sont parfois communiquées, ce sont elles cependant qui constituent l'élément de base, celui dont les modifications et les améliorations sont nécessaires si l'on veut changer les niveaux de vie et donner une forte impulsion au développement. Ce sont les situations dans lesquelles des applications à petite échelle et des méthodes non traditionnelles peuvent faire beaucoup.

Quand on envisage la situation de l'électricité dans les pays sous-développés, il convient tout d'abord de rappeler qu'aucun de ces pays ne possède, et vraisemblablement ne possédera pas avant longtemps, un réseau d'interconnexion qui couvre tout le territoire. Les réseaux, quand ils existent, sont généralement limités à des zones relativement restreintes : enclaves industrielles et banlieues autour des villes et des ports les plus importants⁵. Bien que la capacité de production d'énergie mise à leur disposition soit souvent insuffisante et qu'elles subissent parfois de graves interruptions de courant, ces zones, comparables souvent aux régions développées de l'Occident, disposent, grâce à leurs centrales interconnectées, d'une énergie continue; le facteur de charge est relativement élevé et les prix de l'électricité y sont raisonnables. Dans les cas de ce genre le recours à des sources nouvelles d'énergie ne peut être évidemment envisagé que sur la base de la comparaison des coûts de production.

Plus représentatives sont les zones où existent des centrales isolées, d'une capacité variant de quelques centaines à quelques milliers de kilowatts, alimentées par des moteurs diesel, de petites turbines hydro-électriques ou, plus récemment, aussi par des turbines à gaz. Ces centrales, dont on ne peut normalement envisager l'interconnexion avant longtemps, ont eu fréquemment pour origine l'ouverture de mines ou de manufactures et, depuis quelque temps et dans certaines régions, sont aussi dues à l'initiative des gouvernements dans l'attente que soit justifié le transport de force à longue distance. Dans ces zones, en raison soit de la petite dimension des centrales, soit des coûts élevés du carburant, soit

encore d'un bas facteur de charge ou de tous ces éléments combinés, le coût de l'électricité est élevé, la moyenne variant de 30 à 80 mills par kilowatt-heure et atteignant souvent des niveaux bien supérieurs⁶. Il serait sans doute possible de réduire les coûts en utilisant, suivant le cas, d'autres sources d'énergie de caractère continu telles que l'énergie géothermique (à condition qu'on puisse être assuré d'un facteur de charge raisonnable) ou des procédés qui permettraient l'économie des sources d'énergie déjà employées, comme ceux qui pourraient être basés sur l'emploi intermittent de l'énergie solaire et de l'énergie éolienne, ou encore par une combinaison avec d'autres sources de provenance locale.

Toutefois, c'est une troisième catégorie de zones qui est proprement caractéristique des conditions prévalentes en pays sous-développés, la catégorie des zones « écartées » où la production d'électricité n'existe pas. La majorité de la population y demeure et y vit. Elles peuvent être « écartées » géographiquement parlant, et c'est le cas lorsqu'elles se trouvent comme perdues à l'intérieur de vastes territoires où les obstacles qui s'opposent à l'apport d'électricité sur la base des procédés classiques demeureront pratiquement insurmontables, pour très longtemps tout au moins. Elles peuvent aussi se trouver « écartées », et c'est souvent le cas, économiquement et non plus géographiquement parlant, en raison surtout du manque de moyens de transport. De meilleures perspectives d'électrification s'offrent alors pour elles, à condition toutefois que l'introduction éventuelle de moyens de transport modernes ou le développement du commerce et de l'industrie s'avèrent suffisants pour susciter une demande d'énergie qui justifie l'établissement de lignes de transmission ou la construction de centrales⁷. Ces zones, toutefois, sont si nombreuses que la plupart d'entre elles devront attendre longtemps, sans doute, avant que cela se produise, ne serait-ce que parce que l'électrification à grande échelle des villages et des campagnes dépasse de beaucoup les moyens financiers et techniques de la plupart des pays sous-développés.

Quelques chiffres relatifs à l'Inde, pays qui peut être considéré comme l'exemple typique d'une économie agricole et minérale, peuvent nous servir à illustrer les situations que nous venons de passer en revue. Même avec une industrialisation et une urbanisation accélérées, l'Inde, comme le fait remarquer Kapur, aurait en 1981 encore 75 p. 100 de sa population (soit 480 millions d'habitants) qui résideraient encore dans de petites communautés agricoles (GEN/8). De grands progrès ont été faits

⁶ Un dollar des États-Unis, ou 100 cents, est égal à 1 000 mills. Les coûts de production dans les pays industriels varient généralement de 4 à 10 mills.

⁷ Une sous-catégorie de zones « écartées » comprendrait les zones relativement peu peuplées, mais susceptibles de s'ouvrir à la suite de quelque événement présentant un intérêt économique majeur, tel que la découverte de minerais. En pareil cas, on envisage généralement les moyens de fournir de l'électricité dès le début de l'entreprise et le problème se résume à choisir la solution la moins coûteuse.

⁵ Voir, à ce sujet, J. Barnea et E. S. de Breuvery, « Caractéristiques de la situation énergétique dans les pays sous-équipés » (en anglais, avec résumé en français), *Small and Medium Power Reactors, Vol. II, Conference Proceedings, Vienna, 5-9 September 1960* [Vienne, Agence internationale de l'énergie atomique, 1961 (STI/PUB/30)], p. 337.

cependant : toutes les villes de plus de 20 000 habitants, sauf deux d'entre elles, ont été « électrifiées », et il est prévu dans le troisième plan quinquennal que toutes les villes de plus de 5 000 habitants (au nombre de 4 542 d'après le recensement de 1951) seront alimentées dans une certaine mesure en électricité. Des progrès ont été faits également en vue de fournir l'électricité aux villages (moins de 5 000 habitants), qui abritent la masse de la population : le nombre de villages disposant d'électricité est passé d'environ 2 800 en 1951 à 15 400 en 1961 ; on compte qu'il atteindra 29 500 en 1966. Mais cela laisserait encore sans électricité, même dans cinq ans, à peu près 527 000 de ces villages et communautés agricoles (*op. cit.*).

Étant donné les conditions existant dans les régions sous-développées, et bien qu'il soit difficile de déterminer la valeur économique exacte qui en résulterait, on ne saurait mettre en doute l'amélioration des conditions de vie que représenterait pour le paysan la mise à sa disposition d'électricité ou de toute autre forme d'énergie. Actuellement, ce paysan, pour cuire ses aliments, utilise largement le fumier et d'autres combustibles du même genre et, pour ses travaux, doit compter surtout sur la force humaine ou animale.

La question n'est donc pas de savoir si les nouvelles sources d'énergie peuvent économiquement concurrencer les sources classiques, mais si elles peuvent être rendues disponibles d'une manière utile et efficace ou si on doit renoncer à toute énergie dans les zones que nous avons passées en revue auparavant. Kapur a fait une évaluation détaillée de l'importance et de la nature des besoins énergétiques qu'il serait possible de satisfaire, en entraînant une augmentation notable de la productivité et du revenu par habitant dans une communauté rurale de 1 000 habitants en Inde, compte tenu de la possibilité d'utiliser l'énergie solaire, et il a fait à ce sujet des estimations concernant les coûts et l'emploi. Son exposé comporte une franche discussion des problèmes soulevés par le financement et par la formation qui seraient alors à envisager. Golding, en vue d'une des sessions techniques qui suivent cette session générale, a aussi élaboré un projet de fourniture d'énergie à partir de ressources locales pour un village de 20 à 30 familles en prenant en considération les caractéristiques et le coût de l'énergie solaire, de l'énergie éolienne, et d'autres sources, ainsi que les facteurs de charge qui peuvent être envisagés et leur répartition dans le temps (GEN/5). Certes, ces projets ne sont encore que théoriques mais ils donnent tout au moins quelques indications sur les situations énergétiques auxquelles pourraient être utiles beaucoup des conclusions présentées dans les mémoires soumis à la présente conférence.

Caractéristiques principales des nouvelles sources d'énergie

Chacune des nouvelles sources d'énergie est étudiée systématiquement, bien que de différents points de

vue, dans les mémoires présentés par Angelini (GEN/1), par Netschert et Löf (GEN/10) et par Thacker (GEN/15). Les remarques faites par Ailleret (GEN/12) concernent surtout les grands aéromoteurs, et celles de Kapur (GEN/8) intéressent plus particulièrement l'énergie solaire.

Dans cette section, nous nous attacherons surtout aux traits principaux qui caractérisent les trois nouvelles sources d'énergie, soit que ces traits leur soient communs et communs aussi à d'autres sources d'énergie, soit qu'ils puissent servir à distinguer ces sources entre elles et à les distinguer des autres.

Avant, toutefois, d'aborder notre sujet, il est utile de rappeler brièvement en quoi consiste l'énergie géothermique, l'énergie éolienne et l'énergie solaire, et de faire une revue sommaire des méthodes utilisées pour leur mise en valeur⁸.

Pour que de l'énergie géothermique soit disponible, « il faut, généralement parlant, une combinaison plutôt fortuite de grosses masses de roches chaudes fracturées ou poreuses, situées à une profondeur ne dépassant pas quelques centaines de mètres, un apport naturel d'eau à cette source de chaleur et une couche de roche imperméable entre la zone chaude et la surface. Si on fonce des puits dans ces matières chaudes, on peut en soutirer de la vapeur sous une pression atteignant plusieurs dizaines de kilogrammes par centimètre carré, d'une manière entièrement analogue à celle dont on se sert pour la production du gaz naturel. Que l'on dispose d'un nombre suffisant de puits et de moyens appropriés pour accumuler la vapeur et on pourra exploiter une centrale électrique constituée, le plus souvent, par une turbine à vapeur, un condenseur et une génératrice d'électricité (GEN/10). La température de la vapeur naturelle est environ de 100 à 300 °C à la bouche des puits si bien qu'il est possible aussi d'utiliser l'énergie géothermique directement sous forme de chaleur plutôt qu'en la convertissant tout d'abord en électricité. Ce genre d'exploitation se heurte toutefois aux limites pratiques qu'impose le transport de la vapeur.

L'énergie éolienne est l'énergie cinétique disponible dans une masse d'air en mouvement. On la capte au moyen d'un rotor ou d'une hélice qui la transforme en énergie mécanique directement utilisable ou, selon la tendance moderne, en vue d'actionner une génératrice d'électricité. Les éléments de base qui permettent de déterminer la quantité d'énergie que l'on peut obtenir sont la vitesse du vent, la surface de captage couverte par le rotor ou l'hélice et le rendement de l'installation. Les aéromoteurs sont conçus pour fournir leur puissance normale compte tenu d'une certaine vitesse du vent et, à cette vitesse, ils captent l'énergie de la masse d'air en mouvement dans une proportion de 35 à 40 p. 100, bien que le rendement maximum théorique soit approximativement de 60 p. 100.

⁸ Outre les mémoires préparés pour cette séance, voir aussi *Sources nouvelles d'énergie et développement économique* (publication des Nations Unies, numéro de vente : 57.II.B.1).

L'énergie solaire nous parvient sous la forme de rayonnement et est captée au moyen de procédés de conversion que l'on peut diviser en deux grandes catégories suivant qu'on veut utiliser la chaleur ou la lumière. Les procédés thermiques présentent une grande variété suivant les températures que l'on désire obtenir. Les basses températures, utilisées pour le chauffage de locaux et de l'eau ou la distillation de l'eau de mer, par exemple, sont obtenues au moyen de simples collecteurs-plans comprenant des plaques revêtues d'une substance noire qui absorbe le rayonnement, et pouvant chauffer l'eau ou tout autre fluide utilisé pour le transfert de la chaleur. Pour obtenir des températures élevées, on doit recourir à des lentilles ou à des réflecteurs qui captent seulement le rayonnement direct du soleil et doivent être orientés fréquemment pour être maintenus face au soleil. La chaleur ainsi produite a plusieurs emplois pratiques, la propulsion de moteurs entre autres; elle peut aussi être directement transformée en électricité au moyen de générateurs thermo-électriques, sans passer par le stade de l'énergie mécanique. Le rayonnement solaire peut, en tant que lumière, être aussi directement transformé en électricité au moyen de cellules photo-électriques. Enfin, on connaît le procédé photochimique naturel (photosynthèse) qui est à la base de toute croissance végétale. On a conçu des procédés photochimiques artificiels, qui offrent un intérêt d'autant plus considérable qu'une plus grande quantité de l'énergie absorbée peut être récupérée à la faveur d'une réaction de sens contraire se produisant dans des conditions bien déterminées. Les recherches qui sont actuellement poursuivies s'efforcent de trouver des réactions pratiques et contrôlables qui, tout en offrant la possibilité d'emmagasiner de l'énergie, dégagent de la chaleur utile ou, mieux encore, font naître un courant électrique.

Les caractéristiques principales des nouvelles sources d'énergie font l'objet du mémoire d'Angelini (GEN/1) et sont examinées assez longuement par Netschert et Löf, en particulier (GEN/10). Elles ne sont considérées ici que dans la mesure où en dépendent la valeur économique générale des sources d'énergie en question, la technologie employée pour l'exploitation de ces dernières et les buts qu'on peut se proposer d'atteindre en les utilisant.

Parmi ces caractéristiques, les plus importantes sont peut-être celles qui ont trait à la régularité et la continuité. L'énergie géothermique présente un flux régulier et continu; par contre, l'énergie solaire et éolienne sont des sources intermittentes, ce qui soulève des problèmes d'accumulation ou des problèmes de combinaison avec d'autres sources d'énergie quand il s'agit de satisfaire une demande ininterrompue ou s'il est impossible d'aligner dans le temps la demande sur l'offre. L'énergie solaire n'est disponible que pendant les heures diurnes qui varient suivant les saisons (sans oublier que les collecteurs à foyer sont particulièrement sensibles au caprice des conditions atmosphériques). La disponibilité de l'énergie éolienne n'est jamais complètement prévi-

sible dans le temps bien qu'elle varie peu, en un lieu donné, d'une année à l'autre ou pendant des périodes comparables de moindre durée.

Le plus ou moins grand degré de permanence est un autre facteur qui doit être pris en considération. L'énergie solaire et l'énergie éolienne, tout au moins, sont inépuisables. Elles constituent des énergies « de revenu » tout comme l'énergie hydro-électrique. L'énergie géothermique, présente des caractères comparables à ceux des sources classiques d'énergie non renouvelables; mais la question n'est pas tout à fait claire car, dans certains cas, il arrive de constater une élévation plutôt qu'un abaissement de la température lorsqu'on ponctionne des dépôts de vapeur. Il convient d'ajouter en outre que ces trois sources n'ont guère d'autre emploi que leur conversion en énergie utile et qu'elles peuvent donc être utilisées éventuellement en vue de conserver, pour d'autres usages, les ressources classiques épuisables.

L'ordre de grandeur du rayonnement solaire sur la surface de la terre est énorme, et il en est de même de la force physique totale du vent. Comme le souligne Ailleret (GEN/12), le vent et le soleil représentent chacun des puissances par unité de surface de l'ordre d'un kilowatt par mètre carré, soit à peu près 10 000 fois la « densité » de la consommation totale d'énergie, même dans les plus industrialisés; par conséquent, d'un point de vue purement théorique, elles pourraient faire face à une expansion considérable des besoins, même avec un rendement de conversion peu élevé. La quantité d'énergie géothermique disponible est encore relativement mal connue; à en juger, toutefois, par les indications dont on dispose à la surface du globe, telles que les sources thermales nombreuses mais encore inexplorées, les réserves pourraient fort bien en être beaucoup plus considérables que l'on a généralement tendance à le croire. Mais il importe de se garder des illusions possibles quand on parle de quantités disponibles, et il faut souligner la différence qui existe entre disponibilité physique et disponibilité économique, cette dernière variant sans cesse en raison des progrès technologiques et dépendant étroitement des coûts d'implantation et d'exploitation ainsi que d'autres facteurs économiques propres aux pays intéressés.

Pour ce qui est de la répartition géographique des ressources en énergies nouvelles et de l'implantation des procédés d'exploitation, il importe de noter que l'énergie géothermique ne se rencontre que dans un nombre limité de régions, qui ne sont pas toujours caractérisées par une demande et une pénurie notables d'énergie. Comme l'énergie hydro-électrique, l'énergie géothermique ne peut être exploitée que dans des endroits strictement déterminés par les conditions géologiques et géographiques. Nous avons déjà signalé que, convertie en électricité, elle peut être transportée à des distances considérables; mais en tant que vapeur ou eau chaude, on ne peut envisager, sans perte sérieuse d'énergie, que des canalisations couvrant des distances limitées (15 à 45 kilomètres environ comme

en Islande). L'énergie solaire, bien qu'elle soit surtout utilisable à l'intérieur d'une bande comprise entre les latitudes de 40° N. et 40° S., bénéficie d'une grande flexibilité quant au choix des emplacements d'exploitation. L'énergie éolienne, elle aussi, est facilement accessible sans être restreinte à une zone climatique particulière, mais le choix des emplacements d'exploitation doit être fait avec un soin particulier si l'on veut obtenir des résultats optima.

On peut considérer que la technologie dont on dispose pour l'exploitation des nouvelles sources en est relativement à ses débuts. Toutefois, l'équipement requis pour l'exploitation de l'énergie géothermique est pratiquement au point; celui dont on dispose pour l'énergie éolienne connaît des variétés considérables, mais on est moins avancé en ce qui concerne les applications solaires.

Lorsqu'on examine quelles sont les dimensions que l'on peut envisager pour les installations propres à l'exploitation des sources nouvelles, on peut dire, en général, qu'elles présentent une grande flexibilité. « Dans une gamme de puissance peu étendue, dont la limite inférieure correspondrait à une fraction de kilowatt, les groupes solaires et les éoliennes sont très souples, et par conséquent tout à fait indiqués pour les fermes isolées et les collectivités peu nombreuses. » Les grandes installations éoliennes n'entraînent une économie dimensionnelle que jusqu'à un certain point (peut-être 1 000 ou 2 000 kilowatts), tandis que la capacité de l'énergie de provenance solaire s'accroît normalement en proportion directe de la dimension des collecteurs, et par conséquent l'augmentation de la dimension n'entraîne guère d'économie. Les dimensions des installations géothermiques dépendent normalement des conditions locales de production de la vapeur naturelle : l'expérience indique, toutefois, qu'une grande variété est possible, depuis les petits appareils élémentaires sans condenseurs jusqu'aux vastes centrales à groupes multiples de 25 à 30 000 kilowatts chacun, permettant des économies croissantes de coût et de consommation de vapeur par unité de production.

Enfin, et pour en terminer avec les aspects économiques les plus importants, on doit noter que l'utilisation de chacune des trois sources d'énergie exige un investissement initial relativement considérable, tandis que les frais d'exploitation sont minimes. Il s'ensuit que le coût de l'énergie utile des nouvelles sources, comme dans le cas de l'énergie hydro-électrique, est déterminé avant tout par les coûts fixes (intérêts et amortissement) résultant de l'investissement des capitaux pour la mise en valeur et de l'exploitation. Ceci étant, il est essentiel de concentrer les efforts en vue de réduire au minimum les frais initiaux et de porter au maximum la longévité de l'équipement. Pour la même raison, il convient d'utiliser, dans toute la mesure du possible, la main-d'œuvre et les matières premières locales, ce qui réduirait grandement les dépenses en devises étrangères.

Quelques observations liminaires

Ce rapport ne serait pas complet s'il ne rendait compte d'une série d'observations qui émaillent les mémoires présentés à cette session et méritent de retenir notre attention.

Une question liminaire est soulevée par Ailleret dans la première partie de son rapport (GEN/12). Même en se limitant aux trois sources d'énergie qui font l'objet de cette conférence, il est encore possible, dit-il, de citer un assez grand nombre de procédés qui pourraient permettre aux sources d'énergie de jouer un rôle important le jour où ces procédés seraient économiquement viables. Convient-il alors de disperser les efforts sur toutes les voies possibles ou doit-on dès maintenant faire un choix et se concentrer sur les voies les plus prometteuses? L'auteur, après avoir noté les distinctions qui s'imposent selon qu'il s'agit de recherche pure ou de recherche appliquée, remarque justement que si les modes possibles de captation des énergies sont nombreux, il existe aussi une grande variété de problèmes énergétiques à résoudre. Ce sont ces problèmes qu'il convient donc de définir en premier lieu. La tâche ne devrait pas présenter de grandes difficultés si l'on est d'accord avec Kapur pour penser que la question est de « créer des conditions propices au travail et à l'effort productif dans toute la mesure du possible, dans le cadre des limites actuelles des programmes de recherche et de mise au point » (GEN/8). C'est sur cette base que la sélection des procédés devrait se faire, en même temps que l'effort devrait porter sur leurs réalisations les moins coûteuses possibles.

Il convient de noter ici que l'expression « économiquement viable », ou toute autre de même nature, peut prêter à une certaine confusion. Comme le notait déjà le rapport des Nations Unies sur les sources nouvelles d'énergie et le développement économique : « Lorsqu'on veut évaluer les sources d'énergie nouvelles pour la production d'électricité, les considérations d'ordre économique qui sont valables dans le cas des régions industrielles ne le sont pas nécessairement dans celui des régions sous-développées. Pour des collectivités isolées, par exemple, les avantages sociaux et économiques de l'électrification peuvent être tels qu'ils justifient des frais qui, dans une situation différente, seraient considérés comme prohibitifs. » Ces vues sont fortement soutenues et illustrées par Kapur et Abdel-Rahman (GEN/11).

A propos de l'énergie d'origine solaire ou éolienne, tous nos auteurs signalent les problèmes posés par leur caractère d'intermittence. Il semble qu'ici encore on doive faire une distinction suivant qu'il s'agit des conditions régnant dans des sociétés avancées ou de celles que connaissent les communautés rurales dont cette conférence se préoccupe particulièrement. Kapur fait à ce sujet une série de remarques qu'il convient de souligner. « Dans les communautés rurales situées dans les régions sous-développées où d'importantes fractions de la popu-

lation restent partiellement ou totalement sans emploi, les problèmes de l'intermittence et de la mise en réserve perdent la majeure partie de leur sens. Est-il très important d'avoir du soleil ou du travail tous les jours, sauf les dimanches et les jours de fête? Pourquoi devons-nous appliquer les points de vue et les considérations économiques propres aux sociétés avancées dans une situation où ceux-ci ne sont nullement justifiés? » Kapur a pris la peine de dresser une liste des besoins qui peuvent être presque entièrement satisfaits même si l'apport d'énergie est intermittent et il note qu'en utilisant rationnellement ces apports intermittents, il serait possible non seulement d'augmenter la consommation et la production des articles servant à satisfaire les besoins quotidiens, mais aussi de susciter des marchés plus larges pour les produits du travail de la communauté.

Certains obstacles d'ordre psychologique qu'il faudra surmonter si l'on veut qu'un large appel soit fait aux nouvelles sources d'énergie sont signalés par Netschert et Löf, à la fin de leur rapport (GEN/10). L'un des principaux, à leur avis, est l'apathie à laquelle se heurtent souvent les procédés nouveaux, sans oublier que les coutumes et les traditions ont tendance à s'opposer à tout changement par lequel elles risqueraient d'être bouleversées. En outre, on doit compter avec le manque de compréhension relativement aux possibilités d'économie qui peuvent provenir de l'usage de ces nouveaux procédés. Cela est particulièrement vrai toutes les fois qu'il s'agit d'applications à petite échelle. Les auteurs citent en exemple qu'on « dispose au Japon d'un chauffe-eau solaire simple qui s'amortit en économies de combustible en quatre mois environ, et cependant on ne semble pas clairement apprécier ses économies possibles dans les pays et les régions ayant des prix de combustible encore plus élevés que ceux du Japon ». Les auteurs estiment que pour vaincre ces obstacles, il est souhaitable, non seulement, que les chercheurs s'attachent à réduire au minimum les coûts initiaux nécessaires à l'utilisation des nouvelles sources, mais aussi que les économies qui peuvent être obtenues grâce à ces sources soient systématiquement mises en évidence et largement diffusées.

Il semble approprié, à cet égard, de signaler le rôle que pourraient jouer des centres expérimentaux dans les diverses régions du monde où abondent les communautés rurales qui ne pourront pas profiter dans un avenir prévisible des services que rendent les formes classiques d'énergie. C'est Kapur encore qui préconise la création de ces centres, en se plaçant à un point de vue différent, qui mérite également de retenir l'attention de cette conférence. Ces centres, dit-il, permettraient de contribuer à « résoudre certains des problèmes les plus pressants de la technologie dans les conditions réelles d'exploitation et d'étudier les répercussions des progrès obtenus sur la vie de ces communautés ».

Certaines remarques de grande portée dues à Abdel-Rahman (GEN/11) peuvent utilement servir de conclusion à ce rapport. Après avoir rappelé que l'étude des attitudes et des valeurs sociales qui entrent en jeu lorsque se pose la question de l'usage de l'énergie est indispensable pour déterminer le rôle que les nouvelles sources peuvent être appelées à jouer, l'auteur en vient aux responsabilités qui nous incombent à tous. L'examen du contexte sociologique, spécialement au niveau international, note-t-il, montre que des valeurs nouvelles se font jour, différentes des valeurs ayant cours auparavant. Dans le passé, et selon la ligne traditionnelle de l'acquisition de techniques nouvelles, la préoccupation du développement humain restait, en quelque sorte, en marge de la recherche. La situation tend de plus en plus à se retourner : la préoccupation du développement occupe maintenant le devant de la scène et répond à une intention délibérée, et le développement lui-même est de plus en plus le résultat d'un programme fortement mûri. Par ailleurs, c'est un impératif maintenant communément accepté dans la société internationale, que cette dernière doive s'efforcer d'obtenir pour tous ses membres un minimum de bien-être et de leur donner des chances égales de progrès.

C'est dans cette perspective que la promotion de techniques nouvelles pour la production de l'énergie doit être envisagée et que les efforts des chercheurs doivent être soutenus. C'est, en fait, ce que cette conférence a pour but de promouvoir.

NEW SOURCES OF ENERGY AND ENERGY DEVELOPMENT

(Translation of the foregoing report)

Emmanuel S. de Breuvery, S. J.

Prospects for the practical utilization of new sources of energy other than the atom were reviewed in a comprehensive United Nations report published in 1957.¹ Much progress has since been made in the fields of solar energy, wind power and geothermal energy, as evidenced by the documentation submitted to this Conference.²

Primarily concerned with practical applications, this Conference is the first one to have this focus and to deal in depth with solar energy, wind power and geothermal energy.³ It is another link in the chain of efforts devoted to economic development, especially of the less developed areas.

Before taking up the specific economic and technical problems raised by each of these new sources of energy, a broad general survey of the entire field may perhaps be appropriate. This is the purpose of the present introductory session on the theme "New Sources of Energy and Energy Development".

Eight papers are to be presented to this session. Most of them are not confined to a single aspect of the theme, but touch on several, with special reference to the interrelations. Taken together, as an integral whole, these papers provide a remarkable review of the problems to be discussed during the Conference.

Instead of giving a summary of the views expressed by each of the authors, it has seemed more in keeping with the objectives of this introductory survey to present what is, in a way, a synthesis of the content grouped under the following four headings: *Energy situations in world perspective*; *Energy and under-developed countries*; *Salient characteristics of the new sources of energy*; and *Some general observations*.

¹ *New Sources of Energy and Economic Development* (United Nations publication, Sales No. : 57.II.B.1).

² The documentation consists of 20 rapporteurs' general reports, one for each session or subject, and 250 individual papers.

³ A number of specialized international meetings, held over the last decade, have been devoted primarily to the discussion of scientific principles and basic research, especially in the solar energy field such as at Tucson and Phoenix (Arizona, United States) in 1955, Phoenix in 1957, Montlouis (France) in 1958, and a symposium also including wind power sponsored by the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization at New Delhi in 1954. Geothermal energy has never been similarly covered at the international level, but the three energy sources have been dealt with to some extent at one time or another as part of larger meetings, for example, of the World Power Conference at London in 1950, Rio de Janeiro in 1954, Vienna in 1956, Belgrade in 1957, Montreal in 1958 and Madrid in 1960.

Energy situations in world perspective

Several papers (GEN/8, GEN/10, GEN/15) analyse in some detail recent and perspective world energy consumption, which has been growing at an accelerating pace and is currently at a rate of somewhat more than 4,000 million tons of coal equivalent per year for so-called conventional commercial energy sources alone. To this consumption of commercial energy should be added, as pointed out by Netschert and Löf (GEN/10), some 15 per cent for "non-commercial" sources (agricultural waste, wood), which still account for one-third to one-half of the total energy consumption in Latin America, Africa and Asia. Long-term projections for the future are necessarily uncertain, estimates of the world total ranging from about 15,000 to 20,000 million tons of coal equivalent by the year 2000. Whatever the estimates, however, they leave no doubt that energy consumption will grow much more rapidly than the world population, which is expected approximately to double over the same period.

This acceleration is intimately associated with expected economic development and rising income. Per capita national income and energy consumption are closely correlated, as demonstrated by Sir Harold Hartley with figures from forty-nine countries (GEN/4). The relationship, however, is not simple. There are deviations, as Mueller points out, due to such factors as differences in energy resource endowment, climate (affecting heating requirements), industrial structure and transportation systems, as well as statistical complications (GEN/7). Similar reservations attach to electricity, which may also, and perhaps better, be taken as an index of level of living.

Changes in income and energy consumption interact. Neither of these elements can be clearly isolated as the cause of the other. But it can be definitely concluded that availability of energy, especially of electric power, is absolutely indispensable for any substantial economic development. This is widely recognized, and is reflected in various economic development plans.

The income-energy relationship shows up clearly in the geographical distribution of energy consumption. Kapur thus finds that in 1960, advanced industrialized countries accounted for 30 per cent of the total population but 84 per cent of the total energy consumption (GEN/8); the corresponding percentages were 50 and 15 for countries near or

approaching self-sustained growth, while more backward countries in Africa, Asia and Latin America accounted for 20 per cent of the population and only 1 per cent of the energy consumption. His projections for 1975 and 2000 indicate a slight relative shift of both population and energy use to the second and third groups, and especially to the second group as regards energy consumption in the long run. This shift is supported by average growth rates in individual regions (GEN/10).

The energy requirements are met from several sources (analysed in GEN/10), principally coal and oil. The composition is greatly influenced by the energy resource endowment, which is very unevenly distributed as between countries, a fact in itself of primary significance in evaluating the future role of the new sources of energy. It also reflects differences in end uses of energy, some of which (such as automotive transportation) are tied to particular energy sources and not easily subject to substitution.

The relative importance of the specific sources of energy has shifted rapidly. First, farm waste and wood were the predominant fuels, then, in swift succession, came coal, petroleum and natural gas. The pattern is still in rapid flux, and may well absorb the new sources. But it must not be forgotten that the production and utilization of the conventional forms of energy are also undergoing unceasing improvement, as shown by Thacker's suggestive analysis (GEN/15). Some of the latter are: reduction of dam evaporation, introduction of reversible pump-turbines, back-pressure turbines, fuel cells, direct conversion, heat pumps, transmission at higher voltages, better load distribution, better coal utilization, use of Diesel engines in transport, and a more rational industrial location policy.

The functional pattern of use is also significant in evaluating the new sources and in planning energy development. Such use may be divided into two basic categories, heat and power. On a global basis, it may be estimated that use of energy for heat accounts for some 62 per cent (33 in industry and 29 in households) and power for 38 per cent (industry 16, households 2, transportation 19 and agriculture 1) (GEN/10). The functional pattern varies greatly between countries and between areas in particular countries. In industrialized countries, for example, as pointed out by Mueller (GEN/7, using a slightly different definition of "power"), 85 to 90 per cent is consumed for the production of heat (one-third for space heating) and only 10 to 15 per cent for power generation, of which little more than half is applied to electric drives. Netschert and Löf, on the other hand, remark appropriately that "in view of the well-known increase of productivity and income through electrification, it can confidently be assumed that, in the under-developed regions of the world at least, the place of electricity in the total energy picture will be larger in the future" (GEN/10).

In concluding this subject, we note that the new sources, by virtue of their very nature of being

"new", contribute only an insignificant share to total world energy consumption today. The adjective "new", our authors often remark, refers primarily to methods recently devised for harnessing sources which have long existed and long been utilized to a limited extent. The promise of these sources depends largely on recent or prospective technological "break-throughs".

The future contribution of the new sources of energy cannot be easily estimated in global terms. It may perhaps never increase beyond a small share, despite the dwindling of known fossilfuel reserves and of underdeveloped hydropower sites. But this should not be taken as a reason for belittling the importance of the possible contribution of the new sources in meeting local energy needs throughout the world, especially in under-developed regions.⁴

Energy and under-developed countries

We have no generally valid criteria for what would be the best planning for supplying energy to under-developed countries, and the energy requirements, as well as the best possible way to satisfy them, must be studied individually in regard to each country concerned (GEN/7).

Some features, however, are common to the less developed countries and may be briefly considered; first those related to electrification, and then the situations that arise at the local level with reference to other applications of energy. These situations disappear from sight in the global surveys occasionally presented. Yet, after all, they are the fundamental situations that must be modified and improved if the levels of living are to be enhanced and a strong stimulus to development given. These are the situations to which small-scale applications and unconventional methods might make a great contribution.

In considering the electric power situation in the under-developed countries, it should always be remembered, first of all, that none of these countries now has a nation-wide grid, or is likely to have one for a long time.⁵ Such grids as do exist are usually confined to relatively limited areas — industrial enclaves and peripheral zones of development around the largest cities and ports. Though the systems are often short of installed capacity, and power breakdowns are frequent, they do have enough interconnected capacity to guarantee a continuous supply of current to these zones, which

⁴ It should be noted that certain applications of wind power to electricity generation, or of solar energy to water heating and space heating, appear in some cases to involve economies by no means negligible, even in the most advanced countries. As for geothermal energy, in cases where the conditions are favourable, as in Italy or New Zealand, it can provide electric power at lower cost than any other source.

⁵ See, J. Barnea and E. S. de Breuvery, "Characteristic features of the power situation in less developed countries", *Small and Medium Power Reactors, Vol. II, Conference Proceedings, Vienna, 5-9 September 1960* (Vienna, International Atomic Energy Agency, 1961 (STI/PUB/30)), p. 337.

are often comparable to the developed regions of the West. The load factor is relatively high, and the rates charged for power are reasonable. In cases of this kind, only comparative cost studies can justify the use of the new sources of energy.

More typical are the areas with isolated power plants, usually with a capacity ranging from several hundred to several thousand kilowatts based on Diesel engines, small hydropower turbines, or, more recently, gas turbines. Such plants, whose inter-connexion usually cannot be envisaged for a long period, have often been established with the introduction of modern mining or manufacturing enterprises, and today on government initiative as well, in some areas, before long-distance power transmission becomes justifiable. Owing to the small scale of the generating plant to high fuel cost, to low load factor, or to a combination of these causes, electricity costs are high in these areas, ranging between 30 and 80 mills per kilowatt-hour, and not infrequently much higher.⁶ In these areas there may be large scope for cost reduction, whether by introduction of continuous alternative sources, such as geothermal power (where reasonable baseload can be provided), or by fuel-saving devices based on solar or wind energy even on an intermittent basis or by a combination of local sources.

The areas in a third category, however, are most typical of the conditions that prevail in under-developed countries. This is the category of "remote" areas, where there is no generation of electricity at all. Most of the population of such countries live in such areas. They may be "remote" in the geographic sense, as in the interior of large countries, and confronted with practically insuperable obstacles to electrification by conventional means, at least for a very long time. Or they may be "remote", as is often the case, in the economic but not in the geographic sense, primarily owing to lack of transport facilities. Better prospects of electrification may be offered in their case, provided that the introduction of modern transportation or the development of trade and industry would be sufficient to develop adequate power demand to justify transmission lines or central stations.⁷ However, these areas are so numerous that most of them will have to wait for a long time for this to happen, if for no other reason than that large-scale rural and village electrification would be far beyond the financial and technical resources of most under-developed countries.

The situation may be illustrated by some figures from India which might be taken as a typical example of an agricultural and mineral economy. Even with accelerated industrialization and urbanization, as

pointed out by Kapur, India would by 1981 still have 75 per cent, that is, 480 million of the entire population, living in small agricultural communities. Great strides have been made (GEN/8). Except for two, all the towns with a population of over 20,000 have now been "electrified", and under the Third Five-Year Plan, ending in 1966, all towns with over 5,000 people (there were 4,542 such towns according to the 1951 census) will have some electric supply facilities. Progress has also been made in bringing electricity to the villages (less than 5,000 people), which account for the bulk of the population, the number of villages with electricity facilities having risen from about 2,800 in 1951 to 15,400 in 1961, and being expected to increase further to about 29,500 by 1966. But such an increase would still leave some 527,000 villages or agricultural communities without electricity, even five years from now (op. cit.).

In view of the conditions prevailing in the under-developed areas, there can be no doubt of the improvement in living conditions that would result from placing electricity or any other form of energy at the peasant's disposal, though it would indeed be difficult to determine the precise economic values that would thereby be created. Today that same peasant generally burns dung or similar fuels for cooking meals, and relies primarily on the human or animal muscle power to do his tasks.

Indeed, the question is not whether the new sources of energy can compete economically with the conventional sources, but whether these new sources can be usefully and effectively harnessed, or whether, in the alternative, these areas shall have no supplies of energy at all. Kapur has assessed in detail the extent and nature of the energy required to improve the productivity and per capita income in an Indian rural community of 1,000 population, with special reference to the possibility of using solar energy, including estimates of costs, employment and income effects, and he includes a frank discussion of the financial and training problems involved. Golding has also developed a scheme for generating power, using local resources, for a village of twenty to thirty families (GEN/5). It will be presented to one of the technical sessions to follow this general session. The author takes account of the characteristics of solar energy, wind power, and other sources of energy, of the cost of harnessing each of them, of the probable load factors, and of the time distribution of such load factors. While schemes of this nature are still in the purely theoretical stage, they do provide guidance as to the energy situations in which many of the conclusions of the Conference would have to find their application.

Salient characteristics of the new sources of energy

Each of the new sources of energy has been studied systematically, though from various points

⁶ One United States dollar, or 100 cents, equals 1,000 mills. Generating costs in industrial countries are usually in the range of 4 to 10 mills.

⁷ A sub-category of "remote" areas might include areas which are now relatively unpopulated but which could be developed in the event of some attractive economic proposition, such as a mineral discovery. In such cases, the initial development plan would include provision of power facilities, so that the problem would be reduced to choosing the least costly system.

of view, in the papers by Angelini (GEN/1), Netschert and Löf (GEN/10), and Thacker (GEN/15). Ailleret's remarks (GEN/12) are concerned primarily with large wind power stations, and those by Kapur (GEN/8) have special reference to solar energy.

In this section we shall deal mainly with the principal features that characterize the three new sources of energy, both those features common to them and to other sources of energy as well, and those that serve to distinguish these new sources among themselves and from the others.

Before commencing the main exposition of our subject, however, it will be useful to recall briefly the essential nature of geothermal energy, wind power and solar energy, and to review in outline the methods employed to harness each of them.⁸

For geothermal energy to be useful, "a rather fortuitous combination of large masses of fractured or porous hot rock at a depth not exceeding a very few thousand feet, a natural supply of water to this heat source, and a layer of impervious rock between the hot zone and the surface are generally required. If wells are drilled into this hot material, steam at a pressure of several hundred pounds per square inch may be tapped from it, just as natural gas is produced. With a number of wells and steam collection facilities, a central power plant comprising principally a steam turbine, condenser, and electric generator can be operated." (GEN/10). The temperature of natural steam ranges from 100 to 300°C at well mouth; such steam may be used directly, for instance for space heating and in hot water systems, and need not necessarily be used for electricity production. This type of direct utilization, however, is subject to the practical limitations imposed by steam transmission.

Wind energy is the kinetic energy in a column of moving air, or wind. It is intercepted by a rotor or propeller, which transforms the energy into mechanical power for direct use as such, or, in accordance with the modern trend, for driving an electric generator. The basic elements determining the energy obtainable are the wind speed, the area swept by the rotor, and the conversion efficiency of the plant. Windmills are "rated" to reach their capacity output at a certain wind speed, and, at that speed, may extract the energy in the wind with an over-all efficiency of some 35 to 40 per cent, as compared with a maximum theoretical efficiency of nearly 60 per cent.

Solar energy arrives in the form of energetic radiation, which is harnessed in basic conversion processes classified into two general groups, utilizing the heat or the light respectively. The thermal processes, in turn, may be classified according to the temperature obtained. Low temperatures, useful for water and space heating, or for sea water distil-

lation, are the easiest to obtain, by means of simple flat-plate collectors composed of plates coated with a black radiation-absorbing substance which heats the water or any other fluid used as the heat-transfer medium. Higher temperatures require lenses or reflecting mirrors, which capture only the direct solar radiation, and must be oriented frequently to keep them facing the sun. The heat can be put to many uses, including the driving of engines, and may even be converted directly into electricity in thermoelectric generators without passing through the stage of mechanical energy. Solar radiation arriving in the form of light may also be converted directly to electricity, by means of photo-electric cells. Finally, the natural photochemical process of photosynthesis is known. This process is the basis of all plant growth. Artificial photochemical processes are also conceived. They are of substantial interest, since a large proportion of the absorbed energy may be recovered by means of an inverse reaction taking place under controlled conditions. Research now in progress has the object of finding controllable and practical reactions which, while offering the possibility of energy storage, deliver useful heat or, even better, produce an electric current.

The salient characteristics of the new sources of energy are well tabulated by Angelini (GEN/1) and are discussed at some length particularly by Netschert and Löf (GEN/10). They are considered here only to the extent to which they affect the general economic value of the energy sources in question, the technology used for their application and the purposes served.

Perhaps the most significant feature relates to reliability and continuity of supply. Geothermal energy offers continuous supply, while solar energy and wind power offer only an intermittent supply and thus raise the problem of storage, or combination with other energy sources, if uninterrupted demand must be met or if demand cannot be adjusted in point of time to supply. Solar energy is available only during daylight hours, which vary with the season, and focusing collectors are particularly subject to the vagaries of atmospheric conditions. Wind power availability is never completely predictable for a specific time, but usually shows little variation in a given place from year to year or even as between shorter comparable periods.

Permanence of the source is another significant feature. At least solar energy and wind power are inexhaustible, that is, they are renewable as in the nature of "income" energy, like hydropower. Geothermal energy presents characteristics of exhaustibility comparable to those of the conventional non-renewable sources of energy, but this point is not entirely clear, particularly since there are indications in some cases of an increase rather than a fall of temperature when steam deposits are tapped. These three sources, moreover, have no other uses besides energy applications, and may thus serve eventually to conserve the conventional exhaustible resources for other uses.

⁸ In addition to the papers prepared for the General session, see also *New Sources of Energy and Economic Development* (United Nations publication, Sales No.: 57.II.B.1).

The magnitude of solar radiation on the earth's surface is enormous and so is the total physical force of the wind. As pointed out by Ailleret (GEN/12), the wind and the sun each represent a power of the order of one kilowatt per square metre, or some 10,000 times the total energy consumption "density" even in the most industrialized countries, and, consequently, from a purely theoretical point of view, could meet a great expansion of need even at a low conversion efficiency. The quantity of available geothermal energy is less well known; but to judge from indications on the earth's surface, such as hot springs, which are numerous but largely unexplored, the reserves could very well be considerably greater than is usually believed. But we must guard against possible illusions when speaking of the available quantities and emphasize the difference between physical availability and economic availability, which varies constantly with technological progress and is intimately dependent on installation and operating costs as well as other economic factors peculiar to the country involved.

With respect to geographic distribution and conditions of location, it must be noted that geothermal energy is concentrated in a limited number of areas, not always characterized by energy need and scarcity. Like hydropower, geothermal energy can only be exploited in places determined strictly by geological and geographic conditions; such energy converted to electricity can of course be transported over considerable distances, while steam or hot water can be piped over only limited distances (some 15 to 45 kilometres, as in Iceland) without serious energy loss. Solar energy utilization, though mainly limited to the belt between latitudes 40° North and 40° South, enjoys great freedom of site choice. Wind power is also widely and readily available, without restriction to any particular climatic belt, but some care is required in the selection of specific sites to obtain optimum results.

The development of the technology needed for harnessing the new sources of energy may be regarded as being in a relatively early stage. But fully developed equipment is available at least for geothermal energy; that for wind power utilization exists in considerable variety, while the situation as regards solar applications is less advanced.

As regards size of installation it may be said that the new sources of energy admit of great flexibility. "Solar and wind plants are very flexible in a small range of capacity, down to a fraction of one kilowatt, and therefore are particularly suited for isolated farms or small communities." There is economy of scale in larger wind power plants only to a certain level (perhaps 1,000 to 2,000 kilowatts), while solar energy capacity normally increases in direct proportion to the size of the collectors and therefore has little economy of scale. The size of geothermal plants depends primarily on local natural steam conditions, but does range from small units without condensers up to very large plants with multiple units of 25,000 to

30,000 kilowatts each and with economy in cost and steam consumption per unit of output.

Among the most important economic aspects, finally, it is to be noted that the utilization of each of these three energy sources requires relatively heavy initial capital investment, while the operating costs are minimal. It follows that the cost of useful energy obtained from the new sources, as in the case of hydropower, is determined predominantly by the fixed costs (interest and amortization) resulting from the capital investment. This fact makes it essential to concentrate efforts on minimizing the initial costs and maximizing the life of the equipment. For the same reason, local labour and local raw materials should be employed to the greatest possible extent, to minimize foreign exchange expenditure.

Some general observations

This report would not be complete if it failed to give an account of a series of observations that correlate and unify the papers presented at this session, a series of observations that deserve our unqualified attention.

An important general question has been raised by Ailleret in the first part of his paper (GEN/12). Even if one confines oneself to the three sources of energy that constitute the theme of this Conference, it is still possible, he says, to enumerate a rather large number of methods that could give the sources of energy an important role as soon as they became economic. Should our efforts, then, be dispersed over all the possible roads, or should we, on the contrary, from now on make our election and concentrate on the roads showing greatest promise? After noting the distinction that becomes necessary, depending on whether pure or applied research is involved, the author rightly remarks that, while the possible modes of capturing the various forms of energy may be numerous, so are the various energy problems to be solved. It is these problems that should thus be defined, first of all. The task should not be too difficult if one agrees with Kapur in thinking that "what is needed is to create conditions for work and productive effort to the maximum extent possible within the present limitation of research and development" (GEN/8). It is on this basis that methods should be selected, while at the same time every effort should be made to find the practical realization of the methods which involve the lowest possible costs.

It should be noted here that the expression "economically viable", or any other expression of the same nature, may give rise to a certain confusion. As already remarked in the United Nations report on new sources of energy and economic development, "In assessing the value of new sources of energy for power generation, economic considerations applicable to industrial areas do not necessarily apply in under-developed areas. Social and economic gains to be derived in isolated communities, for example,

may be so great as to offset costs which in a different situation would be considered unfavourable." These views are strongly supported and illustrated by Kapur and Abdel-Rahman (GEN/11).

With respect to solar or wind energy, all our authors point out the problems arising from their intermittent nature. It would seem that here again a distinction is in order, depending on whether we are discussing the conditions prevalent in advanced societies, or the conditions in the rural communities with which this Conference is primarily concerned. On this subject, Kapur makes a series of remarks deserving every emphasis. "In rural communities in under-developed areas where important sections of the population remain partially or wholly unemployed, the problems of intermittence and storage lose most of their significance. Is it really important to have sunshine or work every day except Sundays and festival days? Why must we apply the concepts and economies of the advanced societies in entirely unwarranted situations?" He has taken the trouble to list the needs whose satisfaction is almost insensitive to the intermittence of the energy supply, and notes that, by rational use of such intermittent energy it would be possible not only to increase the consumption and production of articles to satisfy daily needs, but also to develop broader markets for the products of the labour of the community.

Certain psychological obstacles that must be overcome, if the new sources of energy are to be extensively harnessed, are pointed out by Netschert and Löf at the end of their paper (GEN/10). One of the major obstacles, in their opinion, is the apathy that new methods often encounter, without forgetting, too, that customs and traditions tend to oppose every change that threatens to overthrow them. Another factor that must be taken into account is the lack of understanding of the possible savings that may result from the use of the new methods. This applies particularly to small-scale applications. The authors give the following illustration. "There is available in Japan a simple solar water heater that pays for itself in fuel savings in about four months; as yet there appears to be no awareness of its potential savings in countries and regions with fuel costs even higher than those in Japan." They consider that, to overcome these obstacles, the investigators should bend every effort towards

minimizing the initial capital investment required for the utilization of the new sources of energy and that, in addition, the savings obtainable by the use of these sources should be systematically demonstrated and extensively publicized.

It seems appropriate, in this connexion, to point out the role that experimental stations could play in regions with numerous rural communities that, in the foreseeable future, will be unable to afford facilities to provide energy derived from the conventional sources. Here Kapur once again takes an unconventional point of view in advocating these stations, a point of view that is equally worthy of the fullest attention of the Conference. These stations, he says, "would enable us to resolve some of the outstanding problems of technology under actual conditions of operation, and to study the impact of these changes on the life of these communities".

Certain broad and significant remarks by Abdel-Rahman (GEN/11) may serve as a conclusion to the present report. After recalling that study of the attitudes and social values implied by the use of energy is indispensable in the determination of the role that these new sources may be destined to play, the author passes to the responsibilities resting upon us all. Examination of the sociological content, particularly at international level, he notes, demonstrates that new values are surging forward, values very different from those that prevailed before. In the past, according to the traditional pattern of introduction of new technologies, concern for the human aspects, in a way, remained marginal. The situation of today tends more and more to reverse this bygone orientation. Today it is a deliberate concern for the human aspects that occupies the foreground instead of the background; and development tends more and more to be the result of a very considered, mature programme. Further than that, it is today an imperative dictate, commonly accepted throughout the world, that international society should strive in every way to secure for all its members at least a minimum level of well-being, and to give each of its members an equal chance for progress.

It is in this perspective that the promotion of new techniques of energy production need to be considered, and the efforts of investigators supported. Indeed, to encourage such promotion is the object of this Conference.

SOCIAL ASPECTS OF THE SOURCES OF ENERGY

(A long-range view)

*I. H. Abdel-Rahman*Director, Institute of National Planning
Cairo

INTRODUCTION

The possibility of introducing a new source of energy, or the expansion of the use of an existing one, may be examined in several steps. Technological feasibility and economic cost are the two most important aspects. Yet the wider contexts of the administrative and organizational set-up, and the social values that call for energy expansion, or result from it, also may be considered.

An analysis of the social relations and values involved in energy generation and use would help to determine the role of new sources in the general energy pattern. The great expansion of energy requirements during the last two centuries, mostly dependent upon the use of coal and oil and the introduction of new techniques, has been accompanied by great social changes. Trends for the future indicate that expansion will continue at even higher rates.

Social considerations, especially on an international level, show that new values are already emerging which are different from the values and motives that existed before. It is likely that as a result there will be a need to develop new sources of energy to serve communities and fields which are not well served by the existing systems.

The energy produced by one man working for eight hours is equivalent to one-half of a kilowatt-hour. In advanced countries today the energy generated for all purposes averages 20 to 50 kilowatt-hours a day per head; and the rate is increasing year after year, all over the world. Thus the modern man is consuming energy which is equivalent to the muscular effort of 40 to 100 able-bodied slaves placed at his disposal—though it is clear that, were one given 100 slaves today, one could not get them to produce the same products that one gets from 50 kilowatt-hours of energy as actually used in modern life. This clear fact is significant for the purpose of the present study in two ways. First, it shows the limitations of purely quantitative comparisons of energy consumption and secondly, it indicates that in energy studies, the question of how we produce energy, and why, is by no means finally answered. Quantitative comparisons, especially when related to different societies widely separated in time, must be qualified by references to non-quantitative data, whether social, economic,

or technological. H. Bhabha has estimated that, up to the middle of the nineteenth century, the energy production in the world was running at the rate of half a Q per century.¹ This rate was doubled by the middle of the nineteenth century, then reached 5 Q per century in 1900, and is running now at more than 10 Q per century. Estimates for the year 2000 vary widely, but 30 Q per century is a likely one. Ancient societies existed with limited supplies of certain types of energy sources which were directed to certain types of uses, according to a certain pattern.

A full understanding of the energy situation in those societies would require knowledge not only of the quantities of energy produced and the technology used in its production, but also a knowledge of uses, and the social value of energy use is an essential consideration. If we assume, for the sake of argument, that a primitive agricultural society depending upon human and animal labour and wind energy, had available to it (as if by magic) electrical energy, we can imagine that the existence of such additional energy would not only disturb the whole equilibrium of society as regards production, consumption and toil, but would also shake the basic beliefs and change all aspects of social structure. It is exactly the same situation if we assume that a modern advanced society consuming energy at the rate of 50,000 kilowatt-hours per capita suddenly lost 50 per cent of its energy. The consequences would be far-reaching. In both cases a new equilibrium of social, economic, and conceptual values in society would have to be reached. This last example is not altogether fictitious, for during the war years advanced societies were subjected to severe energy shortages in war conditions. The first example is not totally out of place; we may be reminded of Lenin, who dreamt of electrification as a magic force of social advance.

The new sources of energy discussed in the present Conference may be measured quantitatively, as they are now, and as they are likely to be in the future, but their full significance will not be indicated by quantitative measures alone. Other indicators of

¹ Q denotes 33,000 million tons of coal in terms of energy. See *Proceedings of the International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy*, vol. 16 (United Nations publication, Sales No.: 56.IX.1, Vol. 16), p. 32.

change and repercussions in society should be considered. There is no judgement made here as to the result of the more complete study, whether it will show that the new sources are more important or less important than can be judged simply by quantitative indicators.

The argument is thus advanced that energy generation in quantity and quality is one of the factors affecting the pattern of the social structure, and any appreciable change in energy production or use would naturally lead to changes in the social structure. Conversely, it is maintained that appreciable changes in other constituents of social structure would have their effects on the production and consumption of energy in the society.

Consideration of changes in the equilibrium situations of energy—social structure relations would lead us to think of the development process of such relations. Forces of development are economic, social and psychological. This development may proceed by continuous and infinitesimal, almost non-perceptible steps while in other instances change will be abrupt and conspicuous. The basic and fundamental landmarks in the history of energy production, such as the steam engine, electric power stations and atomic power reactors, are well known. Each of these advances was preceded by scientific and technological studies. These studies were usually motivated, although not necessarily directed, by certain social and economic conditions. The scientific achievement of the new principle of energy generation was followed by stages of application and use leading to the creation of new enterprises, and introducing new legal and social aspects. We can easily now trace such changes related to energy development that actually occurred, but when we want to look into the future of energy use or production we must understand the energy-social structure complex enough to judge the likely situation in the future.

It is useful, in discussing the energy-social structure complex, to consider three main aspects of energy use, namely energy used for production, energy used for transport and communications, and energy used for domestic purposes.

ENERGY IN PRODUCTION

The process of production involves the existence of a technique of production to be applied to physical resources through the employment of a labour force using a set of instruments of production.

The material inputs to the process of production can be generalized to include both the physical resources and the instruments of production, while physical resources may be used in the form in which they are found in nature, or in a form resulting as an output of another production process. Instruments of production are themselves the output of another production process (capital goods industry), while physical resources generally originate in a naturally existing form, whether mineral or biological.

Energy can be considered as an input to the process of production, as a form of physical resource.

By labour is meant the human element in production, including the muscular and non-muscular effort employed in the production process. In manual jobs the worker is not expected, nor wanted, to exercise much judgement; on the other hand, in skilled jobs and managerial responsibilities muscular activities, are of minor importance as compared to the power of judgement and decision making.

The procedure of using physical resources, and the instruments of production by the labour force to produce, is the technique. The worker acquires it through training, education and experience. It is acquired essentially from outside the production process, and imported by the producer. In craft-economics and traditional societies, techniques are transmitted from one generation to the next through apprenticeship and practice, in industrialized economies through education and training. Techniques develop through this process of transmission, but, in recent years, research and development activities have become highly organized and planned in centres designated for the creation of new techniques.

It is relevant to our purpose to identify these three different ways of acquiring technique in production. Taming of animals may be considered one of the first discoveries of new techniques in production. The control of the process of nuclear fusion to produce useful energy is a technique which is still to be acquired, if ever attainable. As an intermediate form, the technique of producing electricity from motion in a magnetic field was acquired through a combination of experimentation and accidental observation. This Conference seeks to encourage the intentional and planned development of new techniques for the use of the new sources of energy. This is not the traditional way of acquiring new techniques, nor is it the second way which was associated with scientific discoveries and industrialization.

In recent years, and for a variety of reasons, people, nations and international organizations have set up centres for a determined, directed and planned creation of new techniques. The profit motive in an economic sense figures in many such attempts, but it is no longer predominant.

The traditional forms of energy used in agricultural production are domesticated animals and windmills. Major irrigation projects such as dams and reservoirs may be considered as fixed instruments of production, and have largely been built by human labour. In non-agricultural production—essentially crafts—human labour is used as a source of energy; hence the low energy requirement generally. In ancient Egypt, use was made of the high water level of the Nile during flood time to inundate the valley, and thus replace the need for pumping water. Basin irrigation as a technique was developed and practised for thousands of years. The use of human muscular effort would be considered in the foregoing analysis as a lower form of technique, and not as a physical resource of production.

With the advent of industrialization, fossil fuels (coal and petroleum) were introduced, together with and through the development of a wealth of new techniques related to the use and transformation of physical resources and the building of the most elaborate and expensive instruments of production. The production of energy became an important sector of the economy, while during the traditional period there were no institutions specializing in the production of energy and giving it to other users. Commercial generation of energy and fuel extraction developed in the advanced countries, overshadowing completely the traditional sources (such as windmills in Holland). Backwardness, in a political, economic and social sense, is closely related to energy consumption. A close relation is established between per capita income and energy consumption.² Hence development plans in the less developed areas include power production as a cardinal part. Power is generally obtained through fossil fuels and hydro-electric projects. The available techniques of production and capital instruments of production have been largely developed specifically to use fossil fuel and hydro-electric power.

ENERGY IN TRANSPORT

Transport is the second main direction of the use of energy. The transport activity represents the mobility of physical resources in successive stages of production, until they ultimately reach the consumer. Through transport facilities people acquire higher personal mobility, which may be related to the production activity (movement of labour), or simply used in a consumption sense. The transfer of resources during the successive stages of production widens the possibility of using resources found in one place in another, and the location of production centres becomes an important problem. In the traditional period there was no problem of location, since production was mostly agricultural and had to be where land and climate were suitable. In industrial societies the location of production units depends on many factors. Generally speaking, two phases took place. In the first phase, coal was the main source of energy and technology was available in a limited number of countries. It was easier to move other physical resources nearer to coal basins, and it was preferred to establish industries in the technologically advanced countries. In the second phase, oil became an equally important fuel. It is differently distributed geographically and easier to transport than coal; furthermore, technology spread to many countries. Electric power transmission systems covered wide areas in different parts of the world.

Energy used in transport became related to energy used in production through production-transport relations, in the sense that a number of production

processes depended on the developments in the field of transport, and conversely transport was needed because production had taken place. Since energy is an input to both production and transport, the generation and use of energy depends upon the interrelation of those activities. There would be no point in establishing a transport system more elaborate than is needed to serve the production and distribution process; and the production process cannot continue if it is not served by a transport system that supplies it with its requirements and carries its products to the consumer markets. This production transport equilibrium was attained in traditional societies in a limited area, while now the area of equilibrium covers almost the whole world. It is realized that though mobility of resources can be achieved technically to a high degree, yet national boundaries, barriers and other restrictions limit it.

Wind energy used in sailing ships played an important part in the development of civilization. It had its limitations due to non-uniformity and lack of control, yet the wind-sea routes were for many centuries the main arteries of human development. However, it is rather unlikely that transport systems will benefit much in the future from the new sources of energy. The increasing mobility of man far into space has already created a big space industry and may eventually help in widening the area of human activity cosmographically rather than geographically. Energy devices using solar batteries have already been used extensively in space ships. Space technology has produced a multitude of new techniques in metallurgy, ballistics, electronics and other fields, and many of these new techniques may find useful and important applications in other fields of production. It will be noted that solar batteries were originally used successfully in connexion with light current transmission systems.

Transport has also increased the mobility of people for non-productive purposes. Coherent social groups have been established on the basis of common methods of communication and understanding amongst their members and because of the possibility of creating a central leading authority capable of defending the community externally and establishing order internally. Authority extended as far as it could be maintained by the transport system. Sailing up and down the Nile in ancient times was a very important factor in developing civilization. Roman road builders created cohesion and maintained law in a wide area. The social consequences of human encounter are no less important than the security and safety aspects. It transmits ideas and develops interchange, activates creativity and promotes organization. Mass movements of population took place because of famine or other natural disasters, or as a form of conquest and mass expansion. These are special cases of considerable importance.

Communication of ideas and information, in addition to actual physical travel and movements, is becoming a major factor in shaping the new era

² See E. S. Mason *et al.*, "World Energy Requirements and Economic Growth", *op cit.*, vol. 1 (United Nations publication, Sales No. : 56.IX.1, Vol. 1), p. 54.

of human existence on a global scale. Wind and solar energy, however developed in the future, are not likely to play an important role in this respect, comparable to what took place in the past.

ENERGY IN DOMESTIC USE

Domestic use, in houses and urban communal life, is the third direction of energy use. It includes energy used for cooking, washing, heating, illumination and recreation. The Secretariat of the United Nations has estimated that the world utilization of useful heat and power in 1952 was as follows:

	Useful heat	Useful power (1,000 million MWh electricity equivalent)	Total
Agriculture	...	0.3	0.3
Industry	5.2	0.6	5.8
Transport	...	0.8	0.8
Households, etc.	2.9	0.4	3.9

SOURCE : United Nations Department of Economic and Social Affairs, "World Energy Requirements in 1975 and 2000", op. cit., vol. 1, p. 5.

The ultimate result of production and transport activities is to achieve for private and public consumption a certain standard of availability of goods and services which define the standard of living. Items of consumption closely related to physiological needs such as food and shelter are basic and it is possible to imagine them fully satisfied some day. But for other goods and services there does not seem to be any limit to human desire for expansion.

Social values are created and recreated continuously, through experience of actual standards of living and through the expectation (whether justifiable or not) of higher and better standards. This cyclic action of demand and supply is basic to human endeavour and development, but it seems necessary now that values should be formed not only on an individual or national scale, but also on a universal scale. Inasmuch as individual needs had to be co-ordinated with the needs of the community, it is now imperative that legitimate international demands should be recognized and co-ordinated with individual and national aspirations.

ENERGY PROJECTIONS

Projections of energy requirements and possibilities, either for short range or long range, are frequently studied for a variety of reasons. In the procedure of study certain principles are generally used.

Past trends of energy generation and use are studied and used as a basis for estimating the likely future trends, both in supply and demand.

Technological changes related to the use of energy are considered through the examination trends in industrial and agricultural production, development of transport and communications, population growth and the greater future need for energy consumption in domestic and household uses.

Scientific development and the appraisal of energy reserves are also considered as a means of finding out what the future production is likely to be, assuming certain production relations. Economic cost is one of the most important relations to be considered. Energy is not produced regardless of cost. The acceptable cost is determined by the alternative use of resources and by the effects of the changing pattern of social values.

Projections, studies and forecasts are aids to decision making, and not supra-natural orders for future generations. As such, the studies indicate the expected bottlenecks and shortages, and thus help to ensure that the proper steps are taken in good time. A continuous reappraisal of the situation will be necessary, though some of the steps taken may be irrevocable.

Quantitative energy estimates, as regards supply and demand in different countries, show that conventional sources of energy (fossil fuels, hydro-electric power) will still be the main sources of energy for the coming generation. There may be appreciable developments in atomic energy for power and heating, but it is unlikely that the new sources of wind and solar energy will figure in large amounts in the energy balance sheet of the future. Any increase in the efficiency of use of the present sources would make available for use huge quantities of energy which are now wasted in generation, transmission or consumption. Scientific and technological advances in energy productivity, together with the prospection for and the extraction of new fossil resources (including natural gases), appear to be the most fruitful directions of development.

CONSERVATION OF RESOURCES

Reserves of thorium and uranium also seem to be plentiful, though the economic cost of atomic power is still higher than that of thermal power in most countries. The higher cost of atomic power does not prevent many countries from starting large atomic power programmes. It is considered that such programmes are necessary for further developments in the field of atomic technology and that in certain instances non-power uses (whether military or peaceful) justify the extra cost.

By the end of this century, the world will be producing energy at a rate equal to some 60 times the rate that prevailed less than two centuries earlier. This huge expansion is mainly dependent upon the depletion of resources formed naturally during past geological epochs, and which are not renewable. The world may then have exhausted in a few hundred years resources that were concentrated during millions of years. There is no immediate question of an energy famine, but it is a matter of principle that better conservation procedures be applied to non-renewable energy resources.

The availability of energy at the present time in the world is not uniform, and, considering the

mobility and cost restrictions, it may happen that some countries will find it necessary to exploit less economic deposits or to introduce more costly techniques of energy production. Such countries would at the same time be well advised to take measures for the rationalization of energy consumption.

TRENDS IN DEVELOPMENT

Past trends in energy use in production, transport and domestic applications, as discussed in the foregoing remarks, show that human participation in production is gradually becoming less manual and more intellectual. It shows also that the demand for consumer goods is expanding rapidly in relatively non-essential directions, which satisfy the growing expectation for better and more comfortable and fashionable living, while basic shortages in physiological needs exist for certain sections of the population even in the one country. The social interchange and cultural encounter which are due to higher mobility of persons, goods and ideas accentuate the feeling of disparity and create social, political and philosophical counteractions aiming at equalization. With the recent acceleration of growth in production, the partial equalization takes place at higher levels of living and is sustained by the expansion of energy production.

The identification of inequality, especially as regards basic commodities and services, is generally recognized now. It creates an urge for economic development and better distribution of income. It has been particularly successful in this sense in recent decades within the advanced countries. But disparity has increased amongst nations; hence the efforts to aid the economic growth and social evolution of the less developed countries. This is in principle the international counterpart of the national problem referred to above. It remains to be seen whether the problems of reducing large differences between nations will be tackled successfully in the same way as that followed in reducing large differences between individuals within the same society, i.e., by establishing minimum levels of consumption and equal opportunities for personal development and increasing the total output of production to maintain these levels. Output was increased by improved productivity and reallocation of resources to increase investment for production and develop new branches of technology. This trend was accompanied by a large increase of energy production and use.

As yet there is no world authority to reallocate resources in such a manner as to guarantee minimum levels; but public opinion has advanced in this direction very much in the post-war years. Studies in which such a global point of view is accepted and discussed are increasing, and hence, the idea of taking up the problem of the development of new sources of energy is not at variance with reality in this sense, especially if it refers particularly to the under-developed areas in the world.

This situation may be effective in creating the social frame for considering, amongst other things, the energy situation of the world in future. In such reconsideration, small dispersed energy sources that may serve local backward communities will acquire social importance, side by side with the conventional economic sources. The development value of introducing a new technique of energy production, though it may not be competitive economically, will be more appreciated. The saving of energy resources, now extravagantly being exhausted, may then be possible through more rational use.

Fossil fuels, large hydraulic power stations and atomic power are all products of a development based on the requirements of a market reflecting the desire for individual betterment within countries competing for power and other advantages through the introduction of new technologies. In this forced march of technical and economic advance, many communities all over the world have been left behind. It may not be necessary for those communities to follow the same course of advance, especially since the demand for new technologies is, it is hoped, less influenced now by individualistic aspirations, and reflects more the need to close the gap between the rich and the poor. If this argument is at all true, we should expect it to affect the social values behind technological development, including energy technology.

SOME OBSERVATIONS ON THE ENERGY SITUATION IN THE MIDDLE EAST

The Middle East area is arid, being generally a large desert with dispersed fertile localities. The area is at the same time rich in oil and has huge proven reserves of it. Long days of sunshine and high temperatures in the region have tempted many persons to experiment with solar energy instruments of varying types. As early as 1913, a company was formed in Cairo to build a solar pumping station at Maadi. Windmills have been constructed along the Mediterranean shore from Alexandria westwards into Libya. The brackish water resources in many localities in the Red Sea area and in Tunisia suggest that projects for solar water distillation might be feasible. During the war years, armies in the desert developed solar distillers to refill motor vehicle batteries and for other uses. The high rate of surface evaporation in the dry hot climate of the Egyptian desert means that large quantities of Nile water while kept in storage reservoirs are lost by evaporation, and these losses will increase upon completion of the High Aswan Dam, with its artificial lake extending for more than 300 kilometres. Yet surface evaporation is the basis of the equally important Kattarah project of cutting a canal from the sea near Alamein, feeding the water into an 80 metre-deep natural depression, and using this difference created in levels for the generation of electricity, at a rate to be maintained by continuous surface evaporation from the artificial lake.

In the Middle East we find densely populated centres with a very low ratio of land to population, as well as vast expanses of the Sahara with a few widely scattered oases. In densely populated areas, large-scale methods of energy generation and distribution are used. Intensive agricultural production calls for a continuous supply of power. During the last decades the Egyptian farmer obtained energy less and less from agricultural by-products and animal dung, but rather from oil products, especially kerosene. In such a situation solar cookers cannot find a market, especially since kerosene is heavily subsidized. In small desert localities energy cost is prohibitive. Fuel and spare parts have to be transported over hundreds of miles of desert. Any other source of energy would have a chance in competition there but for the fact that conventional fuels are firmly established by tradition, and the adoption of any new technique will require a long period of experimentation and social persuasion, once it has proved its technical and economic feasibility.

In one area in north-east Sudan, adjoining the Red Sea, local tribes carry water for personal use over long distances, obtaining it in exchange for salt and other products which they produce. Water distillation and desalinization would immediately improve the standard of living in that area. With the expansion of oil production and mining centres in different parts of the desert, modern camps are being established for workers and technicians. Roads, harbours and shipping centres are being built.

An advanced technology is thus introduced into the area, and possibilities for small-scale experimentation with windmills, solar cookers, solar refrigeration and water distillation are created. In such small but technically advanced communities, which are supported economically from the outside, it becomes possible to find interest in solar and wind energy applications.

In conclusion it is observed that intensive research efforts in the fields of wind and solar energy will have to achieve a technological break-through before any extensive application of those new sources can take place. Yet these efforts should be continued and intensified, since any success will have a social as well as a merely economic value for many dispersed communities which cannot be well served by the conventional energy systems. And since research activities are highly concentrated in advanced countries, it seems likely that useful new applications in the fields of wind and solar energy will occur also in advanced countries, in areas which are not well served by the advanced conventional energy systems. Hence the new sources, when applied, will be additional to the already existing facilities, and not substitutes for them. To mention an example, space technology and rural community development projects in Central Africa are equally likely to benefit from solar energy research. In each of these two extremely different areas of application, large-scale energy systems cannot be used, and other motives for development than economic factors are important.

LES ASPECTS SOCIAUX DES SOURCES D'ÉNERGIE

(Vue à long terme)

(Traduction du mémoire précédent)

I. H. Abdel-Rahman

Directeur, Institut du Planning national
Le Caire

INTRODUCTION

On pourra examiner la possibilité de mettre en œuvre une nouvelle source d'énergie ou l'élargissement de l'emploi d'une source déjà existante en plusieurs stades. La possibilité technologique et le coût de son adoption constitueront les deux principaux aspects de la question. On peut cependant examiner aussi les contextes plus larges de l'organisation administrative et de la structure de la nouvelle application, ainsi que les valeurs sociales qui demandent l'élargissement de l'apport énergétique.

Une analyse des rapports sociaux et des valeurs qui interviennent dans la production et l'utilisation de l'énergie aiderait à définir le rôle des nouvelles sources dans la configuration énergétique d'ensemble. La grosse augmentation des besoins en énergie au cours de ces deux derniers siècles, basée avant tout sur l'emploi du charbon et du pétrole et la mise en œuvre de techniques nouvelles, s'est accompagnée de profondes transformations sociales. Les tendances d'avenir qui se dessinent dès maintenant indiquent que ce développement se poursuivra à un rythme accéléré.

Les considérations sociales, particulièrement sur le plan international, révèlent que de nouvelles valeurs commencent déjà à faire leur apparition, valeurs différentes d'ailleurs de celles qui préexistaient, différentes également des motifs qui, jadis, guidaient le comportement des hommes. Il est probable qu'il devienne nécessaire, en conséquence, de mettre en œuvre de nouvelles sources d'énergie destinées à des communautés et à des domaines qui ne sont pas bien desservis par les moyens ou les systèmes actuels.

L'énergie produite par un homme travaillant huit heures est équivalente à un demi-kilowattheure. Dans les pays avancés ou développés, la production quotidienne totale d'énergie, pour toutes applications, s'établit à une moyenne comprise entre 20 et 50 kilowattheures par habitant et le rythme de cette production s'accélère d'année en année, dans le monde entier. De la sorte, l'homme moderne fait une consommation d'énergie équivalente à l'effort musculaire qu'auraient pu déployer 40 à 100 vigoureux esclaves mis à sa disposition. Il n'en reste d'ailleurs pas moins clair que, si on avait 100 esclaves

aujourd'hui, on ne saurait les faire produire les mêmes articles que ceux que donnent les 50 kilowattheures d'énergie, de la manière dont on l'utilise dans le monde moderne. Ce fait évident est significatif pour les besoins du présent mémoire de deux façons : il met en lumière les limitations des comparaisons purement quantitatives ayant trait à la consommation d'énergie et il indique que, dans les études ayant trait à cette énergie, la question de savoir comment on la produit, et pourquoi, n'a nullement reçu de réponse définitive. Les comparaisons quantitatives, particulièrement quand elles portent sur des sociétés différentes, amplement séparées dans le temps, doivent faire l'objet de réserves constituées par des références à des données non quantitatives, qu'elles soient d'ordre social, économique ou technologique. H. Bhabha évalue que la production mondiale d'énergie, jusqu'au début du XIX^e siècle, était de l'ordre de 16,5 gigatonnes par siècle¹. Ce rythme de production a été doublé au milieu de ce même siècle, est passé à 165 gigatonnes par siècle en 1900 et dépasse maintenant 330 gigatonnes. Les évaluations pour l'an 2000 varient grandement, mais le chiffre de 990 gigatonnes par siècle semble constituer une valeur probable. Les anciennes sociétés fonctionnaient avec des apports limités de certains types de sources d'énergie, destinées à certains types d'utilisation, en conformité avec une configuration bien définie.

Une pleine compréhension de la situation énergétique, dans ces sociétés, exigerait la connaissance non seulement des quantités d'énergie produites et de la technologie de cette production, mais aussi une connaissance des emplois et de la valeur sociale de l'utilisation de l'énergie, laquelle joue un rôle essentiel. Si on admet, pour les besoins de cet exposé, qu'une société agricole primitive, dont l'activité dépend du travail des hommes et des animaux, en plus de l'énergie éolienne, venait — d'un coup de baguette magique — à pouvoir disposer d'énergie électrique, on peut s'imaginer de quelle manière cette transformation énergétique non seulement

¹ On entendra, par « gigatonne », l'équivalent énergétique d'un milliard de tonnes de charbon. Voir *Actes de la Conférence internationale sur l'utilisation de l'énergie atomique à des fins pacifiques*, vol. 16 (publication des Nations Unies, n° de vente : 56.IX.1, Vol. 16), p. 33.

viendrait déranger tout l'équilibre de la société, en ce qui concerne la production, la consommation et le travail, mais aussi combien elle ébranlerait les habitants dans leurs croyances et combien elle transformerait tous les aspects de la structure sociale. On retrouve exactement la même situation si on admet qu'une société moderne avancée, qui consomme de l'énergie à raison de 50 000 kilowattheures par personne, perd tout à coup 50 p. cent de cette énergie. Les conséquences d'un tel événement seraient très étendues. Dans les deux cas, il faudrait qu'un nouvel équilibre s'établisse pour les valeurs sociales, économiques et philosophiques de la société. Ce dernier exemple n'est pas entièrement imaginaire car, pendant les années de guerre, des sociétés très développées furent soumises à de graves insuffisances d'énergie dans les conditions créées par cette guerre. Le premier exemple n'est pas totalement incongru non plus, ainsi que pourrait nous le rappeler Lénine, qui rêvait de l'électrification, dans laquelle il voyait un instrument magique de progrès social.

Les nouvelles sources d'énergie qui seront passées en revue à la présente conférence peuvent être mesurées quantitativement, ainsi qu'on le fait maintenant et ainsi qu'on le fera probablement à l'avenir, mais leur pleine signification ne sera pas indiquée seulement par des mesures quantitatives. D'autres indicateurs des changements et de leurs répercussions sur la société sont à considérer. On ne formule aucune prétention ici quant aux résultats d'une étude plus complète, notamment quant à la question de savoir si elle révélera que les sources nouvelles sont plus ou moins importantes qu'on ne peut en juger en faisant appel tout simplement aux indicateurs quantitatifs.

On présente ainsi le point de vue suivant lequel la production d'énergie, en quantité et en qualité, est un facteur qui a des répercussions sur la structure sociale, et que tout changement appréciable de la production ou de l'emploi de l'énergie mènerait tout naturellement à des changements de la structure sociale. Au contraire, on maintient que des modifications appréciables d'autres éléments constitutifs de la structure sociale auraient leurs répercussions sur la production et la consommation d'énergie dans la société en cause.

Si l'on envisage la position différente de l'équilibre des rapports entre l'énergie et la structure sociale, on en vient à songer au processus de développement de ces rapports. Les forces qui militent en faveur du développement sont économiques, sociales et psychologiques. Les phases du développement peuvent être continues et infinitésimales, donc à peine perceptibles, alors que, dans d'autres cas, les changements sont brusques et évidents. Les points de repère essentiels et fondamentaux, dans l'histoire de la production d'énergie, tels que le moteur à vapeur, les centrales électriques et les réacteurs atomiques, sont bien connus. Chacun de ces progrès a été précédé par des études scientifiques et technologiques. Ces travaux étaient habituellement motivés, mais pas toujours orientés, par certaines considérations sociales et économiques. L'acquisition scientifique des nou-

veaux principes de production d'énergie a été suivie par des stades d'application et d'emploi, aboutissant à la création de nouvelles entreprises et faisant apparaître de nouveaux aspects légaux et sociaux de la question. On peut maintenant suivre ces changements en liaison avec le développement énergétique qui s'est effectivement produit, mais quand on veut examiner l'avenir de l'emploi ou de la production de l'énergie, il faut comprendre le complexe énergie-structure sociale assez clairement pour pouvoir juger de la situation d'avenir probable.

Il est utile, dans tout examen du complexe énergie-structure sociale d'envisager trois aspects principaux de la mise en œuvre de cette énergie, à savoir celle que l'on utilise pour la production, celle que l'on emploie pour les transports et les communications et celle qui reçoit des emplois ménagers.

ÉNERGIE ET PRODUCTION

Le processus de la production présume l'existence d'une technique de la production, qui sera appliquée aux ressources physiques par l'emploi de main-d'œuvre, laquelle se sert d'un complexe d'instruments de production.

Les éléments qu'on trouve au début du cycle ou du processus de production peuvent se généraliser au point de comprendre les ressources physiques et les instruments de production, tandis que les ressources physiques peuvent être utilisées sous la forme où on les trouve dans la nature ou sous une forme constituant l'aboutissement ou la fin de cycle d'un autre processus de production. Les instruments de production sont eux-mêmes le résultat d'un autre processus de production (industrie productrice de biens d'équipement) tandis que les ressources physiques, en fin de compte, se trouvent sous une forme à incidence naturelle, qu'elle soit minérale ou biologique.

On peut voir, dans l'énergie, un élément de début du cycle de production qui revêt la forme d'une ressource physique.

Par main-d'œuvre, on entend l'élément humain dans la production, notamment les efforts musculaires et non musculaires, qui interviennent pour la mener à bien. Dans les travaux manuels, on ne s'attend pas que l'ouvrier exerce beaucoup de jugement; à vrai dire, on ne le souhaite pas. Dans les travaux spécialisés et les responsabilités administratives, en revanche, l'activité musculaire est d'importance secondaire à côté de la solidité du jugement et de la capacité de prendre des décisions.

La manière dont les ressources physiques et les instruments de production sont utilisés par les travailleurs constitue la technique. Elle en vient à s'identifier avec ce travailleur par l'entraînement, l'instruction et l'expérience. Elle est acquise essentiellement de l'extérieur, par rapport au processus de la production, et « importée » par le producteur. Dans les économies artisanales et les sociétés traditionnelles, les techniques passent d'une génération à la suivante par la période d'apprentissage et l'exer-

cice. Dans les économies industrialisées, cette transmission se fait par un important mécanisme qui s'appelle l'instruction et la formation des travailleurs. Les techniques s'affinent dans ce processus de transmission, alors que pendant ces dernières années, les recherches et les mises au point deviennent éminemment organisées et préparées d'avance dans des centres spéciaux destinés aux nouvelles techniques créatrices.

Il tombe dans le cadre de notre objectif d'identifier ces trois formes d'acquisition de la technique en cours de production. L'appropriation des animaux peut être considéré comme étant l'une des premières découvertes de nouvelles techniques de production. L'établissement du système voulu pour régler la fusion nucléaire à volonté de manière à produire de l'énergie utilisable est une technique qui reste à acquérir — si on doit un jour y arriver. Un art intermédiaire, à savoir la technique nécessaire pour produire de l'électricité en déplaçant un circuit dans un champ magnétique, a été acquis par une combinaison d'expérience et d'observations accidentelles. On s'efforce, à la présente conférence, de faciliter le développement exprès et planifié de techniques d'emploi originales de nouvelles sources d'énergie. Ceci ne représente pas la méthode classique d'acquisition de techniques et pas davantage le second type, dans lequel les découvertes scientifiques et l'industrialisation se combinaient.

Au cours de ces récentes années et pour une diversité de raisons, les hommes, les nations et les organismes internationaux ont créé des centres destinés à créer de nouvelles techniques comme aboutissement d'un effort créateur déterminé, dirigé et planifié. Le mobile « avantage » ou « bénéfice » au sens économique figure dans nombre de ces projets mais, pour nombre de tentatives de ce genre, il n'est plus prédominant.

Les formes classiques d'énergie utilisées pour la production agricole sont les animaux domestiques et les moulins à vent. Les projets d'irrigation de grande envergure, tels que les barrages et les réservoirs, peuvent être considérés comme des instruments fixes de production et ont été réalisés dans une large mesure par le travail humain. Dans la production non agricole, c'est-à-dire essentiellement dans les artisanats, c'est l'homme qui représentait la source d'énergie, d'où les exigences modestes à son endroit. En Égypte antique, on se servait de la montée du niveau du Nil pendant la crue pour inonder la vallée, ce qui suppléait au besoin de pomper de l'eau. L'irrigation par bassin, en tant que technique, a été pratiquée et développée pendant des milliers d'années. Dans l'analyse précédente on verrait, dans le travail humain, une forme inférieure de technique et nullement une ressource physique de production.

Avec la venue de l'industrialisation, les combustibles fossiles (charbon et pétrole) furent mis en œuvre, avec la création, ou par cette création même, d'une abondance de nouvelles techniques présentant des rapports avec l'utilisation et la transformation des ressources physiques et la fabrication d'instru-

ments de production très complexes et puissants. La production d'énergie est devenue un secteur important de l'économie, à la différence de ce qui se passait à l'époque traditionnelle, où il n'y avait pas d'institutions se spécialisant dans la production d'énergie et sa distribution aux autres usagers. La production commerciale d'énergie et l'extraction des combustibles s'est développée dans les pays à économie avancée au point de faire passer complètement au second plan les sources traditionnelles (notamment les moulins à vent des Pays-Bas). Au sens politique, économique et social du terme, c'est la consommation d'énergie qui définit l'état, arriéré ou non, de certains pays. Il s'établit des rapports étroits entre les revenus individuels et la consommation d'énergie². En conséquence, les projets de développement économique pour les pays relativement peu développés comportent la production d'énergie comme élément de première importance. La force motrice est habituellement fournie par les combustibles fossiles et l'aménagement des emplacements riches en houille blanche. Les techniques de production disponibles et les instruments de production durables ont été mis au point, dans une large mesure, spécifiquement pour mettre en œuvre les combustibles fossiles et l'énergie hydro-électrique.

ÉNERGIE ET TRANSPORTS

Les transports représentent la deuxième grande orientation de la consommation d'énergie. Cette activité — celle des transports — signifie la mobilité des ressources physiques (pendant les divers stades de la production, jusqu'à ce qu'elles finissent par atteindre le consommateur). Par l'entremise des transports, l'homme gagne en mobilité personnelle, ce qui peut avoir des répercussions sur son activité productrice (mouvements de la main-d'œuvre) ou simplement en faire un meilleur consommateur. Le déplacement des ressources pendant les divers stades de la production élargit la possibilité de faire usage de celles que l'on trouve en un lieu ou un autre, et l'emplacement des centres de production devient un problème significatif. Pendant la période de transition, il n'y avait pas de problème de ce genre, car la production était essentiellement agricole et devait se trouver là où le terrain et le climat s'y prêtaient. Dans les sociétés industrialisées, l'emplacement des centres de production est conditionné par nombre d'éléments. Généralement parlant, on peut distinguer deux phases. Pendant la première, c'est le charbon qui constituait la principale source d'énergie et la technologie moderne n'intervenait que dans un petit nombre de pays. Il était plus facile de déplacer les autres ressources physiques, situées plus près des bassins carbonifères, et on préférait établir les industries dans les pays technologiquement avancés. Pendant la deuxième phase, le pétrole est devenu un combustible tout aussi important. Sa

² Voir E. S. Mason *et al.*, « Besoins en énergie et développement économique », *op. cit.*, vol. 1 (publication des Nations Unies, n° de vente : 56.IX.1, Vol. 1), p. 53.

répartition géographique est différente et il est plus facile à transporter que le charbon; au surplus, la technologie, entre temps, s'est diffusée dans nombre de pays. Les réseaux de transport de l'énergie électrique couvrent d'amples étendues en diverses parties du globe.

L'énergie fournie aux services de transport s'apparente à celle que consomme la production, en raison des rapports qui lient la production aux transports en ce sens que nombre de processus de production sont conditionnés par ce qui se passe dans le domaine des transports et, réciproquement, en raison du besoin de transport qui fait suite à une production. Pour autant que l'énergie se trouve au départ de la production et du transport, la création de cette énergie et son utilisation dépendent des rapports entre les transports et la production. A quoi bon développer un réseau de transports plus qu'il ne le faut pour la production (et ses processus)? Le processus de production ne saurait se poursuivre s'il n'y avait pas, à son service, un système de transport pour faire face à ses besoins et amener ses produits aux grands marchés de consommation. Cet équilibre entre production et transport a été réalisé, dans les sociétés traditionnelles, sur un plan restreint alors que, maintenant, il s'étend à la presque totalité du globe. On se rend pleinement compte du fait que, bien que, techniquement parlant, on puisse réaliser un degré fort élevé de mobilité des ressources, les barrières constituées par les frontières nationales et divers autres obstacles viennent réduire cette mobilité.

L'énergie du vent, précieuse pour les voiliers, a joué un grand rôle dans le développement de la civilisation. Ce système avait ses limitations en raison du manque d'uniformité et de l'absence de moyens permettant de régler son intensité. Pendant des siècles, cependant, les routes tracées par le régime des vents et des océans ont été de grandes artères pour le développement de l'humanité. Il est assez peu probable que les réseaux de transport bénéficient beaucoup à l'avenir des sources nouvelles d'énergie. La mobilité croissante de l'humain, à l'échelle interplanétaire, a déjà créé une grande industrie de l'astronautique et permettra peut-être un jour d'élargir la sphère d'activité humaine en la faisant passer du plan géographique au plan cosmographique. On a déjà fait beaucoup usage, à bord de certains astronefs, de transformateurs d'énergie à batteries de cellules solaires. La technologie interplanétaire a produit une multitude de techniques nouvelles dans les domaines de la métallurgie, de la balistique, de l'électronique et tant d'autres, et nombre de ces nouvelles techniques peuvent trouver des applications utiles et importantes dans divers domaines de production. On observera que les batteries de cellules solaires ont reçu leurs premières applications réussies dans la transmission des courants lumineux.

Les moyens de transport sont également venus augmenter la mobilité de l'homme pour des fins autres que la production. Des groupements sociaux cohérents se sont établis sur la base de méthodes

communes de communication et de compréhension entre leurs membres et, en raison de la possibilité de créer une autorité dirigeante centrale, capable de défendre cette communauté contre les dangers de l'extérieur et d'établir l'ordre à l'intérieur. L'autorité s'est développée aussi loin qu'il était possible au système de transport de la maintenir. La navigation sur le Nil, pendant l'antiquité, a joué un rôle très important dans le développement de la civilisation. Les Romains, grands constructeurs de routes, créaient la cohésion et maintenaient l'ordre sur une grande étendue. Les conséquences sociales des rencontres entre humains ne sont pas moins importantes que les aspects ayant trait à la sécurité. Elles se prêtent à la transmission des idées et au développement des échanges, stimulent l'activité créatrice et facilitent l'organisation. Les grandes migrations humaines ont été motivées par la famine ou d'autres désastres naturels, ou par le besoin de conquête et d'expansion nationale massive. Ce sont là des cas spéciaux, d'une grande importance.

La communication des idées et des renseignements, en plus des voyages et des mouvements physiques effectifs, devient un élément important de la formation d'une nouvelle ère de l'existence humaine à l'échelle globale. L'énergie éolienne et l'énergie solaire, en revanche, telles qu'on pourra les développer à l'avenir, ne joueront probablement pas de rôle important à cet égard, comparable en quoi que ce soit à ce qui s'est produit dans le passé.

APPLICATIONS MÉNAGÈRES DE L'ÉNERGIE

Les applications ménagères, dans les maisons et la vie urbaine en commun, représentent la troisième orientation des applications de l'énergie. Elles englobent ses utilisations pour la cuisine, le lavage, le chauffage, l'éclairage et les distractions. Le Secrétaire de l'ONU évalue la consommation mondiale de chaleur et de force motrice utile en 1952 de la manière suivante :

	Chaleur utile	Énergie utile (équivalents de 10 ⁹ MWh d'élec- tricité)	Total
Agriculture	...	0,3	0,3
Industrie	5,2	0,6	5,8
Transports	...	0,8	0,8
Besoins ménagers, etc. . .	2,9	0,4	3,9

RÉFÉRENCE. — Organisation des Nations Unies, Département des affaires économiques et sociales, « Besoins du monde en énergie en 1975 et en l'an 2000 », *op. cit.*, vol. 1, p. 5.

Le résultat des activités telles que le transport et la production, en fin de compte, est l'établissement pour les consommateurs privés et publics, de certaines normes de disponibilité des marchandises et des services qui définissent le niveau de vie. Les produits de consommation qui présentent une étroite liaison avec les besoins physiologiques tels que les aliments et l'habitation sont élémentaires et on peut concevoir que l'on aboutisse un jour à la saturation quand il s'agit de les satisfaire. Pour les autres pro-

duits et services, il ne semble pas y avoir de limite au désir de développement de l'homme.

Les valeurs sociales sont en création et en remaniement constants avec la connaissance des niveaux de vie et l'attente (justifiable ou non) de normes plus élevées et meilleures. Ce cycle de l'offre et de la demande est à la base même de l'initiative et du développement humains mais il semble maintenant nécessaire que les valeurs soient créées, non pas seulement sur des bases nationales ou personnelles, mais bien aussi à des échelles universelles. Pour autant que les désirs de l'individu doivent s'intégrer avec ceux de la communauté, il devient maintenant clair que les aspirations internationales justifiées doivent être reconnues et coordonnées avec les aspirations nationales et individuelles.

ÉVALUATIONS D'AVENIR QUANT À LA PRODUCTION D'ÉNERGIE

On étudie fréquemment des évaluations sur les besoins énergétiques et la possibilité de les satisfaire, pour diverses raisons. Quand on procède à cette étude, on observe le plus souvent certains principes.

On trouve les tendances passées de la production et de l'utilisation de l'énergie et on s'en sert comme base pour évaluer les tendances d'avenir probables, tant en ce qui concerne l'offre que la demande.

Les transformations technologiques qui présentent un lien avec l'emploi de l'énergie font l'objet d'une étude par le jeu de l'examen des tendances de la production industrielle et agricole, le développement des transports et des moyens de communication, la croissance de la population et les plus grands besoins d'avenir de consommer l'énergie sur le plan ménager.

On envisage également le développement scientifique et l'évaluation des réserves énergétiques pour déterminer ce que sera la production d'avenir probable, en admettant certains rapports de production. Les frais représentent l'un des éléments les plus importants à considérer. On ne doit pas produire d'énergie « à tout prix ». Le prix acceptable est défini par les autres applications possibles des ressources et les répercussions de l'évolution de la configuration sociale.

Les évaluations d'avenir, les études et les prévisions aident à prendre certaines décisions. Ce ne sont pas des « ordres » du Très-Haut pour les générations à venir. Les études signalent les difficultés et les insuffisances possibles et aident donc à prendre les mesures qui conviennent au moment le plus opportun. Il faudra constamment évaluer la situation, bien que certaines des mesures ainsi prises puissent être irréversibles.

Les évaluations quantitatives en ce qui concerne l'énergie, quant à l'offre et la demande dans divers pays, révèlent que les sources classiques (combustibles fossiles, houille blanche) resteront les principales sources d'énergie pour la génération qui vient. On observera peut-être des événements importants en ce qui concerne les emplois de l'énergie atomique pour la force motrice et le chauffage, mais

il est peu probable que les nouvelles sources d'énergie éolienne et solaire jouent un grand rôle dans le bilan énergétique de l'avenir. Tout gain de rendement dans l'utilisation des sources actuelles rendrait d'énormes quantités d'énergie disponibles en vue de leur utilisation, quantités d'énergie qui sont actuellement perdues à la production, pendant le transport ou à la consommation. Les progrès scientifiques et technologiques ayant trait à la productivité appliquée à l'énergie, avec la prospection de nouvelles ressources fossiles et leur extraction (gaz naturels y compris), semblent constituer les orientations les plus fructueuses pour le progrès d'avenir.

ÉCONOMIES DE RESSOURCES

Les réserves de thorium et d'uranium semblent également être abondantes, bien que le prix de revient de l'énergie produite par des moyens atomiques soit encore plus élevé que celui du courant fourni par les centrales thermiques dans la plupart des pays. Ce prix de revient supérieur de l'énergie fournie par les centrales atomiques n'empêche pas nombre de ces pays de s'engager dans de vastes programmes de mise en œuvre de cette énergie. On estime que ces programmes sont nécessaires à la réalisation d'autres progrès dans le domaine de la technologie atomique et que, dans certains cas, les applications autres que celles ayant trait à la production d'énergie (à des fins militaires ou pacifiques) justifient ce supplément de prix de revient.

Vers la fin de notre siècle, le monde produira de l'énergie à un rythme équivalent à 60 fois environ celui qui était de règle il y a moins de deux siècles. Cet énorme développement s'accompagne d'un épuisement progressif de ressources accumulées naturellement pendant les ères géologiques passées, lesquelles ne sont pas renouvelables. En quelques centaines d'années le monde épuiserait, dans ces conditions, des ressources qui ont mis des millions d'années à se concentrer. Il n'est pas question d'une disette imminente des sources d'énergie dans le monde, mais il s'agit d'une question de principe quand on souligne que de meilleures techniques d'économie s'imposent pour les sources qui ne sont pas renouvelables.

Les disponibilités énergétiques actuelles du globe ne sont pas uniformes et, si l'on tient compte des restrictions imposées par la mobilité et les prix, il se peut que certains pays jugent utile d'exploiter des dépôts économiquement peu satisfaisants ou mettent en œuvre des techniques plus coûteuses de production de l'énergie. Ces pays feraient fort bien de prendre également des mesures de rationalisation en ce qui concerne la consommation de l'énergie.

TENDANCES DANS LE DÉVELOPPEMENT

Les tendances du passé, dans l'utilisation de l'énergie pour la production, les transports et les applications ménagères, telles qu'elles sont passées en revue dans les remarques mentionnées ci-dessus, indiquent que la participation humaine à la production devient

progressivement moins manuelle et plus intellectuelle. Ce travail révèle que la demande de produits de consommation se développe rapidement dans des directions relativement non essentielles, ce qui satisfait l'attente croissante de conditions de vie meilleures, plus confortables et plus élégantes, tandis que les insuffisances de base, en ce qui concerne les besoins physiologiques, demeurent pour certaines couches sociales, même dans un pays donné. Les échanges sociaux et les rencontres sur le plan culturel qui sont dues à la plus grande mobilité des personnes, des produits et des idées, accentuent le sens de la disparité et créent des réactions sociales, politiques et philosophiques qui visent à l'égalisation. Avec la récente accélération du rythme de développement de la production, l'égalisation partielle se produit à des niveaux plus élevés et elle est appuyée par un développement de la production d'énergie.

L'identification de la non-égalité, particulièrement en ce qui concerne les articles et les services essentiels, est actuellement chose généralement reconnue. Elle crée la nécessité d'un développement économique et d'une meilleure répartition des revenus. Elle a particulièrement bien réussi dans ce sens au cours des récentes décennies, dans les pays avancés. En revanche, la disparité entre nations s'est aggravée, d'où les efforts visant à faciliter le développement économique et l'évolution sociale des pays moins développés. C'est là, en principe, la contrepartie internationale du problème national auquel il a été fait allusion plus haut. Reste à voir si le problème consistant à réduire les différences marquées que l'on observe entre les nations sera attaqué avec succès de la même manière que celle qui a permis de réduire les grosses différences individuelles dans une même société, c'est-à-dire en établissant des niveaux de consommation minimum et des occasions égales d'amélioration du lot de chacun et en augmentant le rythme total de la production pour maintenir ces niveaux. La production a été augmentée par le jeu d'un accroissement de la productivité et de la réallocation des ressources, pour augmenter les placements au titre de la production et la mise au point de technologies nouvelles. Cette tendance s'est accompagnée d'une grosse augmentation de la production et de l'utilisation de l'énergie.

Il n'existe pas encore d'autorité mondiale qui puisse procéder à la réallocation des ressources d'une telle façon et garantir des niveaux minima mais l'opinion publique a beaucoup évolué dans ce sens au cours des années d'après-guerre. Les études dans lesquelles un semblable point de vue mondial est accepté et examiné se font de plus en plus fréquentes et la possibilité d'une sérieuse revue du problème posé par la possibilité de développer de nouvelles sources d'énergie devient une réalité sur ce plan, particulièrement si elle s'intéresse plus spécialement aux pays sous-développés du globe.

Cette situation permettra peut-être de créer les normes sociales nécessaires pour procéder à l'examen, entre autres, de ce que sera la situation énergétique du globe pour l'avenir. Quand on procède à semblable

examen, les petites sources dispersées d'énergie qui peuvent rendre des services aux communautés locales arriérées trouvent une importance sociale, aux côtés des sources économiques classiques. La valeur qu'il y a, du point de vue du développement des ressources, à mettre en œuvre de nouvelles techniques de production d'énergie, bien qu'elles ne soient pas économiquement capables de faire concurrence aux autres moyens, n'en sera que plus appréciée. Les économies à réaliser sur les ressources énergétiques, que l'on gaspille maintenant avec folie, deviendront peut-être alors chose possible, par le jeu de leur emploi plus rationnel.

Les combustibles fossiles, les grandes stations hydrauliques et l'énergie atomique sont autant de produits d'une évolution qui est conditionnée par les besoins d'un marché qui réfléchit les vœux de l'humanité en vue d'une amélioration du lot de chaque individu, à l'intérieur de pays qui se font concurrence pour les sources d'énergie et divers autres avantages par l'adoption de technologies nouvelles. Dans cette marche forcée des progrès techniques et économiques, nombre de communautés, dans le monde entier, restent en arrière. Il ne sera peut-être pas nécessaire pour elles de suivre la même évolution, pour autant particulièrement que le besoin de nouvelles technologies, espère-t-on, est maintenant moins influencé par les aspirations des individus et réfléchit ou exprime davantage le besoin de combler le gouffre qui sépare les riches et les pauvres. Si cet argument présente quelque valeur, il faut s'attendre à le voir se répercuter sur les valeurs sociales qui sont à la base des progrès technologiques, y compris la technologie de l'énergie elle-même.

QUELQUES OBSERVATIONS SUR LA SITUATION ÉNERGÉTIQUE DU MOYEN-ORIENT

La zone du Moyen-Orient est aride car, en général, elle est constituée par un grand désert, dans lequel sont dispersées des communautés fertiles. Par ailleurs, cette région est riche en pétrole, dont elle a d'immenses réserves vérifiées. Les longues journées ensoleillées et les températures élevées que l'on trouve dans la région ont incité nombre de chercheurs à tenter l'emploi d'instruments solaires de divers types. Dès 1913, une compagnie avait été formée au Caire pour construire une station de pompage solaire à Maadi. On trouve des éoliennes sur la côte de la Méditerranée, d'Alexandrie vers l'ouest, jusqu'à l'intérieur de la Libye. Les ressources en eaux saumâtres de nombre de localités de la région de la mer Rouge et de la Tunisie font songer à des projets de distillation solaire des eaux. Au cours des années de guerre, les armées qui se trouvaient dans le désert ont mis au point des alambics solaires pour remplir les batteries d'accumulateurs des véhicules automobiles et divers autres emplois. Le régime important de l'évaporation de surface sous le climat chaud et sec du désert égyptien coûte au pays de grosses quantités des eaux du Nil mises en réserve dans des citernes, et ces pertes seront encore plus importantes

une fois le barrage d'Assouan mis en service, avec un lac artificiel s'étendant sur plus de 300 kilomètres. En revanche, l'évaporation de surface est à la base même du projet non moins important de Kattarah, qui prévoit l'ouverture d'un canal allant de la mer, près d'El Alamein, à une dépression naturelle de 80 mètres de profondeur, avec utilisation de la chute d'eau ainsi créée pour la production d'électricité, ceci à un débit qui sera maintenu par l'évaporation continue de la surface du lac artificiel.

On trouve, dans le Moyen-Orient, des centres où la population est dense, avec un très faible rapport entre l'étendue de terre disponible et le nombre d'habitants, mais aussi les vastes étendues du Sahara, parsemées de quelques oasis séparées les unes des autres par des distances considérables. Dans les régions où la population est dense, on fait appel aux méthodes de production et de distribution de l'énergie à grande échelle. Une production agricole intensive exige l'emploi de sources de force motrice à débit continu. Au cours de ces quelques dernières décennies, les agriculteurs égyptiens se sont largement orientés vers les dérivés du pétrole brut, particulièrement le pétrole lampant, pour satisfaire leurs besoins d'énergie, en s'éloignant des sous-produits de l'agriculture et de la fiente des animaux. Dans une telle situation, les cuisinières solaires ne sauraient trouver de marché, d'autant plus que le pétrole bénéficie d'un fort subside. Dans les petites localités situées en plein désert, les frais afférents à la fourniture d'énergie sont prohibitifs. Il faut transporter le combustible et les pièces détachées sur des centaines de kilomètres, à travers ces déserts. Toute autre source d'énergie y aurait une chance de faire concurrence aux moyens employés, à cela près que les combustibles classiques sont solidement établis par la tradition et que toute technique nouvelle devra faire l'objet d'une longue période d'expérimentations et de persuasion sociale, après avoir démontré sa valeur pratique du point de vue technique et économique.

Dans une région du Soudan du nord-est, voisine de la mer Rouge, les tribus transportent l'eau dont elles ont besoin pour leurs nécessités personnelles sur de grandes distances et se la procurent en échange contre du sel et d'autres produits de leur industrie. La distillation et la déminéralisation de l'eau auraient des répercussions directes sur le niveau de vie dans

cette région. Avec le développement de la production de pétrole et l'établissement de centres miniers dans diverses régions du désert, on établit des camps modernes pour les ouvriers et les techniciens. On construit des routes, des ports et des centres d'exportation. Ceci établit une technologie avancée dans la région en cause, et la possibilité d'expériences à petite échelle avec des moulins à vent, des cuisinières solaires, la climatisation également solaire et la distillation de l'eau s'en trouve créée. Dans de semblables petites communautés techniquement avancées et soutenues économiquement de l'extérieur, il devient possible de s'intéresser aux applications des énergies solaire et éolienne.

En conclusion, on fait remarquer que les projets de recherche intenses portant sur ces formes d'énergie devront faire un grand pas technologique en avant pour qu'il soit possible de leur donner des applications à une échelle importante. Cependant, il s'agit là d'efforts à continuer et à intensifier car tout succès aura des répercussions sociales plus importantes que ses conséquences purement économiques dans nombre de communautés dispersées qui ne peuvent pas être desservies convenablement par les systèmes classiques de distribution d'énergie. Pour autant que les travaux de recherche se concentrent beaucoup dans les pays très développés, il semble probable que de nouvelles applications utiles dans les domaines des énergies solaire et éolienne seront trouvées également dans ces pays avancés, sur des plans qui ne sont pas convenablement desservis par les systèmes éminemment développés de fourniture d'énergie en provenance des sources classiques. C'est-à-dire que les nouvelles sources, quand elles recevront des applications, viendront compléter les moyens déjà disponibles et non pas les remplacer. Indiquons, en passant et pour illustrer la nature du problème, que la technologie des communications interplanétaires et les projets de développement de communautés rurales dans le centre de l'Afrique bénéficieront probablement d'une manière égale des recherches menées actuellement sur l'énergie solaire. Dans chacun de ces deux domaines d'application, différents l'un de l'autre au possible, on ne peut pas se servir de systèmes de distribution d'énergie sur une grande échelle et les mobiles autres que l'attrait économique jouent un rôle important.

L'ABONDANCE DES FLUX NATURELS D'ÉNERGIE ET LE CHOIX ENTRE LES MOYENS DE LES CAPTER

P. Ailleret

Directeur général adjoint
Électricité de France

L'homme vit au milieu de flux naturels d'énergie considérables par rapport à ses besoins.

Le vent et le soleil par exemple représentent chacun des puissances par unité de surface de l'ordre du kilowatt par mètre carré alors que les consommations totales d'énergie de toute nature sont de l'ordre du dixième de watt par mètre carré quand on fait la moyenne des puissances consommées sur l'ensemble de pays aussi industrialisés que les États-Unis ou l'Europe de l'Ouest.

Ce rapport entre les puissances naturelles et les besoins humains montre que, même avec de faibles rendements, et même avec de grands développements des besoins, les ressources naturelles d'énergie sont surabondantes pour nous. On peut remarquer en passant que ces puissances naturelles sont cependant encore à l'échelle humaine et sans doute n'est-ce pas par hasard qu'il en est ainsi, car la vie humaine aurait peut-être eu beaucoup plus de mal à se développer dans un milieu naturel où les flux énergétiques auraient été d'un ordre de grandeur trop élevé par rapport à la fragilité organique de l'homme.

L'une de ces ressources naturelles, le vent, a été autrefois une énergie très importante pour l'homme, tant sous la forme des moulins à vent que sous la forme de la navigation à voile. Mais l'homme ayant appris à utiliser ces concentrés fossiles d'énergie que constituent le charbon et le pétrole a trouvé là des sources d'énergie beaucoup plus économiques dont la concurrence a fait pratiquement disparaître toute utilisation du vent.

Cependant les besoins énergétiques s'accroissent à une cadence de l'ordre du doublement tous les vingt ans qui ne paraît pas devoir se ralentir. D'autre part les ressources fossiles, quoique encore très abondantes et ne posant aucun problème à court terme sont néanmoins limitées. Il est raisonnable de préparer des moyens de parer à un ralentissement des découvertes pétrolières qui finira bien par se produire un jour. Si l'énergie atomique paraît avoir toutes chances d'effectuer la relève, il n'est pas exclu que d'autres procédés puissent la surclasser dans certaines limites et dans certains domaines.

Un grand nombre de moyens permettent de tirer de l'énergie de ces ressources naturelles et, même en se limitant aux trois sources d'énergie qui font l'objet de cette conférence, on peut dénombrer un assez grand

nombre de procédés bien différents qui pourraient constituer des sources importantes d'énergie le jour où ils seraient économiquement viables.

Cette multiplicité de voies possibles est bien rassurante pour l'avenir mais elle nous met devant un choix difficile : faut-il disperser les efforts sur toutes les voies possibles, ou faire dès maintenant des choix et concentrer l'effort sur les voies les plus prometteuses ?

Le même problème se pose dans le domaine atomique où une bonne demi-douzaine de techniques franchement différentes sont en compétition dans la recherche d'une utilisation économiquement viable de la fission de l'uranium.

Du point de vue des utilisateurs, un tel embarras du choix est prometteur mais chacun de ceux qui poussent une voie déterminée de recherche peut s'inquiéter de ce que chaque voie n'a pas une probabilité élevée de surclasser toutes les voies concurrentes et de déboucher sur des réalisations industrielles à grande échelle.

Lorsqu'il s'agit d'une recherche de base — sur les photopiles par exemple — et non d'une recherche tout à fait appliquée, on peut répondre que si ces études n'aboutissent à rien dans le domaine énergétique, elles courent la chance d'être utilisées dans tous autres domaines : un progrès de la physique a toujours une valeur propre, même si on ne lui voit pas immédiatement d'usage économique.

Dans le cas des recherches appliquées, cet argument n'aurait qu'une assez faible valeur mais il faut aussi tenir compte de ce que, si les modes possibles de captation des énergies naturelles sont nombreux, il n'existe pas non plus un unique problème énergétique à résoudre, mais plusieurs. En effet, les besoins énergétiques se présentent différemment suivant l'ordre de grandeur des puissances dont il s'agit et aussi suivant qu'il s'agit d'approvisionnement général en énergie ou d'applications particulières comme le chauffage des locaux ou la distillation de l'eau.

Les différences entre les valeurs d'usage de l'énergie dans ces besoins divers sont généralement très surestimées mais on pourra en avoir une mesure devant le fait qu'à côté de l'industrie de la distribution de l'énergie électrique qui vend l'énergie par quantités relativement importantes, il existe une industrie des piles sèches qui vend des kilowattheures

à un prix environ mille fois supérieur au prix de vente des réseaux électriques. C'est cependant une industrie importante dont le chiffre d'affaires est de l'ordre du trentième du chiffre d'affaires des services publics de production et de distribution de l'électricité, alors que les énergies vendues sont dans le rapport de 1 à 30 000.

Il y a donc place à la fois pour des moyens de production à l'échelle des réseaux électriques et à l'échelle des piles sèches.

Pour quitter les généralités, prenons l'exemple de l'énergie éolienne; on peut se demander, malgré la régression très rapide des petits appareils qui étaient autrefois très nombreux aux États-Unis, s'il y a place pour de petits appareils répondant à des besoins dispersés bien que le prix de revient du kilowatt-heure produit soit nécessairement élevé et qu'il faille généralement régulariser la puissance produite.

On peut d'autre part se demander s'il y a place pour des appareils à l'échelle de la centaine de kilowatts qui aideraient des groupes diesel à fournir localement l'énergie en l'absence de réseau. En considérant ce problème, il ne faut pas commettre l'erreur de surestimer le coût des produits pétroliers dans les endroits mal approvisionnés : les progrès dans les transports de produits pétroliers sont tels que les prix du pétrole tendent à avoir entre les différents points du monde des écarts bien trop faibles pour pouvoir rendre localement concurrentiels des procédés économiquement médiocres.

On peut enfin se demander s'il existe un champ possible pour des aéromoteurs dont la puissance serait poussée jusqu'à la taille qui rend minimum le prix de revient unitaire et qui seraient alors couplés sur de grands réseaux électriques pour intégrer leur production parmi celles des centrales classiques, thermiques et hydrauliques.

Une situation favorable se rencontre si, parmi ces moyens intégrés, un assez grand nombre de centrales hydrauliques fonctionnent sur des réservoirs de capacités petites et moyennes qui sont valorisés par le fait que l'on peut y économiser l'eau quand le vent fournit de l'énergie, en la déstockant au contraire dans les périodes sans vent. C'est le cas en France où, de plus, l'énergie éolienne est plus spécialement concentrée sur l'hiver, saison pendant laquelle les apports hydrauliques sont les plus faibles. La latitude de la France, bien qu'un peu faible, est cependant acceptable pour récupérer l'énergie éolienne dont on sait qu'elle est plus abondante dans les régions tempérées que dans les régions tropicales et équatoriales.

Les aéromoteurs peuvent-ils devenir viables dans de telles conditions? Ce n'est aucunement certain. Il ne s'agissait donc pas de croire que l'on avait à développer un nouveau procédé d'alimentation des réseaux électriques, mais de réaliser des installations qui donneront ensuite le moyen de déterminer s'il faut persévérer dans cette voie ou au contraire l'abandonner.

Malheureusement dans le domaine éolien c'est seulement une réalisation de pleine grandeur, dont

la puissance unitaire est voisine de l'optimum économique probablement compris entre 1 000 et 2 000 kilowatts, qui peut préciser à la fois la puissance optimum et le prix de revient correspondant. Il est vrai que cette grandeur ne pose pas de problèmes financiers comparables aux réacteurs nucléaires, qui ne peuvent être économiquement significatifs que pour une puissance unitaire au moins cent fois plus grande.

Électricité de France a construit un premier appareil qui vise la simplicité maximum : il comporte une hélice tripale de 30 mètres de diamètre tournant en permanence en synchronisme avec le réseau. Le profil très fin des pales et la grande vitesse périphérique font que la puissance passe par un maximum de 900 kilowatts pour un vent de 20 mètres par seconde et redescend pour des vents plus élevés, par perte de vitesse des profils des pales, sans qu'il y ait aucun mécanisme de régulation.

La puissance tombe à zéro pour un vent de 6,5 mètres par seconde et devient négative et égale à 70 kilowatts pour l'absence complète de vent si l'on ne découple pas l'alternateur du réseau. Il s'agit d'une hélice arrière qui se place d'elle-même face au vent sans aucun mécanisme d'orientation. La vitesse de rotation étant maintenue absolument constante par le réseau, le risque de résonances accidentelles, si dangereux pour les aéromoteurs, se trouve diminué.

Cet appareil n'a encore produit qu'une centaine de milliers de kilowatt-heures, mais après quelques compléments, cette expérience va donner les bases nécessaires pour étudier si un appareil plus grand du même type pourrait parvenir à la compétitivité.

Par ailleurs, un appareil plus classique à pas réglable de 35 mètres de diamètre a été commandé pour compléter cette expérience.

Il est possible que cet effort n'aboutisse à rien et nous ne pouvons pas préjuger des conclusions, mais l'effort financier qu'il demandait a paru justifié par une certaine probabilité de succès. S'il n'aboutissait pas, au moins pourrait-il rendre service à d'autres en leur évitant de faire à nouveau des efforts inutiles. En plus, il ne serait pas sans apporter sur le vent et sur les hélices des renseignements qui peuvent servir pour d'autres usages — ou être réutilisés plus tard si des conditions nouvelles techniques ou économiques modifient les chances de compétitivité.

L'intérêt de cette conférence est précisément de faire profiter tous les pays des expériences faites par chacun. A ce point de vue, les expériences à conclusion négative ont une valeur au même titre que celles qui paraissent ouvrir des espoirs sérieux.

Tout résultat d'expérience a sa valeur du moment qu'il est objectif; l'écueil à éviter est bien entendu la sous-estimation des mises au point qui sont nécessaires pour parvenir à l'échelle industrielle et des risques que les prix de revient, une fois connus, ne se révèlent trop élevés.

Aucun « destin » n'assure à une découverte de physique qu'elle débouchera un jour dans le domaine

de l'économie; il ne faut pas provoquer à la légère des espoirs, qui feraient en particulier le plus grand tort aux pays dont le développement exige des moyens rapides et sûrs d'approvisionnement en énergie et qu'il ne faut pas engager dans des voies, peut-être

valables scientifiquement, mais dont l'utilisation prématurée aurait le caractère d'aventure.

L'intérêt de cette conférence sera d'aider à distinguer ce qui peut être déjà assez mûr de ce qui est seulement l'annonce d'un espoir de fruits.

THE ABUNDANCE OF NATURAL ENERGY AND THE CHOICE OF THE MEANS OF HARNESSING IT

(Translation of the foregoing paper)

P. Ailleret

**Assistant Director-General
Électricité de France**

Man lives amidst natural fluxes of energy that are great in comparison to his needs.

The wind and the sun, for instance, each represent a power per unit area of the order of a kilowatt per square metre, while the total consumption of energy of all kinds is of the order of a tenth of a watt per square metre, if we average the power used by the entire group of highly industrialized regions like the United States or Western Europe.

This relation between natural power and human needs shows that, even at low efficiency, and even with a great expansion of the needs, our natural energy resources are over-abundant. One might incidentally remark that these natural power resources are still on the human scale, and it is doubtless not by chance that this is so, for the development of humanity would perhaps have been much more difficult had the energy fluxes of the environment been too great relative to the frailty of the human organism.

One of these natural resources, the wind, was once a very important form of energy for mankind. It was utilized by windmills and sailing ships. But once man learned to make use of the concentrated energy stored in the fossil fuels, coal and oil, he found them far more economic, and their competition has almost eliminated all use of wind power.

But the demand for energy is increasing, doubling every twenty years, and no slowing of this pace now appears probable. On the other hand, while fossil fuels are available in great abundance today, and involve no short-term problem, their reserves are limited. It is reasonable already to prepare means to offset the slowing in the pace of petroleum discoveries that must set in some day. Atomic energy does appear to have every chance of filling the gap, but it is by no means impossible that other methods may excel it within certain limits and in certain fields.

There are many ways of drawing energy from these natural resources, and even if we confine ourselves to the three sources of energy that constitute the subject of this Conference, we can still enumerate a fairly large number of very different methods that

might be important sources of energy as soon as they become economic.

This multiplicity of possible roads is immensely reassuring for the future, but it confronts us with a difficult choice. Should our efforts be dispersed on all the possible roads, or should we now make our election and concentrate our efforts on the most promising lines?

There is the same problem in atomic energy, where a good half dozen patently different techniques are competing in the quest for an economically sound way of utilizing uranium fission.

From the viewpoint of the utilizers themselves, this embarrassing abundance of possible choices is promising. But everyone proceeding on a given research trend may be troubled, indeed, by the low probability that that particular trend will surpass all the competing trends and emerge into the wide plain of large-scale industrial development.

When we are still concerned with basic research — on photopiles, for instance — and not with genuinely applied research, we may answer that, even if this work leads to nothing in the field of energy, it still has a chance of being utilized in very different fields, and that progress in physics is always of value in itself, even if no economic uses immediately appear.

In the case of applied research, this argument would be very weak. But one must also bear in mind that while there are many possible ways of harnessing natural energy, there is not just one energy problem to be solved, but many such problems. Indeed, energy needs appear in a different light, depending on the order of magnitude of the power involved, and also depending on whether we are concerned with the general supply of energy or with special applications, such as space heating or water distillation.

The difference between the use value of energy for these varied needs is generally overestimated. Nevertheless, it may serve as a measuring rod if we mention that, alongside of the electric energy generating and distributing industry, which sells energy in relatively large blocks, there also exists a dry-battery industry which sells kilowatt-hours at a

price about a thousand times as high as that charged by the networks. Yet this dry-battery industry is an important business, with a turnover about a thirtieth that of the public power generating and distributing services, while the ratio between the amounts of energy sold by these two industries is about 1 to 30,000.

There is thus room for production both on the scale of the grids and on that of the dry batteries.

Abandoning generalities and taking the example of wind power, one may really ask oneself in spite of the very sharp decline in the use of the small plants that were once so numerous in the United States, whether there is a place for small machines to meet dispersed demand for power, in spite of the fact that the generating cost per kilowatt-hour is necessarily high, and in spite of the general need for output control arrangements.

On the other hand, one may also ask oneself whether there is room for hundred units to supplement the output of local diesel groups in the absence of an interconnected net. In considering this problem, we should not make the mistake of overestimating the cost of petroleum products in areas themselves poorly endowed, for such advances have been made in the technology of transporting them that their local price differentials over the world tend to be too small to make economically unsound methods locally competitive.

One might, finally, ask oneself whether there is a possible field for wind machines developed to the size that minimizes the unit cost of energy generation, which would be coupled to the grids to combine their output with that of the conventional thermal and hydro stations.

The situation would be favourable where these integrated plants include a rather large number of hydropower stations with small and medium reservoirs, which present the valuable feature that water may be economized in periods when the wind is supplying the energy, and drawn down to generate power, on the other hand, in calm periods. This is the case in France where, in addition, the wind power is particularly concentrated in the winter just when the flow of water is smallest. Although the latitude of France may be a little low, it is still perfectly satisfactory for harnessing wind power, which is well known to be more abundant in the temperate zone than in tropical or equatorial regions.

Can wind-driven generators become economic under such conditions? It is by no means certain. Thus one should not misappraise the task as being to develop a new method of feeding the electric networks, when it is really, instead, to design and build plants that will furnish a means of determining whether we should proceed further in this direction or give it up.

In the wind-power field, unfortunately, only a full-scale development, of unit power close to the economic optimum, which is probably somewhere

between 1,000 and 2,000 kilowatts, can definitely fix both the optimum power and the corresponding unit energy cost. This scale, it is true, poses no financial problems at all comparable to those of nuclear reactors, which can operate economically only in units delivering at least a hundred times as much power.

The Electricity Authority of France has designed and built its first such power plant, aimed at utmost simplicity. It has a three-blade propeller 30 metres in diameter, rotating in permanent synchronism with the network. Owing to the very fine blade profile and the high blade-tip speed, the output passes through a maximum of 900 kilowatts at a wind speed of 20 metres per second, and then declines again for stronger winds, owing to the loss of blade-profile speed, with no regulating mechanism whatever.

The power falls to zero at a wind speed of 6.5 metres per second, and becomes negative and equal to 70 kilowatts in the complete absence of wind unless the network alternator is decoupled. This alternator is a rear rotor which automatically turns into the wind without any orientating mechanism. Since the rotational speed is held absolutely constant by the network, there is less danger of accidental resonance, which is so dangerous for wind-driven generators.

As yet this plant has generated only some hundred thousand kilowatt-hours, but after some additions, this experiment will provide the requisite basis for studies as to whether a larger plant of the same type could operate competitively.

A more conventional plant, with variable-pitch blades and a rotor 35 metres in diameter, has been ordered so that this experiment can be completed.

This attempt may quite possibly lead to nothing, and we cannot prejudge the conclusions, but the financial outlay it required did appear justified by a certain probability of success. If it fails, it will at least have been of service to others by preventing them from repeating useless efforts. Moreover, it will not in any case fail to yield information on the wind and on rotors that may serve for other uses — or be reutilized later, if new technical or economic conditions modify the chances of competitive operation.

The interest of this Conference is precisely that of making all the countries profit by the experience of each. From this point of view, experiments with a negative conclusion are just as valuable as those that seem to offer serious promise.

Every experimental result is valuable, provided it is objective. The obstacle to be avoided is, of course, the underestimation of the degree of development required to reach the industrial scale, and the underestimation of the risk that the energy costs, once they are known, will prove to be too high.

There is no "destiny" that guarantees that a discovery in physics will emerge some day into the

domain of the economic; and hopes should not lightly be awakened if they might do particularly great harm to countries whose development demands rapid and certain methods of energy supply, and which should not be induced to enter paths which may perhaps be scientifically valid but whose pre-

mature utilization would partake of the nature of an adventure.

The interest of this Conference will be to help in distinguishing what may already have sufficiently ripened from what is merely the announcement of a hope for future fruition.

RÉFLEXIONS SUR LA VALEUR ÉCONOMIQUE DE L'ÉNERGIE D'ORIGINE GÉOTHERMIQUE, ÉOLIENNE ET SOLAIRE, EN PARTICULIER APRÈS TRANSFORMATION EN ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

Arnaldo M. Angelini, Professeur

Administrateur délégué

Terni (Société d'industrie électromécanique)

Rome

Une évaluation économique de l'énergie que l'on peut tirer des sources géothermique, éolienne et solaire est assez complexe à cause du grand nombre d'éléments dont on doit tenir compte et dont l'incidence dépend de circonstances multiples qui varient non seulement en fonction de l'emplacement des installations, mais bien aussi de l'évolution d'autres sources d'énergie.

Cette considération nous a conseillé de dresser un tableau où ces facteurs sont mentionnés et sommairement comparés entre eux. L'exposition qui suit constitue en quelque sorte un commentaire de ce tableau.

DISTRIBUTION SUPERFICIELLE

Pour que l'on puisse attribuer une valeur économique à une source d'énergie, il faut évidemment qu'elle soit accessible et que son transfert au lieu d'utilisation soit possible sans pertes ou coûts prohibitifs.

A ce point de vue les sources d'énergie géothermique de quelque importance actuellement connues, sont concentrées dans des territoires relativement restreints aux environs de Larderello en Toscane, dans les îles Eoliennes, en Islande et dans les montagnes Rocheuses.

Les experts géologues pourraient établir les probabilités de découverte d'autres sources dans les territoires où l'énergie peut être utilisée (sous forme de chaleur ou — après transformation en énergie secondaire — sous forme d'électricité).

La source géothermique est limitée en ce sens que, dans l'exploitation d'un gisement, la puissance ne peut dépasser certaines valeurs et que la quantité d'énergie que l'on peut obtenir de chaque forage est, elle aussi, limitée. Il y a en tout cas une grande incertitude initiale sur la production que peut donner une centrale géothermique au cours de son existence, et cela marque une différence substantielle au point de vue économique et financier entre cette source et une installation hydro-électrique dont la durée est illimitée.

Les énergies éolienne et solaire sont disponibles partout, très irrégulièrement dans le temps, mais en

quantité illimitée si l'on se rapporte à une période suffisamment longue. En effet la puissance peut être augmentée indéfiniment en multipliant le nombre d'installations pour l'exploitation de ces sources dans un certain territoire. Il va de soi que la même installation permet d'obtenir des quantités annuelles moyennes d'énergie différentes selon son emplacement : on peut dire avec plus de précision que la densité de distribution superficielle des énergies éolienne et solaire disponibles annuellement subissent de grandes variations en fonction de la latitude (en particulier pour l'énergie solaire), de l'altitude et de l'orographie du territoire considéré, etc. Évidemment il est convenable de placer les installations éoliennes et solaires dans les régions où la densité superficielle moyenne définie ci-dessus est maximum : le coût de l'installation rapporté aux kilowattheures de production annuelle moyenne sera alors minimum. En général, la distribution superficielle a une grande importance du point de vue économique étant donné que le prix de revient sera d'autant moindre que les centres d'utilisation sont plus proches des sources géothermiques et des zones où les énergies éolienne et solaire présentent les densités superficielles les plus élevées.

DISTRIBUTION DANS LE TEMPS

Il est évident que la valeur économique d'une source d'énergie, quelle que soit sa nature, sera d'autant plus grande que sa disponibilité dans le temps pourra être plus proche du niveau du besoin.

A ce point de vue l'énergie géothermique, étant caractérisée par une puissance constante, présente une valeur bien supérieure aux énergies éolienne et solaire.

Le besoin d'énergie n'est constant que dans certaines applications (notamment électrochimiques); si par ailleurs on considère les besoins en énergie dans leur ensemble, on constate qu'il existe toujours une « base » du diagramme qu'on peut compléter avec de l'énergie d'origine géothermique, mais certainement pas avec les énergies éolienne et solaire en raison des irrégularités mentionnées dans le tableau suivant.

Nous reviendrons plus loin à ce point à propos des possibilités d'intégration entre les formes différentes d'énergie.

RÉSERVES ÉNERGÉTIQUES DES SOURCES CONSIDÉRÉES

L'entreprise qui s'engage dans la construction d'une installation géothermique court un risque dont il n'est pas facile d'évaluer l'importance, en raison des incertitudes qui règnent en ce qui concerne les réserves de vapeur endogène ou de gaz chauds sur lesquelles on peut raisonnablement compter. Les progrès accomplis dans les évaluations géologiques sont certainement remarquables mais, dans le domaine géothermique, on est bien loin de l'approximation avec laquelle on peut évaluer les réserves contenues dans un gisement de gaz naturel. Cette remarque concerne naturellement les nouvelles découvertes et non pas celles qui sont exploitées depuis plusieurs années.

En ce qui concerne les sources éolienne et solaire, ce risque n'existe pas : en effet, à ce point de vue, elles sont comparables aux sources hydro-électriques au fil de l'eau dont la production annuelle est influencée dans une certaine mesure par les vicissitudes météorologiques, bien que leur durée, liée à la radiation solaire, soit illimitée.

Comme nous l'avons déjà dit, les réserves géothermiques sont relativement concentrées dans les limites de certains territoires.

POSSIBILITÉ D'UTILISATION SOUS FORME PRIMAIRE

Aux indications contenues dans le tableau, nous ajoutons que l'utilisation des sources géothermiques pour la production de chaleur ne pourrait présenter un grand intérêt que dans le cas où ces sources se trouveraient dans le voisinage immédiat de villes et de centres industriels en vue de l'utilisation directe de la chaleur, ce qui permettrait d'éviter les investissements qu'exigent les transformations de l'énergie primaire en énergie secondaire.

Malheureusement, les sources géothermiques actuellement exploitées sont placées à des distances telles des villes et des centres industriels que seule une utilisation marginale de la vapeur endogène pour la production de chaleur est possible.

On peut se demander si, sous l'aspect économique, il est possible d'envisager la localisation de certaines industries près des sources géothermiques en vue de l'utilisation directe de la chaleur.

Sans entrer dans ces détails, nous nous bornons à constater que la réponse est négative pour les sources en cours d'exploitation.

Quant aux sources éoliennes, l'application directe de l'énergie mécanique obtenue par le vent à la propulsion des navires, au moulage, et à l'extraction de l'eau sont bien connues et constituent presque les seules qui aient été réalisées jusqu'à présent. On sait bien d'ailleurs que c'est surtout la troisième de ces applications qui s'est étendue dans certaines régions

agricoles où elle a trouvé sa pleine justification économique.

POSSIBILITÉ D'ACCUMULATION ET DE TRANSPORT SOUS FORME PRIMAIRE

Dans les limites de ce rapport, nous n'avons pas de commentaires à ajouter aux indications contenues dans le tableau.

POSSIBILITÉS D'INTÉGRATION ENTRE SOURCES PRIMAIRES

L'intégration de la production de chaleur géothermique à celle que l'on obtient des combustibles conventionnels (ou même nucléaires) pourrait présenter un intérêt économique analogue à celui qui a suggéré la construction d'installations thermo-électriques nucléaires avec surchauffe au moyen de combustibles traditionnels.

En effet, dans le cas où la température et la pression de la vapeur fournie par les sources endogènes sont relativement basses, les rendements sont à leur tour relativement modestes; il s'ensuit que l'application de la surchauffe peut former l'objet de considérations au point de vue technique et surtout sous l'aspect économique. L'examen de ce problème qui est certainement intéressant nous conduirait bien au-delà des limites imposées à ce rapport; il est évident, d'ailleurs, qu'à ce point de vue chaque source endogène présente une physionomie propre et demande une étude tout à fait particulière qui tienne compte de l'emplacement, du coût des combustibles, de leur transport, etc.

Il va de soi que nous nous rapportons ici au cas où la source géothermique est utilisée pour la production d'énergie électrique.

Quant à l'énergie mécanique obtenue par les installations éoliennes, elle peut être intégrée à l'énergie mécanique dérivée d'autres sources qui, dans certains cas, constituent une réserve indispensable : c'est le cas de certaines installations pour l'extraction de l'eau du sous-sol.

Une considération analogue peut se faire en ce qui concerne l'intégration de l'énergie thermique obtenue par la source solaire, dans le cas où le besoin est continu ou, en tout cas, n'est pas compatible avec l'allure très discontinue de la production.

Dans les deux derniers cas, une considération économique s'impose : il faut associer à la source éolienne ou solaire une source de même puissance, capable de la remplacer complètement dans les périodes d'inactivité et partiellement dans les périodes d'insuffisance. Le coût de l'installation et, conséquemment, les frais annuels fixes sont de ce fait augmentés.

Une intégration de ce genre s'impose comme la seule solution possible dans le cas où il n'existe aucune autre source énergétique : l'énergie qui en résulte est très coûteuse, mais l'avantage dérivant de sa disponibilité a souvent une valeur bien supérieure.

POSSIBILITÉS DE TRANSFORMATION EN ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

Sous l'aspect économique, la transformation de l'énergie provenant de la source géothermique en énergie électrique présente des avantages qui sont bien connus et sur lesquels il n'est certainement pas nécessaire d'insister ici. Comme on le sait, l'utilisation la plus remarquable est celle de Larderello. L'énergie est produite avec puissance constante.

Si l'on se rapporte à l'expression binôme du coût de l'énergie électrique obtenue d'une source géothermique, on trouve que le terme proportionnel est très réduit, comparé à celui de l'énergie thermique provenant d'autres sources primaires (combustibles liquides et solides et combustibles nucléaires).

Il s'ensuit que dans la formation du diagramme de charge, seule l'énergie hydro-électrique a la priorité économique sur l'énergie géothermique.

L'énergie électrique que l'on peut produire par les installations éoliennes est caractérisée par une dis-

continuité très marquée, bien plus marquée que celle provenant des usines hydro-électriques au fil de l'eau. Il s'ensuit que sa valeur économique ne dépasse pas en tout cas le « coût proportionnel » de l'énergie thermique traditionnelle que l'on peut prendre comme terme de comparaison.

Ces remarques nous conduisent à la conclusion suivant laquelle l'énergie éolienne est compétitive avec l'énergie thermique, à la condition que le coût total du kilowattheure de la première soit moindre que le coût proportionnel de la deuxième.

L'énergie solaire peut elle aussi être transformée en énergie électrique à laquelle s'applique un raisonnement analogue, mais, tout au moins à l'état actuel, les puissances obtenues sont faibles et les coûts très élevés.

L'énergie électrique tirée de la radiation solaire est employée aujourd'hui, et le sera probablement pour plusieurs années encore, dans des applications tellement spéciales que le problème économique ne se pose même pas.

TABLEAU 1

Comparaison des facteurs économiques et pratiques d'énergies tirées de sources diverses

Caractères saillants	Énergie		
	Géothermique	Éolienne	Solaire
Distribution superficielle	Concentrée en certaines étendues limitées	Distribuée irrégulièrement sur la surface du globe	Distribution variable selon la latitude. Irrégularités dues aux conditions atmosphériques
Distribution dans le temps	L'extraction peut avoir lieu de façon continue, donc puissance constante. A l'état actuel des connaissances il est à exclure une exploitation économique à puissance variable	Tout à fait irrégulière : influence marquée des saisons et, en certaines zones, des heures du jour et de la nuit	Disponible seulement dans les heures claires, en mesure variable selon les saisons et dépendant, en tous cas, des conditions atmosphériques
Réserves des sources	dans l'espace { La réponse est aux géologues. Les forages permettent d'établir les limites dans lesquelles on peut exploiter les sources localisées de vapeur endogène	Très étendues; font exception certains territoires en raison de leur exposition particulière aux vents et au soleil	
	dans le temps { Il semble très difficile d'établir avec certitude la durée d'une source localisée de vapeur endogène. Il en dérive un risque pour l'exploitant	Pratiquement inépuisables si l'on se rapporte à la disponibilité annuelle moyenne	
Possibilités d'utilisation sous forme primaire	Chauffage domestique et industriel. L'emplacement des sources peut limiter, toutefois, ces utilisations	Propulsion des navires. Séchage industriel et domestique	Sous forme de chaleur, pour chauffage domestique et industriel et pour applications spéciales, surtout dans le domaine de la fusion des métaux et pour l'obtention de très hautes températures
Possibilités d'accumulation sous forme primaire	Très limitées, et en tous cas pour quantités bien modestes et délais très courts, par des accumulateurs de vapeur endogène	Aucune accumulation directe de l'énergie cinétique du vent n'est possible : celle-ci peut être accumulée — après transformation — sous forme potentielle, par exemple en soulevant dans les réservoirs l'eau des rivières, des lacs ou de la mer	On ne peut évidemment accumuler l'énergie radiante du soleil, mais plutôt l'énergie thermique correspondante, sous forme de chaleur, en vue de son emploi successif pour chauffage domestique ou industriel

	par d'autres sources, notamment charbon, fuel-oil et pétrole. Mais cette intégration ne présente d'intérêt que dans des cas spéciaux	exemple en soulevant dans les réservoirs l'eau des rivières, des lacs ou de la mer but d'en compenser la discontinuité dans le temps, soit encore pour obtenir un accroissement de la puissance disponible. A titre d'exemple on peut citer les voiliers disposant d'un moteur à combustion	pour chauffage domestique ou industriel la chaleur fournie par les combustibles traditionnels et cela dans le but de compenser la discontinuité dans le temps de la source solaire
Possibilités de transformation en énergie secondaire	Au moyen de groupes turbo-générateurs on obtient de l'énergie mécanique et électrique	Au moyen de moteurs éoliens on peut obtenir de l'énergie mécanique qui, à son tour, peut être transformée en énergie électrique	Solutions possibles : Transformation directe de l'énergie radiante en énergie électrique au moyen de cellules photo-électriques; Transformation de l'énergie thermique dérivée en énergie électrique, au moyen de couples thermo-électriques; Transformation thermodynamique de l'énergie thermique en énergie mécanique et de celle-ci en énergie électrique
Possibilités d'intégration de l'énergie électrique provenant d'une des sources considérées, soit avec celle fournie par les autres, soit avec celle produite par des sources différentes	Une intégration entre énergie électrique d'origine géothermique et celle d'origine éolienne et solaire ne peut être pratiquement obtenue que si l'on dispose d'un système de centrales hydro ou thermo-électriques desservant un réseau suffisamment vaste L'énergie électrique provenant des trois sources prises séparément ou simultanément peut être valorisée par la connexion avec un réseau alimenté par des installations hydro-électriques à réservoir, mieux encore si elles comportent des stations d'accumulations d'énergie par pompage	Il existe une certaine possibilité d'intégration entre l'énergie électrique obtenue des sources éolienne et solaire, en vue d'une atténuation de l'irrégularité du diagramme de production, qui peut s'améliorer bien sensiblement. L'énergie électrique provenant de ces sources combinées entre elles peut s'intégrer avec l'énergie électrique produite par un système hydro-thermo-électrique	

REFLECTIONS ON THE ECONOMIC VALUE OF GEOTHERMAL ENERGY, WIND POWER AND SOLAR ENERGY, ESPECIALLY AFTER CONVERSION TO ELECTRICAL ENERGY

(Translation of the foregoing paper)

Arnaldo M. Angelini, Professor

Deputy Director

Terni Industrial and Electrical Company
Rome

The economic value of the energy obtainable from geothermal, wind and solar sources is somewhat difficult to assess owing to the many factors involved; the operation of these factors depends upon a range of circumstances that vary with the siting of the plant concerned and with the development of other sources of energy.

This consideration has prompted us to prepare a table in which these factors are listed and briefly compared. The statement which follows is to some extent a commentary on the table.

SURFACE DISTRIBUTION

For a source of energy to possess economic value it must obviously be accessible, and the energy must be transportable to the place of utilization without prohibitive loss or cost.

From this standpoint, the known geothermal energy sources of some importance are concentrated in relatively small areas in the Larderello district of Tuscany, the Aeolian Islands, Iceland and the Rocky Mountains.

Geological experts would be able to determine the likelihood of further sources being discovered in areas where the energy can be put to use (as heat or — after conversion to secondary energy — as electricity).

A geothermal source is limited, in that there are limits to the capacity that can be developed by working a deposit and to the quantity of energy obtainable from each borehole. There is always great initial uncertainty regarding the potential lifetime output of a geothermal power plant and this fact sharply distinguishes such a source, for economic and financial purposes, from a hydro-electric installation, which lasts for an unlimited time.

Wind power and solar energy are available everywhere; the supply is very irregular over time but unlimited when considered over a sufficiently long period. Capacity can be increased indefinitely by installing more and more plants to work these

sources of energy in a given area. Needless to say, the mean annual yield of energy from a particular plant will vary with the site; to be more specific the density of surface distribution of the wind power and solar energy available each year varies widely with the latitude (especially in the case of solar energy), altitude and orography of the terrain and so on. Wind and solar power plants should obviously be sited at the point where the mean surface density, as defined above, is greatest, thus keeping to a minimum the installation cost per kWh of mean annual output. In general terms, surface distribution is of great economic significance, for the closer the centres of utilization lie to the geothermal sources and to the areas of greatest surface density of wind power and solar energy, the lower will be the cost of production.

DISTRIBUTION OVER TIME

It is obvious that, the more closely the flow of energy obtainable from a given source, of whatever nature, can be related to the rate of demand, the greater will be the economic value of that source.

From this standpoint geothermal energy, having the characteristic of constant capacity, is of far greater value than wind power or solar energy.

The demand for energy is constant only in some applications (e.g. electrochemical applications); but if energy requirements are considered as a whole, we find that the load diagram always has a "base" which can be covered by energy of geothermal origin but not, owing to the irregularities mentioned in the table below, by wind power or solar energy.

We shall return to this point later in considering the possibilities of integrating the different forms of energy.

THE ENERGY RESERVES OF THE SOURCES UNDER CONSIDERATION

An undertaking which embarks on the construction of a geothermal power plant runs a risk whose

magnitude cannot be readily determined owing to the prevailing uncertainty regarding the reserves of natural steam or hot gases that can be reasonably expected. Remarkable progress has undoubtedly been made in geological evaluation, but we are still a long way from being able to evaluate geothermal reserves with the accuracy possible in the case of a deposit of natural gas. This observation, of course, relates to newly discovered deposits, not to those which have already been in use for several years.

No such risk is incurred with sources of wind power and solar energy; these are comparable, from this standpoint, with run-of-river hydroelectric sources, whose annual output is to some extent influenced by meteorological events but whose duration, associated with solar radiation, is unlimited.

As already stated, geothermal reserves are, relatively, concentrated in certain areas.

POSSIBILITY OF UTILIZATION IN PRIMARY FORM

To the information given in the table we would add that geothermal sources cannot be of great interest for the production of heat unless they occur close enough to a town or industrial centre for the heat to be tapped directly, thus saving the capital cost involved in converting primary to secondary energy.

Unfortunately the geothermal sources now in use are so remote from any town or industrial centre that only marginal use of natural steam for heat production is possible.

A question that may be considered is the economic feasibility of siting industries near geothermal sources in order to put the heat to direct use.

Without going into detail on the subject, we will merely say that the answer is in the negative so far as the sources in current use are concerned.

With regard to wind-power sources, the direct applications of the mechanical energy of the wind to ship propulsion, milling and water-pumping are well known and are almost the only applications realized so far. It is also well known that the third of these applications is the most wide-spread in some agricultural areas, where it has proved its economic worth.

POSSIBILITY OF STORAGE AND TRANSPORT IN PRIMARY FORM

Within the limits of this paper we have nothing to add to the information given in the table.

POSSIBILITIES FOR THE INTEGRATION OF VARIOUS PRIMARY SOURCES

The integration of geothermal heat production with heat production by means of conventional (or even nuclear) fuels might prove to possess economic interest of the same order as that which has prompted

the construction of nuclear thermoelectric power stations with superheating by traditional fuels.

Where natural steam occurs at relatively low temperature and pressure, the yield is also relatively small; consideration may therefore be given, from the technical and, more particularly, the economic standpoint, to the possibilities of superheating. The investigation of this admittedly interesting problem would take us far beyond the bounds which must be observed in this paper; moreover, it is obvious that from this standpoint every geothermal source has its own characteristics and must be studied individually with regard to location, fuel cost, fuel transport cost, etc.

What we have in mind here is, of course, the use of a geothermal source for the production of electric power.

The mechanical energy obtained from wind-power sources may be integrated with mechanical energy derived from other sources, which in some cases represent an essential reserve; this applies, for example, in some groundwater pumping installations.

The same comment applies to the integration of thermal energy of solar origin where demand is continuous or, at any rate, not adjustable to the extremely intermittent nature of the power supply.

In the latter two cases an economic consideration arises: a source of wind-power or solar energy must be associated with a source of equal capacity which can replace it completely when it is inactive and which can supplement it when its output is inadequate. This increases the installation cost and consequently the fixed annual costs.

Where no other source of energy exists, integration of this type is the only solution. The energy produced is very expensive, but this factor is often outweighed by the advantage of having the energy available.

POSSIBILITY OF CONVERSION TO ELECTRICAL ENERGY

The conversion of geothermal to electrical energy presents economic advantages which are well known and which need not be stressed here. As we know, the most noteworthy practical application of this principle is at the Larderello plant, which produces energy at constant capacity.

If the cost of electrical energy derived from a geothermal source is expressed as a binomial, the proportional term is found to be very small compared with that for thermal energy derived from other primary sources (liquid, solid and nuclear fuels).

Hence only hydroelectric power can be accorded a higher economic priority than geothermal energy when the load diagram is prepared.

The electrical energy which can be produced in wind-power plants is extremely intermittent — much more so than the energy produced in run-of-river hydroelectric plants. Hence its economic value does not, in any case, exceed the “proportional cost” of conventional thermal energy, which may be used as a standard of comparison.

We may conclude from the foregoing that wind power is competitive with thermal energy provided that the total cost per kWh of the former is less than the proportional cost of the latter.

Solar energy, too, can be converted into electrical energy, to which the same reasoning applies; however,

at present at any rate, the capacities developed are small and the costs very high.

The applications of electrical energy derived from solar radiation are today, and will probably remain for some years to come, so specialized that the problem of economics does not even arise.

TABLE I

A comparison of economic and practical factors relating to energy derived from various sources

<i>Salient characteristics</i>	<i>Geothermal energy</i>	<i>Wind power</i>	<i>Solar energy</i>
Surface distribution	Concentrated in certain limited areas	Irregularly distributed over the earth's surface	Distribution variable with latitude. Irregularities due to atmospheric conditions
Distribution over time	Extraction possible at constant rate : hence, constant capacity. In present state of knowledge, cannot be worked economically with variable capacity	Wholly irregular; marked seasonal effect and, in some regions, great variation with hour of day and night	Available only during daylight hours, in a degree which varies with the season and which always depends upon atmospheric conditions
Reserves of sources	In space { For the geologists to determine. The extent to which localized sources of natural steam can be worked may be established by boring	Very extensive; some areas are exceptional owing to their particular exposure to wind and sun	
	In time { It appears very difficult to establish with certainty the life expectancy of a localized source of natural steam. This represents a risk to the user	Virtually inexhaustible in terms of mean annual supply	
Possibilities of utilization in primary form	Domestic and industrial heating. However, these uses may be limited by location of sources	Ship propulsion. Industrial and domestic drying	In the form of heat, in domestic and industrial heating; in special applications, mainly relating to fusion of metals, and to obtain very high temperatures
Possibilities of storage in primary form	Very limited possibilities of using natural-steam accumulators to hold very small quantities for very short periods	The kinetic energy of the wind cannot be stored directly; it can be stored, after conversion, in the form of potential energy—e.g., by raising the level of river, lake or sea water in reservoirs	The radiant energy of the sun obviously cannot be stored, but the corresponding thermal energy can be stored as heat for subsequent use in domestic or industrial heating
Possibilities of transport in primary form	As applied to natural steam, very limited	Virtually non-existent. Needless to say, the energy is transportable in secondary form	
Possibilities for integration with other primary sources	Heat derived from natural steam can be integrated with heat derived from other sources such as coal, light fuel oil and petroleum. Such integration, however, is worth while only in special cases	Wind power can be integrated with other sources of energy either in order to overcome its intermittent nature or to increase the capacity available. Auxiliary-engined sailing vessels are an example	Heat produced from solar radiation can be integrated with heat obtained from conventional fuels in order to overcome the intermittent nature of the solar source

TABLE 1 (continued)

<i>Salient characteristics</i>	<i>Geothermal energy</i>	<i>Wind power</i>	<i>Solar energy</i>
Possibilities for conversion to secondary energy	Mechanical and electrical energy are obtained by the use of turbogenerator sets	Wind engines can be used to produce mechanical energy which, in its turn, is convertible into electrical energy	Possible processes : Direct conversion of radiant into electrical energy by means of photo-electric cells; Conversion of derived thermal energy into electrical energy by means of thermo-couples; Thermodynamic conversion of thermal energy into mechanical energy and of mechanical energy into electrical energy
Possibilities for integrating electrical energy derived from one of the sources under consideration with that derived from the others or with that obtained from different sources	It is not feasible to integrate electrical energy of geothermal origin with that of wind and solar origin in the absence of a system of hydroelectric or thermoelectric power, stations serving a fairly extensive network	It is to some extent feasible to integrate electrical energy derived from wind and solar sources in order to reduce irregularity in the production diagram, which can be improved considerably. The electrical energy derived from a combination of these sources can be integrated with the electrical energy produced by a hydro-thermoelectric system	
	Electrical energy derived from all three sources, separately or in combination, can be put to use by linking with a network fed by reservoir equipped hydroelectric power stations, especially where these possess facilities for the storage of energy by pumping		

ENERGY AS A FACTOR IN THE PROGRESS OF UNDER-DEVELOPED COUNTRIES

Sir Harold Hartley

Honorary Chairman, International Executive Council
World Power Conference
London

THE FUNCTIONS OF ENERGY

It is significant that the earliest civilization developed in the river valleys of Mesopotamia and Egypt where the semi-tropical climate made living conditions relatively easy and water was available. Civilization only reached the northern latitudes after progress had been made in clothing, housing and amenities to counter the demands made on the energy of the individuals by the more rigorous climate, as Markham pointed out in his interesting study *Climate and the Energy of Nations*.¹ Man's material progress has depended largely on his successive inventions of tools, machines and processes and his increasing use of energy with wind and water power to supplement human and animal labour. But progress was slow until the steam engine provided the ubiquitous source of power which gave the great impetus to the industrial revolution in the West and provided rapid transport by land and sea. This was followed a century later by what I have called the domestic revolution, the full use of energy in the home to provide light, heat and power which has done so much to lighten the burden of the housewife and to raise the standard of health and comfort. It may be regarded as the repayment by the technologist of a debt long overdue for some of the social evils of the industrial revolution.

The impact of these two revolutions was felt mainly in the West as the rate of advancement of countries differed greatly for various reasons, and today we are faced with the grave disparities in their standards of living which, as table 1 and figure 1 show, are clearly connected with the average consumption of energy by individuals. Table 1 gives the per capita incomes and energy consumption from commercial sources (coal, oil, gas and hydro) in 1958 and also the per capita consumptions of non-commercial fuels (wood, bagasse, dung, among others) which was estimated last in 1952. Both kinds of energy are included in figure 1 so as to give a fair comparison between countries (see table 1 and figure 1).

The relation between standards of living and energy consumption is not simple as many factors

are involved — climate, indigenous resources (particularly of energy), types of industry, education and technical skills—and both cause and effect are mutually operating. However, there can be no doubt that the availability of energy is one of the major factors in the advance of material progress. The output of human labour in both industry and agriculture is related closely to the horse power available for each individual, and this in turn is related to the capital investment. Looking at the disparities of income and energy consumption disclosed in figure 1 and the table it is clear that closing the gap between the advanced and less developed countries is no easy task. It must take time and patience. Increasing the availability of energy must be a primary objective in any planning, thus emphasizing the importance of this Conference.

The ultimate limiting factor in the development of most countries is capital investment and in most

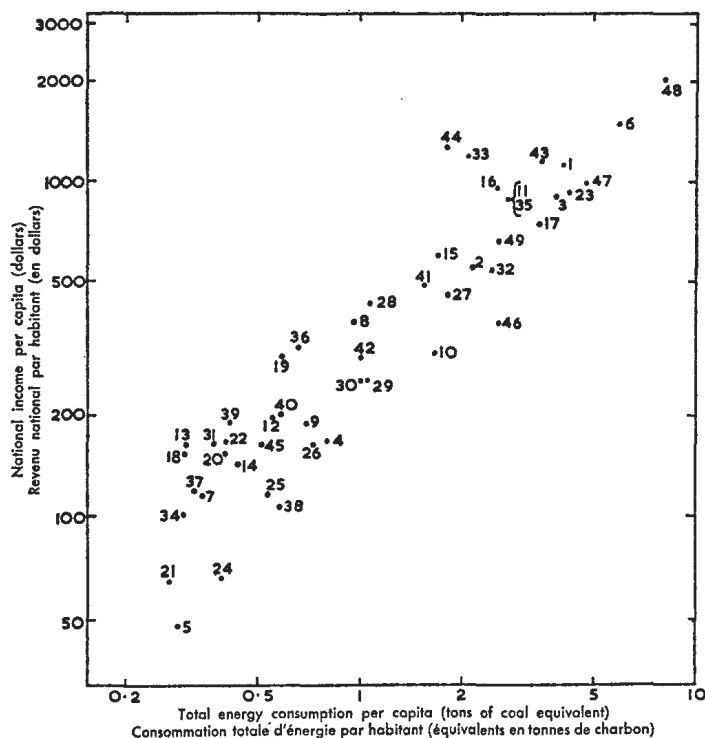


Figure 1

Per capita income and fuel consumption, 1958

Revenu national et consommation d'énergie par personne en 1958

¹ S. F. Markham, *Climate and the Energy of Nations* (Oxford University Press, 1944).

Table 1

Energy consumption and national income 1958, selected countries

	Per capita national income (dollars)	Per capita consumption of commercial energy (tons of coal equivalent)	Estimates of per capita consumption of non- commercial sources of energy (tons of coal equivalent)	Total energy consumption
1. Australia	1,122	3.63	0.43	4.06
2. Austria	558	1.96	0.20	2.16
3. Belgium and Luxembourg	896	3.77	0.02	3.79
4. Brazil	169	0.33	0.50	0.83
5. Burma	46	0.04	0.25	0.29
6. Canada	1,500	5.29	0.70	5.99
7. Ceylon	116	0.09	0.25	0.34
8. Chile	381	0.76	0.22	0.98
9. Colombia	190	0.45	0.25	0.70
10. Cuba	331	0.73	0.92	1.65
11. Denmark	887	2.51	0.25	2.76
12. Dominican Republic	197	0.16	0.40	0.56
13. Ecuador	164	0.16	0.20	0.36
14. Egypt	134	0.24	0.20	0.44
15. Finland	596	1.30	0.40	1.70
16. France	946	2.41	0.15	2.56
17. Germany (Federal Republic)	771	3.32	0.13	3.45
18. Ghana	152	0.09	0.23	0.32
19. Greece	298	0.38	0.20	0.58
20. Guatemala	153	0.15	0.25	0.40
21. Haiti	64 ^a	0.04	0.23	0.27
22. Honduras	166	0.15	0.25	0.40
23. Iceland	917	3.49	0.70	4.19
24. India	66	0.14	0.25	0.39
25. Iran	116	0.30	0.23	0.53
26. Iraq	146	0.36	0.22	0.58
27. Ireland	459	1.13	0.70	1.83
28. Italy	431	0.90	0.17	1.07
29. Japan	255	0.87	0.17	1.04
30. Mexico	252	0.81	0.20	1.01
31. Morocco	164	0.14	0.23	0.37
32. Netherlands	545	2.43	0.06	2.49
33. New Zealand	1,181	1.92	0.25	2.17
34. Nigeria	101	0.04	0.25	0.29
35. Norway	888	2.40	0.40	2.80
36. Panama	320	0.46	0.20	0.66
37. Paraguay	120	0.07	0.25	0.32
38. Peru	108	0.33	0.25	0.58
39. Philippines	192	0.15	0.26	0.41
40. Portugal	201	0.34	0.25	0.59
41. Puerto Rico	495	0.93	0.65	1.58
42. Spain	300	0.84	0.17	1.01
43. Sweden	1,158	2.95	0.56	3.51
44. Switzerland	1,267	1.67	0.15	1.82
45. Turkey	164	0.27	0.25	0.52
46. South Africa	377	2.56	0.04	2.60
47. United Kingdom	983	4.73	0.02	4.75
48. United States	2,095	7.65	0.40	8.05
49. Venezuela	655	2.46	0.20	2.66

SOURCE : Statistical Office of the United Nations. The estimates are based on those of previous years and assume no change in per capita consumption of non-commercial energy since 1952.

^a 1956.

of the less developed countries with their crowded populations the objective at each stage must be to give the optimum relation between the machine and man in the light of local conditions and employment. What at each stage is the happiest relation of the man and the machine? Transport with its speed and economy and its psychological material effects should probably have the first call on energy even in primitive countries. Energy must be used in the ways in which it can best supplement manpower in development by the concentrated power of machines, having always in view the creation of economic employment.

THE INFLUENCE OF SOCIAL-ECONOMIC CONDITIONS ON DEVELOPMENT

It is a noteworthy fact that the bulk of the population of the world with a low standard of living arising from their backward stage of development will be found in the tropics and semi-tropical regions. This is curiously reminiscent of Markham's theory of the influence of climate on human activity outlined in his book mentioned above. Is it that the more strenuous conditions of life in higher latitudes has stimulated greater human effort? Can it be that the lower crop yield in the more backward countries, associated with their poverty, is due in part to the lack of trace elements in their soils that have suffered so much from leaching, as Gourou pointed out in *The Tropical World*.² If so, this is a defect that could be remedied with our present knowledge at a trifling cost. Whatever the causes of the present conditions the introduction of modern preventive medicine and hygiene has led to rapid increases in population in these areas that have accentuated the difficulties that are facing their advancement.

Only a small proportion of the population in these countries is engaged in industry of a modern type and while much effort is being devoted to industrial development, the rate at which this can progress is limited by the heavy capital requirements and the need of experienced technologists and of technical training. There are, too, the limits imposed by the lack of indigenous resources of raw materials. The location of ore deposits and the availability of energy are likely to restrict the economic growth of heavy industry to certain regions. In India, for example, there are a few areas in which modern industry is mainly concentrated, but the bulk of the population is scattered in half a million small towns and villages engaged in farming which provides the food of the nation and also much of the raw materials for industry. Taking the world as a whole roughly one third of industrial raw materials are produced by agriculture and forestry. In most tropical and sub-tropical countries products like cotton, rubber, sugar, jute, sisal and timber are an essential factor in their viability. They have too the advantage that given energy they can be pro-

cessed in the areas where they are produced, providing employment and opportunities for betterment. Thus the claims of agriculture in development expenditure should rank high, since the major problem facing most of these countries is to raise agricultural production and the standard of living of their many millions of small cultivators. This is clearly recognized in the third five-year plan of India and the second five-year plan of Pakistan. In the Indian plan one quarter of the capital investment will go to agriculture, irrigation, community development and to village and small industries, while in addition much of the benefit of the fifty per cent of the capital budget devoted to transport, power and social services will accrue to the rural population. The plan outlines very clearly the objective of community development by improved farming practices, irrigation, co-operative action, elementary education and village industry. In all these energy must play its part.

In the second Pakistan plan the percentage expenditure on agriculture has also been increased and the total amount to be expended will be stepped up to two and a half times the present rate by 1965, in order to expand food production to meet the country's needs. Stress is laid on fertilizers, improved seed, protection of crops and on village aid to encourage co-operative action. However, the plan also faces realistically the need to find employment for the rapidly increasing numbers in industrial developments and the challenge that this presents in the future.

Both five-year plans deal also with the development of industry based on indigenous resources either of minerals or of agricultural products which can be processed economically near where they are grown. The availability of energy is a primary factor. One of the main objectives is to produce the goods needed for development and for home consumption, which otherwise must be imported and thus to strengthen the balance of payments. Fertilizers, machinery, and production goods obviously claim priority. In all such phases of development two of the main objectives at each stage must be to secure the right balance between agriculture and industry and the optimum relation of the man to the machine.

ENERGY IN RURAL DEVELOPMENT

The area of fertile land is limited in many of the crowded, less developed countries; hence their main objective should be to raise the productivity of each acre and towards this energy can help in so many ways.

Water is the most important limiting factor in plant growth, particularly in the tropics with the high rate of transpiration and evaporation where the water duty of a crop may be as high as 8,000 tons of water to raise one ton of wheat. Irrigation is therefore a primary need to make the crop independent of the vicissitudes of weather and to secure two or three crops in the year in order to gain the

² P. Gourou, *The Tropical World* (London, Longmans, Green & Co., 1953).

benefit of the rapid plant growth under these conditions. Credit is one of the major problems for the small farmer with only one crop a year, and multiple cropping would make his life much easier.

Drainage is an essential concomitant of irrigation to obviate the dangers of salinity and water logging which threaten irrigated crops. It rarely happens that nature is so kind as to provide all the facilities for irrigation and drainage at levels which require no pumps. This is specially true in areas with only a small incline like the Nile delta and the Punjab. The cultivation of the Nile delta is only made possible by the deep drainage ditches from which the brackish water is ultimately lifted by pumps into the Mediterranean. The waterlogged and saline land in the Rechna Doab of the Punjab is now being reclaimed by deep tube wells to lower the water table and provide additional water for irrigation. All these modern irrigation schemes are dependent on power supplied by Diesel engines or electricity. Most modern dams provide both the storage of irrigation water and a generating station to provide power, an ideal combination when conditions are favourable. Thus the newly opened works at Warsak on the Kabul River, provided under the Colombo plan by Canada and Pakistan, will provide a hydroelectric capacity of 160,000 kilowatts of electricity and irrigate 125,000 acres of hitherto uncultivated land. Where the opportunities are less favourable for larger projects, Diesel engines are the alternative, and the historic Persian wheel driven by animal power to raise irrigation water is still a frequent incident in the Middle East and Asia.

For the clearing of land and for heavy ploughing the bulldozer and the Diesel tractor offer great advantages over hand or animal labour, but their use with smallholdings implies some co-operative system. The advent of power to the village may well help in this direction as it marks the beginning of a new life, whether it is provided locally by Diesel engines in the first instance or by a distribution network for a generating station. It opens up so many new possibilities. Light in the homes is probably the greatest civilizing agency, and power for the workshops, for the threshing machines and ginneries and for village industries diversifies employment, provides new outlets and raises the prestige of village life. It is the village on which the economic future of many countries is mainly dependent.

The spraying of crops and the distribution of fertilizer and trace elements by aircraft is rapidly gaining ground and in the same sphere the protection of crops from locust swarms by air defence is eliminating one of the greatest dangers to farmers in Eastern lands.

Improved communications are again an important factor in raising the standard of rural life. The speed and economy of motor transport can help in many ways. With its aid food crops can be collected and stored and industrial crops delivered to the factories where they are processed near the place of production.

One of the most successful co-operative farming enterprises in this century, possibly the most successful of all, has been the development of cotton growing in the Gezira in the Sudan, described so well by Arthur Gaitskell in his recent book *Gezira, a Story of Development in the Sudan*.³ This raises an interesting and pertinent issue. To what extent is some measure of direction or compulsion a necessary condition in such a development? Certainly success in the Gezira depended on a common scheme of action by the farmers imposed by regulations in the conditions attached to their holdings. This was comparatively easy when new land was brought under cultivation by irrigation from the Sennar Dam. It would be much more difficult to impose successfully on older holdings unless it could be secured by mutual consent in recognition of the community of interest. Nevertheless some measure of regulation may be essential for the common good.

THE ROLE OF ENERGY IN INDUSTRIAL DEVELOPMENT

Daniel and Robinson examined very fully the relationships between energy consumption and industrial development in a paper presented at the eleventh sectional meeting of the World Power Conference at Belgrade in 1957.⁴ Investment in energy is a necessary prelude to development in which Government planning is closely concerned as the energy industries are basic services usually operated as a monopoly and involving heavy capital investment. On an average an increase of industrial production of one per cent involves an increase of two-thirds per cent of energy consumption in the form of heat and power. This proportion varies, of course, in different industries. The following table of statistics for British industry quoted from the abovementioned paper illustrates this point and shows the close relationship between the capital employed per worker and the consumption of energy since capital investment is spent mainly on plant and machines and their operation is dependent on supplies of heat and power.

Daniel and Robinson point out also that the capital and fuel intensive industries tend to be those that make many demands on water supply and transport and, they might have added, on technological and technical skills.

The trend of technology in the West, where labour is scarce and expensive relative to capital, has been towards the substitution of capital for labour, doing by machines what was previously done by hand. This, with certain exceptions, is inappropriate in the less developed countries with their superabundance of labour and shortage of capital, where less complex and smaller plants using more

³ Arthur Gaitskell, *Gezira, a Story of Development in the Sudan* (London, Faber and Faber, 1959).

⁴ G. H. Daniel and E. A. G. Robinson, "Planning of investment in fuel and power in under-developed countries", *World Power Conference, Sectional Meeting, Beograd, 1958, Transactions, Vol. 2*, p. 221.

Table 2

Industry ranged according to capital per occupied person	Capital per occupied person in 1936	Annual consumption of fuel and electricity per occupied person
Metal extraction and refining	2,244	80
Chemicals	2,084	77
Paper, etc.	1,871	74
Light metals and electrical products . .	1,130	17
Food, drink and tobacco	1,118	23
Semi-manufactured metals and engineer- ing	976	18
Leather, fur and rubber	942	17
Building materials	928	21
Textiles	813	20
Furniture, pottery, glass, miscellaneous .	730	22
Clothing and bedding	361	4
TOTAL, manufacturing	1,107	30

labour with economies in capital are often the right solutions. The contrast between the construction of the dams in the Snowy Mountains in Australia and those at Warsak on the Kabul River in Pakistan comes to my mind. In the former machines of every kind were used to the maximum, while at Warsak thousands of men were doing the same task. This saved the capital cost of imported machinery and many of the men were learning new technical skills. On the other hand there are complex technological processes which would not admit such a substitution of human labour for the machine.

The availability of indigenous raw materials and energy will probably dictate the initial fields of enterprise and will largely determine the location of industry in order to save the cost of transport of heavy materials.

Daniel and Robinson emphasize that, except for water, fuel accounts for the biggest tonnage of materials used by industry and that the cost of transport of solid fuel by rail is high. They give a figure of £5 per 1,000 miles (1,600 kilometres).⁵ Energy in the form of oil or natural gas can be moved in pipelines far more cheaply. They quote for oil a comparative figure of £1 per 1,000 miles, the cost depending on the annual throughput and load factor. The low cost of transmitting energy in the form of oil or gas is helping materially the industrial development of countries fortunate in possessing such indigenous resources. The cost of transmitting energy in bulk as electricity by high voltage lines is less than the equivalent cost of coal by rail, except for short distances or a low load factor, but it is more costly than oil or gas and is limited to a few hundred miles. On the other hand, electricity is the ideal agent for the local distribution of energy in a form that can be put to so many uses. Many recent development schemes

are based on hydroelectric power where conditions are favourable in spite of the heavy investment involved. A multipurpose dam offers the advantages of irrigation water, flood control and sometimes navigational facilities, in addition to power.

Pipelines are certain to play an increasing part in energy distribution in the future. One of the latest developments is the transport of coal in a hydraulic pipeline in Ohio which conveys 1 1/4 million tons of coal a year from the coal field to a power station 105 miles away and shows a considerable economy over rail haulage. In the near future pipelines are likely to be carrying natural gas long distances under water.

Where useful energy can be obtained from sunshine or wind-power it has the advantage that usually no distribution costs are involved.

The provision of energy must play an important part in any plans for industrial development viewed in conjunction with the location of raw materials, the availability of transport (also dependent on energy), and the existence of reliable supplies of water. Two hundred tons of water are needed to make a ton of steel, 20 tons to refine a ton of oil and 200 tons to make a ton of viscose yarn. In the early stages of development, it may well be advisable to use less highly developed plants of smaller size in which human labour plays a larger part and here solar and wind energy may both play a useful part in the future. Also it may be preferable to generate electricity by Diesel engines for local use before going over to an integrated power network. The rate of capital investment will be a determining factor. In the initial stages concentration on textiles, food products, agriculture and lumbering will call for much smaller investment in energy than would be needed to develop heavy industries. But here again the availability of raw materials may be decisive. The world is hungry for metals and foreign capital is usually available for the development of mineral resources.

THE FUTURE CONTRIBUTIONS OF THE NEW SOURCES OF ENERGY

The report prepared by the Secretariat of the United Nations with the assistance of a group of specialists and issued under the title of *New Sources of Energy and Economic Development* in 1957 contains an excellent summary of the development and prospects of the new sources at that time and provides the necessary background for the Conference.⁶

One of the three new sources to be discussed, geothermic energy, differs fundamentally from the other two, solar and wind energy, as it is available only in limited areas mainly near to centres of volcanic activity and is not widely distributed. On the other hand, where it is available it provides a steady source of energy in the form of hot water

⁵ Five pounds sterling equal approximately 14 United States dollars; 1,000 miles equal approximately 1,600 kilometres.

⁶ United Nations publication, Sales No. : 57.II.B.1.

and/or steam which can be used under favourable conditions to generate electricity and also in industry and for domestic heating. It is only recently that the potentialities of this source of energy have been exploited and development is now in progress in a number of countries. Conditions vary greatly from place to place and with the depth of the boreholes. Trials are always needed to determine the economic value of this source of energy in each locality. At some points only hot water is obtained while at others dry or wet steam at pressures up to 250 lb per square inch provides both a cheap source of power and of steam. At some places the water and steam contain chemicals such as boric acid and ammonia which can be recovered profitably thus diminishing the cost of power. The Conference will provide an opportunity for the comparison of recent developments in this field in different localities showing the technical problems involved and its potentialities for the future.

Solar energy

The sun, directly or indirectly, is the ultimate source of nearly all our energy and the continuity of life on this planet is entirely dependent on solar energy. It determines our climate, rainfall, the growth of vegetation and much besides. However, when we try to harness it to more menial tasks it suffers both from its low intensity, which involves a large collecting area, its intermittent character, and its seasonal variations. Progress has been slow in its utilization, although our comfort is so largely dependent on it. Most of the under-developed countries are in the tropics where seasonal variations

are smaller and the incidence of sunshine more reliable than in higher latitudes, so conditions are relatively favourable for its utilization to add to their present meagre supplies of energy. If their use of dried dung as fuel could be avoided it would be an immense gain. The use of solar energy for cooking, for heating water, for the distillation of salt water and for evaporation of solutions are all proved possibilities and the Conference will show what progress has been made, what are the technical problems still awaiting solution, and what new uses have been found.

Wind energy

Wind power is one of man's oldest auxiliaries and it is still in active use in countries where wind conditions are favourable. Its main use now is probably for pumping water with the advantage that a water tank can provide storage. If necessary a Diesel engine can take over when the wind drops. The windmill as a direct source of mechanical power has been largely superseded by other forms of prime mover and the main line of development in recent years has been the generation of electricity. This suffers from the uncertain and intermittent supply except in favourable localities and from the high cost of the storage of electricity. In several countries wind-driven generators are being used experimentally to feed into the grid system and thus save fuel. This is the most advantageous condition as it saves storage. Here again the Conference will bring together accounts of the latest technical developments and of the uses for which wind power has been found most serviceable.

L'ÉNERGIE, GAGE DE PROGRÈS POUR LES PAYS SOUS-DÉVELOPPÉS

(Traduction du mémoire précédent)

Sir Harold Hartley

Président honoraire du Conseil exécutif international

Conférence mondiale de l'énergie

Londres

LES FONCTIONS DE L'ÉNERGIE

Il est intéressant de noter que les civilisations les plus anciennes que nous connaissions se sont développées dans les vallées fluviales de la Mésopotamie et de l'Égypte, où la vie était relativement facile grâce au climat semi-tropical et où on avait accès à l'eau nécessaire. La civilisation n'a atteint des latitudes plus septentrionales qu'une fois que des progrès eurent été réalisés dans les domaines de l'habillement, du logement et des divers services qui rendent la vie plus agréable, pour compenser les exigences auxquelles l'énergie humaine était soumise par un climat plus rigoureux, ainsi que Markham le soulignait dans son intéressante étude intitulée : « Le climat et l'énergie des nations »¹. Le progrès matériel de l'homme a été déterminé dans une large mesure par ses successives inventions d'outils, de machines et de techniques, ainsi que par une consommation croissante d'énergie, faisant appel à celle du vent et de l'eau pour renforcer la main-d'œuvre humaine et animale. Néanmoins les progrès furent lents jusqu'au jour où le moteur à vapeur vint constituer la source universelle de force motrice qui donna son grand élan à la révolution industrielle dans l'Occident et fournit des moyens de transport rapides par terre et par mer. Ceci fut suivi, un siècle plus tard, par ce que j'ai appelé la « Révolution

ménagère » c'est-à-dire la pleine mise en œuvre de l'énergie pour fournir lumière, chaleur et force motrice à la maison, ce qui contribua beaucoup à alléger le fardeau de la ménagère et à améliorer les conditions d'hygiène et de confort. On peut considérer que ceci constitue de la part du technologiste le remboursement d'une dette constituée par certains des maux sociaux créés par la révolution industrielle et dont l'échéance est dépassée de longue date.

C'est dans l'Occident que les répercussions de ces deux révolutions ont été les plus sensibles, car le régime du progrès, dans divers pays, présentait des différences importantes pour diverses raisons, si bien que nous nous trouvons aujourd'hui en face de graves disparités dans les niveaux de vie qui, ainsi que le tableau 1 et la figure 1² l'indiquent, ont des liens indiscutables avec la consommation individuelle moyenne d'énergie. Le tableau 1 donne les revenus individuels et la consommation d'énergie fournie par les sources commerciales (charbon, pétrole, gaz, force hydro-électrique) en 1958, ainsi que la consommation individuelle de combustibles non commerciaux (bois, bagasse, fiente, etc.) pour laquelle les dernières évaluations remontent à 1952. Ces deux catégories d'énergie sont groupées à la figure 1 pour établir une comparaison claire entre les pays.

¹ S. F. Markham, *Climate and the Energy of Nations* (Oxford University Press, 1944).

² Voir le texte anglais, p. 45.

Tableau 1

Consommation d'énergie et revenu national en 1958 dans certains pays

	Revenu national par personne (dollars)	Consommation d'énergie commerciale par personne en équivalents de tonnes de charbon	Évaluation de la consumma- tion individuelle d'énergie des sources non commerciales en équivalents de tonnes de charbon	Consom- mation totale d'énergie
1. Australie	1 122	3,63	0,43	4,06
2. Autriche	558	1,96	0,20	2,16
3. Belgique et Luxembourg	896	3,77	0,02	3,79
4. Brésil	169	0,33	0,50	0,83
5. Birmanie	46	0,04	0,25	0,29

Tableau 1 (suite)

	Revenu national par tête	Consommation d'énergie commerciale par tête en équivalents de tonnes de charbon	Évaluation de la consomma- tion individuelle d'énergie des sources non commerciales en équivalents de tonnes de charbon	Consomma- tion totale d'énergie
6. Canada	1 500	5,29	0,70	5,99
7. Ceylan	116	0,09	0,25	0,34
8. Chili	381	0,76	0,22	0,98
9. Colombie	190	0,45	0,25	0,70
10. Cuba	331	0,73	0,92	1,65
11. Danemark	887	2,51	0,25	2,76
12. République Dominicaine	197	0,16	0,40	0,56
13. Équateur	164	0,16	0,20	0,36
14. Égypte	134	0,24	0,20	0,44
15. Finlande	596	1,30	0,40	1,70
16. France	946	2,41	0,15	2,56
17. Allemagne (République fédérale)	771	3,32	0,13	3,45
18. Ghana	152	0,09	0,23	0,32
19. Grèce	298	0,38	0,20	0,58
20. Guatemala	153	0,15	0,25	0,40
21. Haïti	64 ^a	0,04	0,23	0,27
22. Honduras	166	0,15	0,25	0,40
23. Islande	917	3,49	0,70	4,19
24. Inde	66	0,14	0,25	0,39
25. Iran	116	0,30	0,23	0,53
26. Irak	146	0,36	0,22	0,58
27. Irlande	459	1,13	0,70	1,83
28. Italie	431	0,90	0,17	1,07
29. Japon	255	0,87	0,17	1,04
30. Mexique	252	0,81	0,20	1,01
31. Maroc	164	0,14	0,23	0,37
32. Pays-Bas	545	2,43	0,06	2,49
33. Nouvelle-Zélande	1 181	1,92	0,25	2,17
34. Nigéria	101	0,04	0,25	0,29
35. Norvège	888	2,40	0,40	2,80
36. Panama	320	0,46	0,20	0,66
37. Paraguay	120	0,07	0,25	0,32
38. Pérou	108	0,33	0,25	0,58
39. Philippines	192	0,15	0,26	0,41
40. Portugal	201	0,34	0,25	0,59
41. Porto Rico	495	0,93	0,65	1,58
42. Espagne	300	0,84	0,17	1,01
43. Suède	1 158	2,95	0,56	3,51
44. Suisse	1 267	1,67	0,15	1,82
45. Turquie	164	0,27	0,25	0,52
46. Afrique du Sud	377	2,56	0,04	2,60
47. Royaume-Uni	983	4,73	0,02	4,75
48. États-Unis	2 095	7,65	0,40	8,05
49. Venezuela	655	2,46	0,20	2,66

SOURCE. — Bureau de statistique des Nations Unies. Les évaluations sont basées sur celles des années précédentes et partent de l'hypothèse qu'il n'y a pas eu de changements dans la consommation individuelle d'énergie non commerciale depuis 1952.

^a 1956.

Le rapport qui existe entre le niveau de vie et la consommation d'énergie n'est pas simple, car nombre d'éléments interviennent dans sa définition — climat, ressources indigènes (particulièrement ressources d'énergie), types d'industrie, enseignement et spécialisations techniques — et il y a des répercussions mutuelles entre causes et effets. On ne saurait douter cependant, que la disponibilité d'énergie ne soit l'un des principaux éléments dans le développement

du progrès matériel. La production de la main-d'œuvre humaine, tant dans l'industrie que dans l'agriculture, présente un rapport étroit avec l'énergie mécanique dont dispose chaque travailleur. Ceci à son tour, présente un rapport avec les investissements de capitaux. Lorsque l'on examine les disparités entre les revenus et la consommation d'énergie que révèle la figure 1 et le tableau, on constate qu'il n'est pas facile de combler le fossé existant entre les

pays développés et ceux qui le sont moins. Il y faut du temps et de la patience. L'augmentation des ressources d'énergie doit être l'objectif principal de tous les projets, ce qui souligne l'importance de la présente conférence.

Les investissements de capitaux constituent, en fin de compte, dans le développement de tous les pays, le facteur limitatif pour la grande majorité des régions restant à développer, compte tenu de leur surpopulation, l'objectif à chaque étape du progrès pourrait être la création d'un rapport idéal entre la machine et l'homme, compte tenu des conditions locales et du marché du travail. A chaque étape quel est donc le meilleur rapport entre l'homme et la machine? Les transports, compte tenu de leur vitesse et des économies qu'ils assurent, ainsi que de leurs répercussions matérielles et psychologiques, doivent probablement être mis en tête des services qui doivent recevoir de l'énergie, même dans les pays primitifs. Celle-ci doit être utilisée de la manière qui lui permet de renforcer au mieux la main-d'œuvre humaine dans le développement des pays en cause par la judicieuse application de la concentration de puissance que représentent les machines, en tenant toujours compte de la valeur de la création d'emplois économiquement satisfaisants.

INFLUENCE DES CONDITIONS SOCIO-ÉCONOMIQUES SUR LE DÉVELOPPEMENT

Il est à remarquer que la masse de population dont le niveau de vie est assez bas, en raison d'un développement insuffisant des ressources régionales, est concentrée dans les régions tropicales et semi-tropicales. Ceci fait curieusement songer à la théorie de Markham au sujet de l'influence du climat sur l'activité humaine dont il est question dans le livre cité ci-dessus. Est-ce à dire que les conditions plus dures de la vie aux latitudes plus élevées ont stimulé l'homme au point de lui faire faire de plus gros efforts? Est-il possible que le moindre rendement des récoltes, dans les pays plus arriérés, qui est l'une des causes de leur pauvreté, soit due en partie au manque de certains oligo-éléments dans leur sol, si durement éprouvé par la lixiviation naturelle, ainsi que Gourou l'indiquait dans son « Monde tropical »³. S'il en est ainsi, c'est un défaut auquel on pourrait remédier, en l'état actuel de nos connaissances, pour un prix dérisoire. Quelles que soient les causes de la situation actuelle, l'exercice de la médecine préventive moderne et de l'hygiène ont donné lieu à de rapides accroissements de la population dans ces régions ce qui a accentué les difficultés auxquelles se heurte leur développement.

On ne trouve, dans ces pays, qu'une faible proportion de la population occupée par des industries d'un type moderne et, bien que l'on fasse de gros efforts en vue de leur développement industriel, le rythme auquel il peut se faire est limité par les gros besoins de capitaux, le manque de technologistes expé-

mentés et l'insuffisance de la formation technique du personnel. On pourrait également citer les limites imposées par le manque de ressources de ces pays quant aux matières premières. La situation des gisements de minéraux et les disponibilités en énergie viendront probablement limiter le développement économique de l'industrie lourde à certaines régions. C'est ainsi qu'en Inde, par exemple, l'industrie moderne est concentrée dans peu de régions, alors que la majeure partie de la population est dispersée dans plus d'un demi-million de petites villes et villages et se livre à l'agriculture qui nourrit le pays et fournit une bonne partie des matières premières à l'industrie. Dans le monde entier, un tiers de matières premières industrielles environ est produit par l'agriculture et les forêts. Dans la grande majorité des pays tropicaux et semi-tropicaux, des produits tels que le coton, le caoutchouc, le sucre, le jute, le sisal et le bois sont des facteurs essentiels de leur viabilité. Ils offrent également l'avantage, avec l'aide de l'énergie, pouvant être transformés sur place, de procurer du travail et la possibilité d'améliorer les conditions de vie. L'agriculture devrait donc avoir priorité dans la distribution des fonds visant au développement du pays, car les principaux problèmes auxquels se heurtent ces pays sont ceux de l'augmentation de la production industrielle et du relèvement du niveau de vie de leurs millions de petits cultivateurs. Ceci est clairement reconnu par le troisième plan quinquennal de l'Inde et le deuxième (également quinquennal) du Pakistan. D'après le plan indien, un quart des investissements des capitaux doit aller à l'agriculture, à l'irrigation, au développement de communautés et aux petites industries, ainsi qu'à celles que l'on trouve dans les villages. Par ailleurs, une large proportion des bénéfices de la moitié du budget des investissements destinés aux transports, à la force motrice et aux services sociaux fera retour à la population rurale. Le plan présente très clairement cet objectif de développement de communautés par l'amélioration des techniques agricoles, l'irrigation, les efforts coopératifs, l'enseignement élémentaire et les industries de village. Sur tous ces plans, la force motrice doit jouer son rôle.

Dans le cadre du deuxième plan du Pakistan, le pourcentage des investissements prévus au titre de l'agriculture a également été augmenté et la somme totale à dépenser sera mise en œuvre à un rythme qui, en 1965, doit être deux fois et demie ce qu'il est actuellement, pour développer la production alimentaire et faire face aux besoins du pays. Priorité est donnée aux engrais, à l'amélioration des semences, à la protection des récoltes et à l'aide aux villages, pour favoriser les efforts coopératifs. Cependant, le plan tient également compte avec réalisme du besoin de trouver dans les centres industriels nouveaux de l'emploi pour les multitudes rapidement croissantes, ainsi que du problème que ceci représente pour l'avenir.

Les deux plans quinquennaux s'attachent également au développement de l'industrie sur la base des ressources indigènes, soit en minéraux, soit en

³ P. Gourou, *The Tropical World* (Longmans, Green & Co., Londres, 1953).

produits agricoles, qui peuvent être transformés économiquement près de leur lieu de production. Les disponibilités en énergie en sont un élément essentiel. L'un des principaux objectifs de ces plans consiste à produire les marchandises nécessaires au développement du pays et à la consommation domestique, qui autrement devraient être importées, renforçant ainsi la balance des paiements. Les engrais, les machines et les articles de production y trouvent une priorité évidente. A tous ces stades du développement, deux des principaux objectifs doivent être l'établissement de l'équilibre qui convient entre l'agriculture et l'industrie et de meilleurs rapports possibles entre l'homme et la machine.

L'ÉNERGIE DANS LE DÉVELOPPEMENT RURAL

La région des terres fertiles est limitée, dans beaucoup des pays sous-développés et surpeuplés. Leur premier objectif doit donc être l'augmentation de la productivité de chaque unité de surface du terrain; l'énergie peut contribuer de nombreuses façons à l'heureuse réalisation d'un tel objectif.

L'eau constitue le facteur limitatif le plus important pour la croissance des plantes, particulièrement dans les régions tropicales, compte tenu du régime élevé de leur transpiration et de leur évaporation, car la quantité d'eau nécessaire à une récolte peut s'élever à 8 000 tonnes par tonne de blé. L'irrigation est donc une condition essentielle pour que la récolte soit indépendante des vicissitudes météorologiques et pour faire deux ou trois de ces récoltes par an, de manière à exploiter le régime rapide de la croissance. Le crédit est l'un des grands problèmes qui se posent au petit agriculteur qui ne fait qu'une récolte par an; la multiplicité de ces récoltes rendrait sa vie beaucoup plus facile.

Le drainage est indispensable en contrepartie à l'irrigation pour éviter les risques de salinité et d'imbibition qui pèsent sur les récoltes irriguées. Il est rare que la nature soit assez généreuse pour faire face à tous les besoins d'irrigation et de drainage sans l'aide de pompes. Ceci est particulièrement vrai dans les régions à faible pente, telles que le delta du Nil et le Pendjab. La mise en culture du delta du Nil n'est possible que grâce à de profondes rigoles d'assèchement dont les eaux saumâtres sont finalement élevées par les pompes et rejetées à la Méditerranée. Les terres imbibées d'eau et salines de la région de Rechna Doab du Pendjab sont en cours d'assèchement par des puits tubés profonds visant à abaisser la nappe phréatique et à fournir le supplément d'eau qu'exige l'irrigation. Tous ces programmes modernes d'irrigation sont conditionnés par l'apport de force motrice de moteurs diesel ou de l'électricité. La plupart des barrages modernes fournissent tout à la fois des moyens d'emmagasiner l'eau d'irrigation et d'alimenter une centrale de fourniture de force motrice, combinaison idéale quand les conditions sont favorables. C'est ainsi que la centrale de Warsak, récemment mise en service sur la rivière de Kaboul, prévue dans le cadre du plan de Colombo par le

Canada et le Pakistan, couvrira les besoins d'une puissance hydro-électrique installée de 160 000 kilowatts et le moyen d'irriguer 125 000 acres (50 000 hectares) d'une terre jusqu'à présent inculte. Lorsque les possibilités se prêtent moins aux projets d'une certaine envergure, on peut avoir recours aux moteurs diesel, et la vétuste noria qui, entraînée par un animal, élève l'eau d'irrigation, est un spectacle que l'on voit encore souvent dans le Moyen-Orient et l'Asie.

Pour le défrichement et les gros labours, le bulldozer et le tracteur à moteur diesel offrent de gros avantages sur la main-d'œuvre humaine et la traction animale mais leur emploi par de petits propriétaires terriens présuppose l'existence d'un système de coopératives. La fourniture de la force motrice aux villages aidera peut-être dans ce sens en ce qu'elle marquera le début d'une ère nouvelle, qu'elle soit amenée à pied d'œuvre par des diesels dans le premier cas ou par un système de distribution en provenance d'une centrale dans le second. Elle ouvre en effet quantités de possibilités nouvelles. La fourniture de lumière à la maison est peut-être le plus puissant agent de civilisation, tandis que l'apport de force motrice aux ateliers, aux batteuses, aux installations d'égrenage et aux industries du village diversifie les emplois, fournit de nouveaux débouchés et relève le mode de vie au village. C'est dans ce village même que l'avenir économique de nombreux pays sera principalement joué.

La pulvérisation des cultures et la distribution d'engrais et d'oligo-éléments par avion gagnent rapidement du terrain et, dans le même domaine, la protection des récoltes contre les essaims de sauterelles par des mesures de défense aérienne élimine l'une des plus graves menaces pour les agriculteurs des pays d'Orient.

L'amélioration des communications joue un rôle important dans le relèvement du niveau de vie des populations rurales. La rapidité des transports motorisés et l'économie de leur utilisation peuvent aider de bien des manières. Ils permettent de récolter et de mettre en réserve les récoltes alimentaires, ainsi que de livrer les récoltes industrielles aux usines où elles seront transformées près du lieu de leur production.

L'une des entreprises agricoles coopératives les mieux réussies au cours du siècle actuel, sinon la mieux réussie, est le développement de la culture du coton dans la région du Gezira au Soudan, si bien décrite par Arthur Gaitskell dans son récent livre « *Gezira, histoire du développement au Soudan* ». ⁴ Ceci soulève une question intéressante et séduisante. Jusqu'à quel point faut-il que les intéressés soient dirigés ou se sentent obligés d'agir d'une certaine façon pour assurer le succès d'un tel développement? Il n'est pas douteux que celui de la région de Gezira a été déterminé par un plan d'action en commun par les agriculteurs qu'imposaient les règlements quant aux conditions auxquelles était soumise leur

⁴ A. Gaitskell, *Gezira, a Story of Development in the Sudan* (Faber and Faber, Londres, 1959).

propriété des terres. C'était là chose relativement facile pour des terrains vierges mis en culture à l'aide de l'irrigation rendue possible par le barrage de Sennar. C'eût été chose beaucoup plus difficile à faire que de l'imposer avec succès à des propriétaires ayant des titres plus anciens, à moins qu'il n'ait été possible de les obtenir par consentement mutuel en reconnaissance d'une communauté d'intérêts. Néanmoins, l'imposition de quelques règlements est peut-être essentielle pour le bien commun.

ROLE DE L'ÉNERGIE DANS LE DÉVELOPPEMENT INDUSTRIEL

Daniel et Robinson ont examiné très minutieusement les rapports entre la consommation d'énergie et le développement industriel, dans un mémoire sur l'organisation des programmes d'investissements en combustibles et en force motrice dans les pays sous-développés⁵, présenté à la onzième réunion partielle de la Conférence Mondiale de l'Énergie à Belgrade, en 1957. Les investissements en force motrice constituent un prélude nécessaire au développement, dont le planning intéresse vivement le gouvernement, car les industries productrices d'énergie sont des services essentiels habituellement exploités sous forme de monopoles exigeant de gros investissements en capitaux. En moyenne, toute augmentation de 1 p. 100 de la production industrielle s'accompagne d'un accroissement de 0,66 p. 100 de la consommation d'énergie sous forme de chaleur et de force motrice. Cette proportion varie, bien entendu, d'une industrie à l'autre. Le tableau suivant de statistiques applicables à l'industrie britannique, dans la communication de Daniel et Robinson, illustre ce point et montre le rapport étroit qu'il y a entre le capital dont chaque ouvrier assure l'utilisation et la consommation d'énergie, pour autant que les investissements en capitaux soient principalement consacrés aux installations et aux machines, et que leur mise en œuvre soit conditionnée par un apport de chaleur et de force motrice.

Daniel et Robinson soulignent également que les industries qui exigent de gros placements et consomment beaucoup de combustible ont tendance à être celles qui exigent une grande quantité d'eau et d'amples moyens de transport. Ces auteurs auraient pu ajouter, à ces exigences, celles de moyens techniques et de connaissance technologiques.

La tendance de la technologie en Occident, où la main-d'œuvre est rare et coûteuse par rapport aux capitaux, a été la substitution de ceux-ci à cette main-d'œuvre, en faisant faire par des machines ce qui jadis se faisait à la main. Ceci, avec certaines exceptions, n'est pas indiqué dans les pays moins développés avec leur abondance de main-d'œuvre et leur manque de capitaux, où des installations, moins complexes et plus petites, faisant travailler

Tableau 2

Industrie classée suivant les investissements nécessaires de capitaux par personne occupée	Capital par personne occupée en 1936	Consommation annuelle de combustible et d'électricité par personne occupée
		(Livres sterling)
Extraction et raffinage des métaux	2 244	88
Produits chimiques	2 084	77
Papeterie, etc.	1 871	74
Métaux légers et produits électriques.	1 130	17
Denrées alimentaires, boissons et tabac	1 118	23
Métaux semi-finis et génie civil	976	18
Cuir, fourrure, caoutchouc	942	17
Matériaux de construction	928	21
Produits textiles	813	20
Ameublement, poterie, verrerie, divers	730	22
Habillement et literie	361	4
TOTAL pour toute l'industrie.	1 107	30

plus de main-d'œuvre et réalisant des économies de capitaux, constituent souvent la bonne solution. Le contraste entre la réalisation de barrages dans les montagnes Neigeuses d'Australie et à Warsak, sur la rivière de Kaboul au Pakistan, donne une bonne illustration de ce qui précède. Dans le premier cas, on a fait une utilisation maximum de toutes les machines, des modèles les plus variés, tandis qu'à Warsak, le même travail était exécuté par des milliers d'hommes. On a réduit de la sorte les investissements qui auraient dû être faits pour importer des machines, tandis que nombre des travailleurs apprenaient de nouvelles techniques. Il existe en revanche des procédés technologiques compliqués qui ne se prêteraient pas au remplacement de la machine par la main-d'œuvre humaine.

C'est probablement la disponibilité des matières premières et de la force motrice à pied d'œuvre qui définira les premiers domaines d'initiative et déterminera, dans une large mesure, l'emplacement des industries permettant de réduire les frais de transport des matériaux lourds.

Daniel et Robinson soulignent que le combustible, exception faite de l'eau, représente le plus gros tonnage de matériaux qu'utilise l'industrie et que les frais de transport des combustibles solides par voie ferrée est élevée. Ils donnent un chiffre de 5 livres par 1 000 milles. L'énergie, sous forme de pétrole ou de gaz naturel, peut être déplacée à bien meilleur compte par des pipe-lines. Ils citent, pour le pétrole, un chiffre de 1 livre par 1 000 milles⁶, donnant des frais qui varient avec le débit annuel et le facteur de charge. Le coût modique du transport d'énergie sous forme de pétrole ou de gaz aide beaucoup au développement industriel des pays qui ont la bonne fortune de disposer de semblables ressources. Les frais de transport de grosses quantités d'une énergie telle

⁵ G. H. Daniel et E. A. G. Robinson, "Planning of investment in fuel and power in under-developed countries", *World Power Conference, Sectional Meeting, Beograd, 1958, Transactions, Vol. 2*, p. 221.

⁶ Cinq livres sterling égalent environ 14 dollars des États-Unis d'Amérique; 1 000 milles égalent environ 1 600 kilomètres.

que l'électricité par des lignes à haute tension sont inférieurs à ceux qu'impose le déplacement de leur équivalent en charbon par voie ferrée, sauf en cas de faibles distances ou d'un facteur de charge réduit, mais elle est plus chère à expédier à pied d'œuvre que le pétrole ou le gaz et ne peut s'envoyer à plus de quelques centaines de milles. L'électricité, en revanche, est l'agent idéal pour la distribution locale de l'énergie sous une forme qui peut recevoir d'innombrables applications. Lorsque les conditions sont favorables, et malgré les gros investissements que ceci présuppose, nombre de programmes de développements récents reposent sur l'utilisation de l'énergie hydro-électrique. Le barrage à multiples applications offre les avantages de fournir de l'eau d'irrigation, de réduire les inondations et parfois même d'améliorer la navigation fluviale, outre la fourniture d'énergie.

Dans l'avenir les pipe-lines joueront un rôle de plus en plus important dans la distribution de l'énergie. L'une des dernières réalisations est, dans l'Ohio, le transport de charbon dans un pipe-line hydraulique qui déplace 1,25 million de tonnes de charbon par an, de la mine de houille à une centrale électrique, située à 105 milles (168 km) ce qui permet de réaliser des économies considérables sur le transport par voie ferrée. Dans un proche avenir, les pipe-lines transporteront sans doute le gaz naturel sur de grandes distances sous l'eau.

L'intérêt de l'obtention d'énergie utile, solaire ou éolienne est l'absence habituelle de frais de distribution.

La fourniture d'énergie doit jouer un rôle important dans tous les plans ayant trait au développement industriel, quand on les envisage en liaison avec l'emplacement des sources de matières premières, la disponibilité de moyens de transport (dépendant également d'un apport de force motrice) et l'existence assurée de sources d'eau. Il faut en effet 200 tonnes d'eau pour faire une tonne d'acier, 20 tonnes pour raffiner une tonne de pétrole et de nouveau 200 tonnes pour produire une tonne de fil de viscose. Dans les premiers stades du développement, il sera peut-être indiqué d'utiliser des installations moins développées et plus petites, dans lesquelles la main-d'œuvre humaine jouera un rôle plus important et c'est là que l'énergie solaire et l'énergie éolienne pourront, dans l'avenir, intervenir l'une et l'autre de façon fort utile. Il peut également être préférable de produire de l'électricité au moyen de moteurs diesel, en vue de son utilisation sur place, avant de passer à un réseau complet de distribution. Le régime des investissements de capitaux jouera un rôle décisif dans ce domaine. Pendant les premiers stades, on pourra concentrer les efforts sur les produits textiles, les denrées alimentaires, l'agriculture et l'industrie du bois, ce qui exigera de moindres investissements d'énergie qu'il n'en faudrait pour la mise au point de grosses industries. Une fois de plus, c'est la disponibilité de matières premières qui jouera peut-être le rôle décisif. Le monde a grand besoin de métaux et les capitaux étrangers se trouvent habituellement sans

difficulté pour la mise en œuvre des ressources minérales.

ROLE D'AVENIR DES NOUVELLES SOURCES D'ÉNERGIE

Le rapport, préparé par le Secrétariat de l'Organisation des Nations Unies avec l'aide d'un groupe de spécialistes et publié sous le titre *Nouvelles sources d'énergie et de développement économiques* en 1957, contient un excellent résumé du degré d'exploitation et des perspectives actuelles des sources nouvelles. Il fournit des bases d'ensemble en vue de la préparation de la Conférence.

L'une des trois nouvelles sources de force motrice qui sont à examiner, l'énergie géothermique, est profondément différente des deux autres (énergie solaire et énergie éolienne) en ce sens qu'elle n'est disponible que dans des régions limitées — essentiellement près des centres d'activité volcanique — et ne fait pas l'objet d'une distribution généralisée. En revanche, là où elle est disponible, elle fournit une source continue d'énergie sous forme d'eau chaude, souvent avec de la vapeur que, dans des conditions favorables, on peut utiliser dans l'industrie pour produire de l'électricité et également pour assurer le chauffage des locaux. Ce n'est que récemment que les possibilités de cette source d'énergie ont commencé à être exploitées, et que le développement est en cours dans un grand nombre de pays. Les conditions varient beaucoup d'un lieu à l'autre et en fonction de la profondeur des puits. Des essais sont toujours nécessaires en chaque lieu pour déterminer la valeur économique de cette source d'énergie. En certains points on n'obtient que de l'eau chaude, tandis qu'en d'autres on trouve de la vapeur sèche ou humide, à des pressions allant jusqu'à 250 livres par pouce carré (17,5 kg/cm²), ce qui fournit à la fois une source économique d'énergie et de vapeur. En certains lieux, l'eau et la vapeur contiennent des produits chimiques tels que l'acide borique et l'ammoniac, qui peuvent être récupérés dans de bonnes conditions économiques, d'où réduction des frais de production d'énergie. La Conférence offrira une occasion de comparer les derniers progrès réalisés dans ce domaine en divers lieux, ce qui permettra de poser les problèmes techniques en cause et d'examiner les possibilités d'avenir.

Énergie solaire

Le soleil, directement ou indirectement, est la source première de toute notre énergie et le maintien de la vie sur notre planète dépend entièrement de cette énergie solaire. C'est elle qui détermine nos climats, le régime de nos pluies, le développement de la végétation et bien d'autres choses encore. Néanmoins, quand nous essayons de l'utiliser pour exécuter des travaux plus modestes, elle souffre à la fois de son peu de concentration, ce qui exige une surface de captation considérable, de son caractère inter-

mittent et de ses variations saisonnières. Les progrès ont été lents, dans le domaine de son utilisation, bien que notre confort en dépende dans une très large mesure. La plupart des pays sous-développés sont dans les zones tropicales, où les variations saisonnières sont moins importantes et l'ensoleillement mieux assuré que sous de plus hautes latitudes, de telle sorte que les conditions sont relativement favorables à son utilisation, en vue d'augmenter leurs bien maigres ressources présentes d'énergie. Si on pouvait éviter, dans ces régions, l'emploi de fiente sèche comme combustible, le gain réalisé serait déjà immense. L'emploi d'énergie solaire pour la cuisine, pour le chauffage de l'eau, pour la distillation de l'eau salée et pour l'évaporation des solutions, sont autant de possibilités d'une valeur avérée et la Conférence soulignera les progrès réalisés, les problèmes techniques encore à résoudre et les nouvelles applications mises au point.

Énergie éolienne

L'énergie éolienne est l'un des plus vieux auxiliaires de l'homme et on l'utilise encore beaucoup

dans des pays où le régime des vents est favorable. Son utilisation principale est actuellement le pompage de l'eau, avec cet avantage qu'il peut être fait usage d'un réservoir pour son accumulation. En cas de besoin, un moteur diesel peut intervenir lorsque le vent cesse de souffler. Le moulin à vent, en tant que source directe d'énergie mécanique, a été remplacé dans une large mesure par des moyens de transformation d'énergie et l'orientation générale du développement, au cours de ces dernières années, a été vers son emploi à la production d'électricité. Cette méthode souffre du fait que les ressources sont incertaines et disponibles de manière intermittente, sauf dans les endroits favorables, ainsi que du coût élevé de la mise en réserve de l'électricité. Dans nombre de pays, on fait un usage expérimental de génératrices entraînées par le vent pour fournir le courant à un réseau, et économiser de la sorte du combustible. C'est là la condition la plus avantageuse, car elle évite la mise en réserve. Ici encore, la Conférence pourra collationner des renseignements sur les dernières acquisitions techniques et des données sur les utilisations les plus fructueuses qui peuvent être données à l'énergie éolienne.

SOCIO-ECONOMIC CONSIDERATIONS IN THE UTILIZATION OF SOLAR ENERGY IN UNDER-DEVELOPED AREAS

J. C. Kapur

Air Conditioning Corporation Ltd.
Calcutta

In the march of civilization, man has faced many great challenges. But none of these, either in scope or dimensions, equals the one we face today, that is, the amelioration of the living conditions of over two billion of the world's citizens.

While even the most advanced of the peoples of these under-developed areas are still struggling to comprehend some of the very basic problems of an industrial society, many amongst us are reaching out for the space age. This wide disparity of concepts and accomplishments makes the realization of these objectives all the more staggering.

During the period following the industrial revolution, many forces have conditioned man's social and material advancement, and one of the most important amongst these has been the availability, effective transformation and utilization of energy.

It started from the earlier sun-plant-and-man relationship, whereby consuming 3,000 calories in the form of plant food a day, man converted about one-fifth of this into actual mechanical work. The next stage emerged when man brought into service animals such as horses, bullocks and others, which, though less efficient than man in energy conversion, made energy available in a concentrated form when required. From the utilization of wind and water, to the emergence of steam engines was a great step forward. If a miner could mine 400 pounds of coal per day of a calorific value of 3,500, he could produce 400 times the energy that he consumed. Even when the coal was transformed into steam, in an engine of 1 per cent efficiency it produced an energy equivalent to 21 times the energy actually expended. The efficiency of the steam engine continued to increase along with the average production of coal per miner, so much so that today less than one pound of coal is required to generate one kilowatt-hour of electricity, whereas only 60 years ago we needed more than seven pounds for the same purpose. In this process, the net gain of man-days per man-days actually used, continued to rise. The effective transformation of oil and gas in recent years has further increased this rate of utilization. The more recent advances in thermonuclear conversion have opened up large new sources of energy.

During the last century, various factors including the migration of population to wide new stretches

of land and the dispersal of unemployment, efficient conversions and increased utilization of energy, trade protection, and the accumulation of surplus in the hands of a few, helped to create the advanced industrial and high mass consumption societies which include over 30 per cent of the world's people today.

ENERGY CONSUMPTION IN VARIOUS PARTS OF THE WORLD

Tables 1, 2 and 3 show the relative position of energy utilization in countries in the following categories, during the years 1960, 1975 and 2000. The countries are divided into three categories :

(a) Countries, or groups of countries, in the stages of advanced industrialization and high mass consumption.

(b) Under-developed countries in various stages of economic self-sufficiency.

(c) Backward areas in various stages of investigation and planning for sustained economic growth.

Table 1

(a) It will be seen that, in 1960, countries in group (a), with a population of 914 million or 30.5 per cent of the world total, consumed 84 per cent of the world energy expended during the year.

(b) Countries in group (b), with a total population of 1,500 million or 50 per cent of the world total, consumed approximately 15.5 per cent of the world's total consumption of energy.

(c) Countries in group (c), with an approximate population of 586 million or 19.5 per cent of the world total, would consume only 1 per cent of the world's consumption of energy.

Table 2

The above energy consumption picture does not materially alter in the year 1975.

Table 3

In the year 2000, when the countries in group (b) move into the stages of advanced industrialization

Table 1

Energy consumption in different parts of the world at various stages of economic development for the year 1960

Area of the world, or country	Stage of economic development	Population		Energy consumption		
		Millions	Percentage of the world total	Per capita in equivalent tons of coal	Total (millions of tons of coal)	Percentage of the world total
(a) United States of America .	Advanced industrializa- tion and/or mass con- sumption	184	6.2	8.0	1,450	42.0
OEEC countries excluding Greece, Turkey and Yugoslavia		330	11.0	2.5	830	24.0
USSR and countries of eastern Europe		300	10.0	1.5	450	13.0
Japan		100	3.3	1.6	160	4.5
		914	30.5	3.15	2,890	83.5
(b) Brazil, China, Greece, India, Iraq, Peru, Portugal, Mexico, Spain, Turkey, Yugoslavia and other countries	Near or approaching self-sustained econo- mic growth	1,500	50.0	0.36	540	15.5
(c) Remaining countries of Africa, Asia and Latin America	Backward economies or economies requiring considerable prepara- tion for accelerated economic growth	586	19.5	0.06	35	1.0
	TOTAL	3,000	100.0	1.16	3,465	100.0

Table 2

Energy consumption in different parts of the world at various stages of economic development for the year 1975

Area of the world, or country	Stage of economic development	Population		Energy consumption		
		Millions	Percentage of the world total	Per capita in equivalent tons of coal	Total (millions of tons of coal)	Percentage of the world total
(a) United States	Stages of high consump- tion	230	5.9	12.5	2,900	48.0
OEEC countries, excluding Greece, Turkey, and Yugoslavia		400	10.0	3.0	1,200	20.0
USSR and countries of eastern Europe		360	9.0	2.0	720	12.0
Japan		120	3.0	2.3	276	4.0
		1,110	28.3	4.6	5,096	84.0
(b) Brazil, China, Greece, India, Iraq, Mexico, Peru, Por- tugal, Spain, Turkey, Yugoslavia and other countries	At various stages be- yond self-sustained economic growth	2,000	51.2	0.47	940	15.0
(c) Remaining countries of Africa, Asia and Latin America	Nearing self-sufficiency	800	20.5	0.18	64	1.0
	TOTAL	3,910	100.0	1.56	6,100	100.0

Table 3

Energy consumption in different parts of the world at various stages of economic development for the year 2000

Area of the world, or country	Stage of economic development	Population		Energy consumption		
		Millions	Percentage of the world total	Per capita in equivalent tons of coal	Total (millions of tons of coal)	Percentage of the world total
(a) United States	Advanced industrializa- tion and mass con- sumption	300	5.1	15.0	4,500	29.4
OEEC countries, excluding Greece, Turkey and Yugoslavia		600	10.2	5.0	3,000	19.6
USSR and countries of Eastern Europe		520	9.0	4.5	2,350	15.3
Japan		150	2.6	4.0	600	3.9
		1,570	26.9	6.1	10,450	68.2
(b) Brazil, China, Greece, India, Iraq, Mexico, Peru, Por- tugal, Spain, Turkey, Yugoslavia and other countries	Advanced industrializa- tion and mass con- sumption.	3,000	51.1	1.5	4,500	29.3
(c) Remaining countries of Africa, Asia and Latin America	Beyond the stages of sustained economic growth	1,300	22.0	0.30	390	2.5
	TOTAL	5,870	100.0	2.62	15,340	100.0

or high mass consumption, the following general picture may emerge:

(a) Group (a) with a population of 26.9 per cent, would consume 68.2 per cent of the world's total consumption of energy.

(b) Group (b) with a population of 51.1 per cent, would consume 29.3 per cent of the world's total consumption of energy.

(c) Group (c) with a population of 22 per cent, would consume 2.5 per cent of the world's total energy consumption.

On a world wide basis the per capita consumption of energy in equivalent tons of coal (cal. val. 12,000 BTU) is likely to be:

Year	Per capita energy consumption (equivalent tons of coal)
1960	1.16
1975	1.56
2000	2.62

If the above projected pattern is borne out by events, the known world deposits of fossil fuels (estimated at 30×10^{11} tons of coal) at the probable rate of consumption in the year 2000 would last less than 200 years. With the possibility of a still greater rate of consumption from now on to the year 2000, and the expected increase in the rate of consumption after the year 2000 for the under-developed areas, the known deposits may not last a 100 years

from now. Therefore, by the time the under-developed areas succeed in building up an industrial complex around the existing sources of energy, the resources might reach a stage of near depletion. This will become particularly alarming if the advances in technology enable us to accelerate the rate of economic growth beyond what appears to be possible under the existing conditions.

DISTRIBUTION OF ENERGY REQUIREMENTS IN UNDER-DEVELOPED AREAS

Another factor which deserves consideration is the nature and distribution of energy demands in the under-developed areas. In this connexion, India can be taken as a typical example of an agricultural and mineral economy. As will be observed from tables 4 and 5, with 15 years of intensive planned economic development, by 1966 India will have 350 million people, about 80 per cent of the population living in the rural areas. Even if the rate of urbanization were to be increased by an accelerated process of industrialization, by 1981 there would still be 480 million people, or 75 per cent of the entire population living in small agricultural communities.

By 1966 only 29,500 of the 557,000 villages and towns with population of less than 5,000 would have the use of electric power.

Table 4
Urban/rural population change in India

Year	Total population (millions)	Population (millions)		Growth in millions during preceding decades	
		Village	Town	Village	Town
1921	248	220	28		
1931	275	242	33	22	5
1941	313	271	43	29	10
1951	357	295	62	24	19
1961	440	350 ^a	90	55	28

SOURCES : Census reports, 1951.

^a Final figures not available at the time of compilation.

Table 5
Towns and villages electrified in India

Population range	Number of towns (1951 census)	Number electrified			
		March 1951	March 1956	March 1961	March 1966
Over 100,000.	73	49	73	73	73
50,000-100,000	111	88	111	111	111
20,000-50,000	401	240	366	399	401
10,000-20,000	856	260	350	756	856
5,000-10,000	3,101	258	1,200	1,800	3,101
Less than 5,000.	556,565	2,792	5,300	15,861	29,458
TOTAL	561,107	3,687	7,400	19,000	34,000

SOURCE : Draft third five-year plan, 1961-1966.

Most of the energy consumption in the rural communities would be in the form of wood and cow dung. The bulk of the increase in energy consumption over the next 20 years would go to the new and existing urban communities. It is estimated that, in the year 1981, 160 million people, or 25 per cent of the population, might come close to enjoying the benefits of an energy equivalent of 1 ton of coal; but the remaining 75 per cent of the population, numbering 480 million people, would be consuming 0.28 tons of coal per capita.

What is true for India, nearing the point of self-sustained economic growth, is even more so in the case of other backward economies.

The entire capital and productive resources of a family in such a rural community consist of one- or two-roomed huts with a small courtyard, a few animal-drawn ploughs and other implements and their own physical work. Their requirements include food for the family, fodder for the cattle, and some wood or cow dung for fuel. Generally this family is self-sufficient except for the services of the village artisans, such as the weaver, the cobbler, the blacksmith, the carpenter, the barber and the agricultural labourer.

About 60 million such families share a total rural income of about \$13 billion, which works out at a per capita annual income of approximately \$52 (Rs 250). The productivity of a village worker is

reported to be one-fourth that of a mine or factory worker.

In most of these communities the average net cultivated area per head is less than an acre. (In certain parts of China one-fourth or one-third acre per head. In Indo-China about 0.6 acre.) The average farm in the United States of America is over 200 acres, with about three workers.

The growth of the rural population is further reducing the size of farms. The distribution of land to tenants is not likely to produce the requisite conditions for an intensified programme of rural electrification. Manpower often becomes an essential economic factor in such communities, and the people multiply to a point where they can hardly produce enough for themselves. Co-operative farming in units of 25, 50 or 100 acres, and the utilization of intensive cultivation methods with an increased use of energy, would necessitate the creation of employment opportunities for millions of surplus workers.

In a situation such as this, the entire process of peaceful transformation of the stagnant rural economies, may well depend upon our ability to increase the productivity of the land without creating technological unemployment.

Intensive industrialization brings the urban communities under the direct impact of the techno-

logical advances, and in spite of all the social problems involved, helps to create a nucleus of skills, generally following the trends in the advanced countries.

In rural communities, on the other hand, the introduction of energy and the socio-economic changes that are likely to follow may tend to disrupt community life and draw rural populations into the whirlpool of national and international (though not always desirable) forces.

The utilization of energy in rural communities should therefore be a local or at the most a regional matter. The extent of energy consumption and the pattern of energy utilization should be determined from community to community, depending upon the population, the needs of agriculture, the availability of local skills and the possibility of assuring markets for their products. All these considerations can best be served by energy supply in small units, and the number of such units can be multiplied according to the needs.

A CASE FOR SOLAR ENERGY

The most important consideration in the utilization of solar energy is that it is the most abundant source of energy known to man, and is likely to last as far as man can comprehend. The coming generations will not be faced with the situation that confronts us today if solar energy is brought into use.

In the context of most of the under-developed countries, solar energy is more a part of their life than any other source of energy. The advanced technology of energy transformations known to us today has no associations with their energy concepts. The utilization of solar energy is most likely to break down the mental barriers which often resist the introduction of advanced technologies.

A close examination of research and development activities the world over indicates that the greatest advances have been, are being and are likely to be made in the utilization of energy in relatively small units. This factor is particularly important for the needs of the under-developed areas, and fits into the pattern of rural economies. Small units can be tailored to the needs of individual communities and the availability of surplus manpower will largely obviate any need for automation.

Availability, intermittence and storage are the most important considerations in the utilization of solar energy.

With regard to the incidence of solar radiation or the availability of solar energy, it is most interesting to observe that with a few exceptions almost the entire population of about 2,000 million of what we term under-developed areas resides in the section of the earth bounded by the thirtieth parallel on either side of the equator, with much greater concentration in the north. The average annual per capita income of the bulk of these people is less than \$100. Although the pattern is disturbed by the location of under-ground wealth in certain areas, nearness to the equator and the high atmospheric heat does appear

to have some relationship to the low per capita income. This pattern is further supported by the fact that there is a rise in incomes as one moves from southern to northern Europe.

The incidence of sky and solar radiation that actually reaches the earth depends on a number of factors such as the position of the sun, the season, direction, angle of slope and height of the station, situation with regard to the surroundings, and the presence of clouds, dust and moisture in the atmosphere. It would require considerable planning and organization to obtain more precise information about all the areas, but the estimates made to date indicate that some of the important areas with the largest concentration of rural population have an incidence of solar radiation of over 600 grammes-calories per square centimetre per day. Furthermore, most of these countries in Africa, Asia and Latin America are particularly poor in per capita availability of fossil fuels and hydroelectric resources. (1)

In rural communities in under-developed areas where important sections of the population remain partially or wholly unemployed, the problems of intermittence and storage lose most of their significance. Is it really important to have sunshine or work every day except Sundays and festival days? Why must we apply the concept and economies of the advanced societies in entirely unwarranted situations? What is needed is to create conditions for work and productive effort to the maximum extent possible within the present limitation of research and development.

Economics apart, even under existing conditions, it should normally be possible to create employment opportunities by the use of new sources of energy for between 200 and 300 days in a year in most under-developed areas. If, therefore, within the next 25 years we can establish a definite pattern and assure satisfactory and fruitful integration of the new energy concepts into the lives of these communities, we shall have taken a great step forward. The very intermittence of the new sources of energy will perhaps continue to act as a buffer against the initial impact, while we are busy resolving the problems of storage and evaluating the socio-economic stresses and strains which even the partial utilization of energy is bound to create.

ENERGY NEEDS FOR THE DEVELOPMENT OF A RURAL COMMUNITY

It is in the above context, and with the understanding that the conditions which centuries ago stimulated the step by step, interrelated and progressive emergence and growth of present day advanced industrial societies cannot be reproduced today, that we should examine the energy needs of a rural community in an under-developed area.

Table 6 outlines an assessment of energy needs of one such community in India. An attempt has been

Table 6

Assessment of the extent and nature of energy requirement to improve productivity and per capita income in a rural community in India

Assumptions :

Population : Adult males, 302; adult females, 298; children and aged, 400; total : 1,000
 Land area to be irrigated, 1,000 acres, approximately
 Milk consumption, 2 lb per person or 2,000 lb per day
 Cloth production for local use and for sale outside the community, 20,000 yards per year
 Water supply, 10,000 gallons per day
 Electric lighting, street and domestic at 15 watts per person or 15 kilowatts total

Purpose for which energy required or work load	The most versatile form in which energy can be employed	Basis of estimation and connected load	Annual energy requirements	Possible employment potential (+) or technological employment it may create (-)	Estimated per capita investment on work equipment (rupees)	The possible lines of approach or energy utilization
(a) Applications requiring continuous energy supply						
Cooking	Solar/Electricity/ Gas/Coal/ Wood	0.6 kW/family—120 kW	65,700 kWh			Solar energy supplemented by wood, coal, lignite or oil should be used. Produce high-pressure steam (300 kg at 22 atm) use this steam to generate 25 kW of electric power, 200 kg of 1.5 atm steam goes to the boiler to produce 2,500 kg of water at 85°C ^o and the remaining 100 kg 1.5 atm steam provides energy for the refrigeration plant—45 kg of fuel calorific value 7,000 consumed per hour. Supplemented with solar energy ^a
Domestic water supply. Residential and street lighting	Electricity	10,000 gall/day—3 kW	6,000 kWh			
Milk processing, fruit, vegetable, fish, seed, potatoes	Electricity	15 W/person—15 kW	21,900 kWh			
	Electricity-steam	Pumps and other services 7 kW 10,000 kg Cal/hr of refrigeration—1.5 atm 100 kg steam/hr.	35,000 kWh 200 × 10 ⁶ kg Cal.	+ 20	5,000	
Hot water services for milk and refrigeration plant and other uses.	Steam	2,500 kg of water per hour from 45-85°C—200 kg of 1.5 atm steam/hr	400 × 10 ⁶ kg Cal.			
(b) Application where intermittence is not a serious handicap						
Irrigation	Electricity	10 kW/300 acres—30 kW	40,000 kWh			Small 10-15 kW solar generator preferably of the thermoelectric type and working during the sunny period only should be adequate till storage techniques are perfected. Successful development of such a unit would be a great step forward. To start with, power could be used for irrigation only and then its application broadened by stages to cover other needs
Handling of agricultural produce, such as rice polishing, 2-20 hp equipment	Electricity	Average 5 kW per man—30 kW	22,500 kWh	+ 20	5,000	
Textile weaving	Electricity	0.8 kW/loom—8 kW	10,000 kWh	+ 10	6,000	
Manufacture of building material such as bricks, tiles, lumber and hardware; and other small-scale industries	Electricity	Average 1 kW per machine—20	20,000 kWh	+ 25	3,000	
TOTALS						
		113 kW ^b	165,400 kWh ^b	+ 75	5,000 Average	

^a Application used in farms in the USSR. SOURCE : Danilov, *Absorption cooling or refrigerating plants for small farms* (Moscow, 1957).

^b Not including load for cooking, absorption refrigeration and hot water services.

made to keep the requirement to the minimum and to group them under two distinct headings.

(a) Requirements which would need continuous energy supply or where energy storage is desirable or absolutely necessary, and where solar or other new sources of energy must be supplemented by fossil fuels until storage techniques are evolved. These applications would not cause technological unemployment.

(b) Requirements which are not seriously affected by intermittence and energy are to be utilized for broadening the economic base of the community, that is, to increase the consumption and productivity of its daily necessities, create wider markets for the products of its crafts, and to encourage the growth of conditions in which new concepts of eating, living and recreation would evolve. While these energy applications might bring about far-reaching socio-economic changes in the life of the community, they would not be seriously influenced by the intermittence of the new sources of energy.

Whether this community would be an independent unit, a part of a community development project or a component supplier to a large industrial complex would depend upon its location, the availability of skills, or its nearness to large industries.

(a) *Continuous energy supply vital*

In case (a) above, where continuous energy supply is required, a system would have to be devised to utilize solar energy to the maximum extent possible. After sundown or on cloudy days, oil, coal lignite, wood or any other fuels available in the vicinity at economic prices could be brought into use.

Figure 1 shows the schematic outline of one such system wherein :

(i) Solar energy or 40 to 50 kilogrammes per hour of fuel (calorific value — 7,000 kilogramme-calories) can be used to produce 300 kilogrammes per hour of high pressure steam;

(ii) In the first stage steam is used to generate 25 kilowatts of electrical energy with the help of a steam turbine or engine;

(iii) Thereafter 100 kilogrammes of low pressure waste steam (1.5 atm) produces 10,000 kilogramme-calories of absorption refrigeration in the form of brine cooling and cold storage, with possibilities of energy storage in cold accumulators;

(iv) 200 kilogrammes per hour of waste steam (1.5 atm) are used to heat 2,500 kilogrammes of water per hour from 40 to 85°C. This water could supply the need for hot water services for the pasteurization process, bottle washing and other applications;

(v) The extent and manner of utilization of the low pressure waste steam outlined in sub-paragraphs (iii) and (iv) above, could be varied to meet the differing requirements for refrigeration, hot water services and other applications in the different communities;

(vi) Columns 3 and 4 of table 6 show the energy picture of the different applications, and also the manner in which 25 kilowatts of electrical energy could be employed for certain essential services;

(vii) A complex system such as the above gives a high coefficient of energy utilization.

(b) *Continuous energy supply not necessary*

(i) Section (b) of table 6 outlines the requirements in cases where, for reasons earlier explained, intermittence is not a serious handicap. It will be seen that these needs could best be served by using a series of small 10-15 kilowatt electric generators for applications such as irrigation, domestic water supply, textile processing, rice polishing, flour mills, ginning and oil extraction and so on;

(ii) This could be followed up by creating a complex of industries around housing and building materials. For a self employed individual in a rural community, an improvement in his place of work would also improve his living conditions, and help in creating employment potential;

(iii) The key to the entire picture lies in the availability of a low-priced electric generator. Recent advances in the field of thermo-electricity appear to offer the greatest promise. Energy conversion temperatures running as high as 600-800° C and unit costs as low as \$200-300 per kilowatt are reported. As the size of the unit should not make any material difference in the cost per kw of thermo-electric generators, it would make thermo-electricity ideally suited to the needs of the under-developed communities.

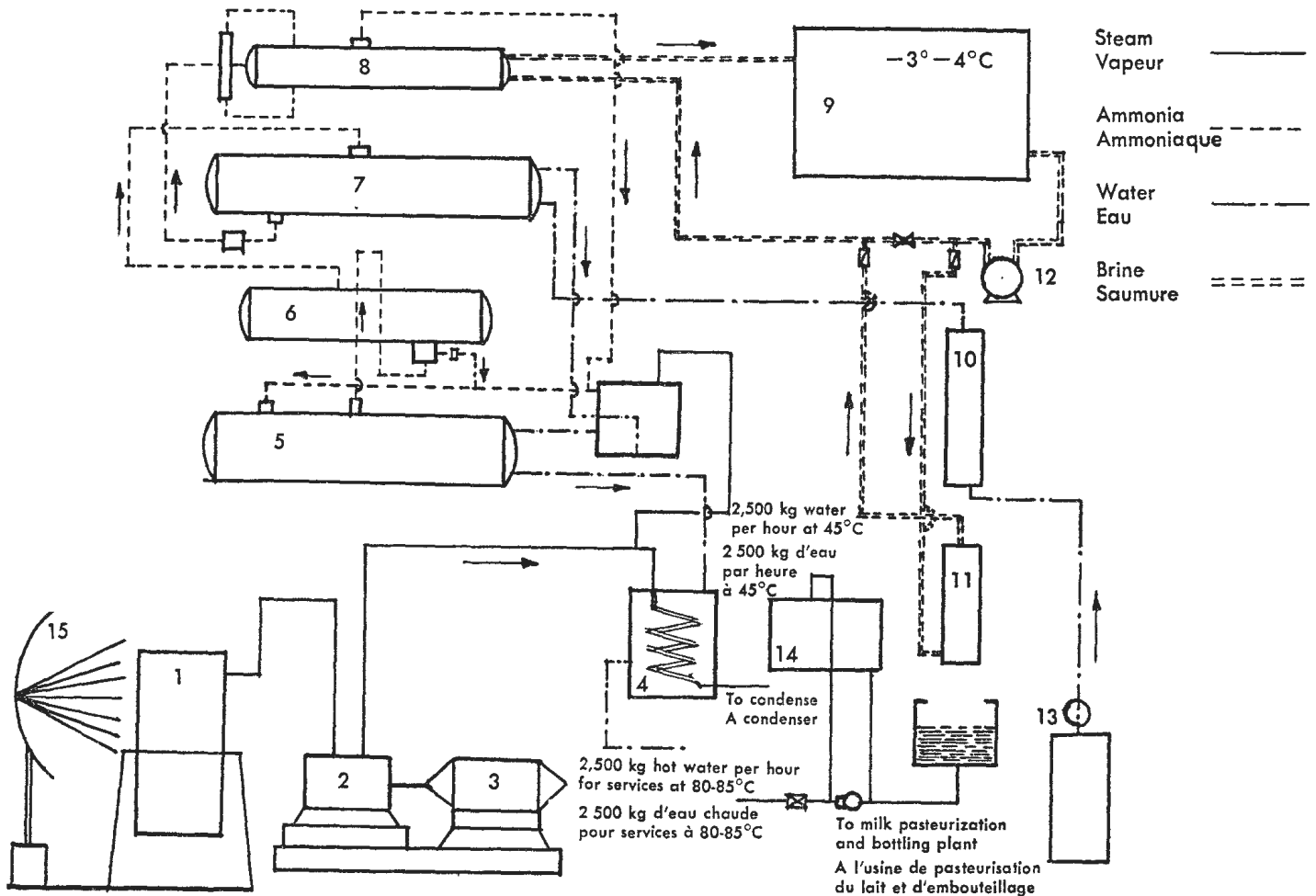
PRACTICAL AND FINANCIAL CONSIDERATIONS

The natural question that now arises is, what socio-economic benefits would accrue to these communities by the introduction of the new sources of energy? How much would such a scheme cost and what technological problems would have to be solved in its implementation?

It is observed that by the introduction of power looms in place of hand looms, the use of 1 kilowatt-hour of electrical energy would add Rs 1.25 to the value of the raw material over and above what could be realized by a hand loom. Similar figures for some of the other industries such as light engineering, building materials, wool processing, soap manufacturing and rice polishing, are of the order of Rs 2 to 7 per kilowatt-hour used. Taking a conservative average of an addition of Rs 2 per kilowatt-hour consumed and ignoring the use of direct solar heat and steam, it should be reasonable to expect the over-all increase in the per capita income of this community directly attributable to the electrical energy utilization to be Rs 330 (\$66).

This is estimated on the basis of per capita energy generation of 155 kilowatt-hour per year (table 7).

The capital costs, in a project of this nature, will depend upon the nature and extent of different



Legend

- | | | | |
|---|--------------------|----|------------------------|
| 1 | Boiler | 10 | Milk precooling with |
| 2 | Steam turbine | | condenser water |
| 3 | Electric generator | 11 | Milk cooling with |
| 4 | Hot water boiler | | refrigeration from |
| 5 | Generator absorber | | accumulator |
| 6 | Rectifier | 12 | Pump |
| 7 | Condenser | 13 | Condenser water supply |
| 8 | Evaporator | 14 | Precooled milk tank |
| 9 | Cold accumulator | 15 | Solar reflector |

Légende

- | | | | |
|---|-------------------------|----|--------------------------------|
| 1 | Bouilleur | 10 | Rafrâichissement du lait |
| 2 | Turbine à vapeur | | par l'eau du condenseur |
| 3 | Générateur électrique | 11 | Refroidissement du lait |
| 4 | Bouilleur | | avec réfrigération |
| 5 | Absorbant du générateur | | par l'accumulateur |
| 6 | Redresseur | 12 | Pompe |
| 7 | Condenseur | 13 | Fourniture d'eau du condenseur |
| 8 | Evaporateur | 14 | Réservoir à lait prérafrâichi |
| 9 | Accumulateur de froid | 15 | Réflecteur solaire |

Figure 1

A system utilizing a combination of solar energy and fuel for the development of power for various functions. This system would produce electricity, drive an absorption plant, heat water and operate a milk processing plant on an integrated basis to assure a high rate of energy utilization

Système combiné utilisant combustible et énergie solaire pour la production de force motrice à usages divers, tels que fabrication d'électricité et fonctionnement d'une centrale de réfrigération par absorption, d'un bouilleur et d'un dispositif de traitement du lait, pour assurer une forte proportion d'utilisation d'énergie

industries and craft to be emphasized; and will be subject to considerable variation from one community to another. Taking an average per capita figure of Rs 7,000 for the power and work equipment for persons directly employed, the total capital expenditure required would be of the order of Rs 500,000 (\$100,000). On a community basis this works out at a per capita investment of \$100 only. Assuming that 1,500 million people around the world would need such assistance, the total expenditure would be of the order of \$150 billion to \$200 billion. Spread over 20 to 30 years, it is not

beyond the resources of the affluent societies of the world.

It is neither possible nor advisable to bridge a technological gap of centuries in a few years. Relatively speaking, it would make the task of energy introduction in these communities less formidable, if as a first step energy utilization was confined to its integration with the community crafts for which outside markets can be assured. Apparent economic benefits from the very commencement would be a major step forward. Improvements in animal husbandry and the supply of precooled milk,

Table 7

Comparative statement of per capita installed and generated power in the rural community proposed in table IV

	Per capita	
	Installed power (kilowatts)	Generated power (kilowatt-hours per year)
Rural community described in table 6	0.113	155
India	0.01	22
Japan	0.15	732
United States	0.72	3,900

vegetables and other consumer necessities to the neighbouring urban communities would help in passing on part of the benefits of larger industrial development to the rural areas and widening the spheres of energy utilization.

The technical skills required to make energy utilization possible fall into two categories.

(a) The training of technicians to handle their specialized crafts with power driven machines.

(b) The training of service technicians such as electricians and mechanics to service and maintain an entire range of electrical and mechanical equipment including solar reflectors and generators, boilers and turbine generators, absorption refrigeration plants and milk processing equipment, pumps and motors, and domestic appliances.

In the beginning, the service technicians would have to be made available and financed from a small regional organization. As local talents develop and energy applications multiply, the communities would be able to maintain their own technicians.

If the targets set for the community under reference in table 6 could be realized and seven per cent of the increased earning were to be set aside for service, maintenance and technical training organizations, this community could be almost entirely self-sufficient within a period of three to five years.

Lest it may appear an over simplification of the problem, it would not be out of place to stress that neither technical nor financial and organizational resources are available today to undertake a programme of this magnitude on a world-wide basis. Numerous factors, of economics, religion, customs,

tradition and climatic conditions govern the lives of these communities, and often present insurmountable barriers to the realization of the desired objectives.

All other factors apart, there are many problems of concepts, techniques and equipment yet to be solved before the benefits of the new sources of energy can be brought to the people.

The advances in the generation of thermo-electricity, particularly the development of cheap, high temperature resistant thermo-elements and a small high pressure steam boiler suitable for operation on solar energy and other multi fuel applications would be of special interest to the under-developed areas.

The most practical approach, therefore, would be to organize an experimental station for every fifty million population in different regions of the world. This would enable us to solve some of the outstanding problems of technology under actual conditions of operation, and to study the impact of these changes on the life of these communities.

IN CONCLUSION

An organized attack on world poverty would make tremendous demands of the fast diminishing energy resources of the world. To preserve these resources for the advanced countries which are overly committed to their use would be neither possible nor desirable. It has, therefore, become imperative that the latest advances in energy technology, particularly with regard to new sources of energy, be made available to the under-developed areas. Such a step would preserve the world's thermal capital of fossil fuels for a longer period of time and stop the under-developed countries from moving towards the fast approaching end of a much-travelled road.

In the midst of the rising turbulence of the economic, political and social equalization processes, and in an era of fast growing obsolescence of advanced technologies, the choice of the direction in which the energy development and utilization of the under-developed countries should proceed, becomes a decision of grave responsibility for the men and women of science and technology.

Note. A list of bibliographical references appears on page 76, after the French translation of this paper.

CONSIDÉRATIONS SOCIALES ET ÉCONOMIQUES AYANT TRAIT À LA MISE EN ŒUVRE DE L'ÉNERGIE SOLAIRE DANS LES RÉGIONS SOUS-DÉVELOPPÉES

(Traduction du mémoire précédent)

J. C. Kapur

Air Conditioning Corporation Ltd.

Calcutta

L'homme a dû relever nombre de défis au cours de l'histoire de la civilisation. Aucun d'eux n'est comparable à celui qui nous est lancé aujourd'hui : nous sommes mis en demeure de relever le niveau de vie de plus de deux milliards de citoyens de notre monde !

Bien que même les peuples les plus avancés de ces régions sous-développées soient encore aux prises avec certains des problèmes les plus élémentaires qui se posent à toute société industrielle, nombreux sont ceux, parmi nous, qui s'orientent vers l'âge interplanétaire. Cette ample disparité entre les points de vue et les réalisations fait paraître notre tâche plus invraisemblable encore.

Pendant la période qui a suivi la révolution industrielle, nombreux sont les éléments qui sont venus conditionner le progrès social et matériel de l'homme. L'un des plus importants d'entre eux était sans contredit la force motrice, quant à sa disponibilité, la possibilité de la transformer dans de bonnes conditions et sa mise en œuvre.

La question remonte aux premiers rapports entre le soleil, les plantes et l'homme. Celui-ci consommant 3 000 calories sous forme d'aliments végétaux, convertissait environ un cinquième de ce total en travail mécanique réel. Au stade suivant, on voit l'homme mettre au travail des animaux tels que les chevaux, les bœufs et d'autres, qui, bien que donnant un moins bon rendement de conversion de l'énergie que l'homme, peuvent la fournir sous une forte concentration en cas de besoin. Un grand pas fut réalisé en passant de la mise en œuvre du vent et de l'eau à l'apparition de la machine à vapeur. Si un mineur pouvait extraire chaque jour 400 livres (180 kg) d'un charbon ayant une valeur thermique de 3 500 calories, il produisait 400 fois l'énergie qu'il consommait. Même une fois le charbon transformé en vapeur par un moteur dont le rendement ne dépassait pas 1 p. 100, il fournissait encore une énergie égale à 21 fois celle qui avait effectivement été déployée. Le rendement de la machine à vapeur a poursuivi son augmentation en même temps que la production moyenne de charbon par mineur, si bien qu'il faut aujourd'hui moins d'une livre de

charbon pour produire un kilowattheure d'électricité, alors qu'il y a 60 ans, il en fallait plus de sept. Au cours de cette évolution, le gain net en jours de travail par ouvrier réalisé avec chacun de ces jours a continué à augmenter. La transformation du pétrole et du gaz dans de bonnes conditions de rendement au cours de ces dernières années a encore accru ce taux d'utilisation. Les progrès les plus récents de la conversion thermonucléaire ont ouvert d'amples horizons en ce qui concerne les sources nouvelles d'énergie.

Au cours du siècle dernier, nombre d'éléments, notamment l'émigration de la population vers de vastes régions encore neuves et la dispersion du chômage, ainsi que la conversion de l'énergie dans de bonnes conditions de rendement et la généralisation de sa mise en œuvre ont souvent imposé des mesures protectionnistes et l'accumulation de surplus entre les mains de petits groupes, et contribué à créer des sociétés industrielles développées et grosses consommatrices qui représentent aujourd'hui 30 p. 100 de la population du monde.

CONSOMMATION D'ÉNERGIE EN DIVERSES PARTIES DU MONDE

L'examen des tableaux 1, 2 et 3 indique les positions des pays de diverses catégories en ce qui concerne l'utilisation de l'énergie pour les années 1960, 1975 et 2000 :

a) Pays ou groupes de pays qui sont au stade de l'industrialisation avancée et de la très grosse consommation.

b) Pays qui sont à divers degrés d'insuffisance de développement et s'approchent de l'autonomie économique.

c) Pays retardés qui sont à divers stades de recherches et de planning en vue d'un développement économique continu.

Tableau 1

a) Ainsi qu'on l'observera, les pays du groupe a qui comptent 914 millions d'habitants ou 30,5 p. 100

Tableau 1

Consommation d'énergie en diverses parties du monde qui sont à divers stades de leur développement économique pour l'année 1960

Régions du monde ou pays	Degré de développement économique	Population		Consommation d'énergie		
		Millions	Pourcentage mondial	Par habitant en équivalents de tonnes de charbon	Nombre total de millions de tonnes de charbon	Pourcentage du total mondial
(a) États-Unis d'Amérique . .	Industrialisation poussée ou grosse consommation	184	6,2	8,0	1 450	42,0
Pays de l'OECE, à l'exclusion de la Grèce, de la Turquie et de la Yougoslavie		330	11,0	2,5	830	24,0
URSS et pays d'Europe orientale		300	10,0	1,5	450	13,0
Japon		100	3,3	1,6	160	4,5
		914	30,5	3,15	2 890	83,5
(b) Brésil, Chine, Grèce, Inde, Irak, Pérou, Portugal, Mexique, Espagne, Turquie, Yougoslavie et autres	Sont au stade de leur développement économique ou sont près de sa réalisation	1 500	50,0	0,36	540	15,5
(c) Autres pays d'Afrique, d'Asie et d'Amérique latine	Économies retardataires ou économies qui exigent une préparation considérable en vue d'une croissance accélérée	586	19,5	0,06	35	1,0
	TOTAUX	3 000	100,0	1,16	3 465	100,0

de la population du globe ont consommé, en 1960, 84 p. 100 du total de l'énergie utilisée dans le monde entier.

b) Les pays du groupe *b*, pour une population totale de 1 500 millions ou 50 p. 100 du total mondial consomment approximativement 15,5 p. 100 de l'énergie utilisée dans le monde entier.

c) Les pays du groupe *c*, pour une population voisine de 586 millions d'habitants ou 19,5 p. 100 du total mondial, ne consommeraient que 1 p. 100 de l'énergie utilisée dans le monde.

b) Le groupe *b*, dont la population est de 51,1 p. 100 de celle du monde, consommerait 29,3 p. 100 du total de l'énergie absorbée dans le monde.

c) Le groupe *c*, avec une population de 22 p. 100 de celle de la planète, consommerait 2,5 p. 100 de l'énergie utilisée.

Sur une base mondiale, la consommation d'énergie par habitant, mesurée en équivalents de tonnes de charbon (valeur thermique d'environ 12 000 BTU ou 3 000 grandes calories) sera probablement :

Tableau 2

Le tableau de la consommation d'énergie qui est donné ci-dessus ne se modifiera pas de façon sensible pour l'année 1975.

Tableau 3

En l'an 2000, le groupe *b* passe au stade de l'industrialisation avancée ou de la grande consommation et le tableau général suivant se dégage :

a) Le groupe *a* ayant une population de 26,9 p. 100 de celle du globe, consommerait 68,9 p. 100 du total de l'énergie produite.

Années

1960	1,16
1975	1,56
2000	2,62

Si les prévisions ainsi formulées sont vérifiées, les dépôts connus de combustibles fossiles (évalués à 30×10^{11} tonnes de charbon), en prenant le rythme de consommation probable pour l'année 2000, dureraient moins de 200 ans. Étant donné que le rythme de la consommation entre l'époque actuelle et l'année 2000 sera peut-être encore plus rapide et qu'il faut s'attendre à une accélération de cette consommation pour les régions sous-développées, les dépôts connus

Tableau 2

Consommation d'énergie en diverses parties du monde qui sont à divers stades de leur développement économique pour l'année 1975

Régions du monde ou pays	Degré de développement économique	Population		Consommation d'énergie		
		Millions	Pourcentage mondial	Par habitant en équivalents de tonnes de charbon	Nombre total de millions de tonnes de charbon	Pourcentage du total mondial
a) États-Unis d'Amérique . . .	Stades de consommation considérable	230	5,9	12,5	2 900	48,0
Pays de l'OECE à l'exclusion de la Grèce, de la Turquie et de la Yougoslavie. . .		400	10,0	3,0	1 200	20,0
URSS et pays d'Europe orientale		360	9,0	2,0	720	12,0
Japon.		120	3,0	2,3	276	4,0
		1 110	28,3	4,6	5 096	84,0
b) Brésil, Chine, Grèce, Inde, Irak, Mexique, Pérou, Portugal, Espagne, Turquie, Yougoslavie et autres.	A divers stades au-delà de la croissance économique autonome	2 000	51,2	0,47	940	15,0
c) Autres pays d'Afrique, d'Asie et d'Amérique latine.	Près de l'autonomie économique	800	20,5	0,18	64	1,0
	TOTAUX	3 910	100,0	1,56	6 100	100,0

Tableau 3

Consommation d'énergie en diverses parties du monde qui sont à divers stades de leur développement économique pour l'année 2000

Régions du monde ou pays	Degré de développement économique	Population		Consommation d'énergie		
		Millions	Pourcentage mondial	Par habitant en équivalents de tonnes de charbon	Nombre total de millions de tonnes de charbon	Pourcentage du total mondial
a) États-Unis d'Amérique . . .	Industrialisation avancée et consommation massive	300	5,1	15,0	4 500	29,4
Pays de l'OECE à l'exclusion de la Grèce, de la Turquie et de la Yougoslavie. . .		600	10,2	5,0	3 000	19,6
URSS et pays de l'Europe orientale		520	9,0	4,5	2 350	15,3
Japon.		150	2,6	4,0	600	3,9
		1 570	26,9	6,1	10 450	68,2
b) Brésil, Chine, Grèce, Inde, Irak, Mexique, Pérou, Portugal, Espagne, Turquie, Yougoslavie et autres.	Industrialisation avancée et consommation massive	3 000	51,1	1,5	4 500	29,3
c) Autres pays d'Afrique, d'Asie et d'Amérique latine.	Au-delà du stade du développement économique autonome	1 300	22,0	0,30	390	2,5
	TOTAUX	5 870	100,0	2,62	15 340	100,0

ne dureraient pas plus de 100 ans. En conséquence, au moment où les régions sous-développées réussiront à édifier une armature industrielle autour des sources actuelles d'énergie, ces dernières risqueraient d'être presque épuisées. Ceci sera particulièrement inquiétant si les progrès de la technologie nous permettent d'accélérer le rythme du développement économique au-delà de ce qui semble être possible dans les conditions actuelles.

RÉPARTITION DES DEMANDES D'ÉNERGIE DANS LES PAYS SOUS-DÉVELOPPÉS

Un autre élément qui mérite d'être pris en considération est la nature et la répartition des demandes d'énergie dans les pays sous-développés. A cet égard, on peut prendre l'Inde comme exemple-type d'une économie agricole et minérale. Ainsi qu'on observera d'après les tableaux 4 et 5, au bout de quinze ans d'un développement économique intense, ainsi que celui qui est actuellement envisagé, l'Inde comptera en 1966 environ 350 millions d'habitants, dont 80 p. 100 environ seront établis dans des régions rurales. Même si l'accélération de l'industrialisation se répercutait sur la concentration urbaine, il y aurait, en 1981, 480 millions d'habitants, soit 75 p. 100 du total national qui résideraient encore dans de petites communautés agricoles.

En 1966, 29 500 seulement des 557 000 villages et villes comptant moins de 5 000 personnes disposeraient d'énergie électrique.

La majeure partie des besoins de force motrice dans les communautés rurales serait couverte par du bois et de la bouse de vache. Le gros de l'augmentation de la consommation d'énergie, dans les 20 années à venir, irait aux communautés urbaines, nouvelles et existantes. On évalue, pour 1981, que si 160 millions de nos habitants, soit 25 p. 100 du total, en viendraient peut-être à bénéficier des avantages qu'il y a à disposer de l'équivalent d'une tonne de charbon en énergie par personne, les 75 p. 100 restants, soit 480 millions de personnes, ne consommeraient que 0,28 tonne de charbon par tête.

Ce qui est vrai pour l'Inde, qui s'approche du point de développement économique autonome, est encore plus vrai pour les autres pays arriérés.

Les ressources globales, en capital et en moyens de production, d'une famille habitant une semblable communauté rurale, sont constituées par une cahute ou deux avec une petite cour, quelques charrues tirées par des animaux, d'autres accessoires et son propre travail physique. Les besoins comportent l'alimentation de la famille et du bétail, et un peu de bois ou de bouse de vache comme combustible. Cette famille, dans l'ensemble, est autonome, sauf

Tableau 4

Évolution des proportions respectives des populations urbaine et rurale en Inde

	Population totale en millions	Population en millions		Augmentation en millions au cours des précédentes décennies	
		Villages	Villes	Villages	Villes
1921	248	220	28		
1931	275	242	33	22	5
1941	313	271	43	29	10
1951	357	295	62	24	19
1961	440	350 ^a	90	55	28

SOURCE. — Recensement de 1951.

^a Les chiffres définitifs ne sont pas disponibles au moment de l'établissement des tableaux.

Tableau 5

Villes et villages électrifiés en Inde

Gamme de population	Nombre de villes (recensement de 1951)	Nombre électrifié			
		Mars 1951	Mars 1956	Mars 1961	Mars 1966
Plus de 100 000	73	49	73	73	73
50 000-100 000	111	88	111	111	111
20 000-50 000	401	240	366	399	401
10 000-20 000	856	260	350	756	856
5 000-10 000	3 101	258	1 200	1 800	3 101
Moins de 5 000	556 565	2 792	5 300	15 861	29 458
TOTAL	561 107	3 687	7 400	19 000	34 000

SOURCE. — Projet du troisième plan quinquennal, 1961-1966.

quant au besoin de disposer des services de quelques artisans de village tels que le tisserand, le cordonnier, le maréchal ferrant, le charpentier, le coiffeur et le journalier agricole.

Environ 60 millions de ces familles partagent un revenu rural d'environ 13 milliards de dollars, ce qui ressort à un revenu annuel par habitant de l'ordre de 52 dollars (250 roupies). La productivité du villageois, serait de l'ordre du quart de celle d'un ouvrier de mine ou d'usine.

Dans la majeure partie de ces communautés, la surface nette moyenne utile cultivée par habitant est inférieure à une acre (0,4 hectare). Dans certaines parties de la Chine, on tombe à un quart ou un tiers d'acre par tête (0,10 ou 0,13 hectare), en Indochine à 0,6 acre (0,24 hectare). La ferme moyenne aux États-Unis d'Amérique dépasse 200 acres (80 hectares) pour trois personnes au travail.

Le développement de la population rurale vient réduire davantage les dimensions des fermes. La répartition de la terre parmi les locataires ne permet pas d'envisager l'apparition de conditions se prêtant à l'intensification du programme d'électrification rurale. L'énergie humaine prend souvent l'aspect d'un facteur économique essentiel, dans de semblables communautés, et la population se multiplie au point où il lui est impossible de produire assez pour elle-même. Les fermes coopératives, en unités de 25, 50 ou 100 acres (10, 20 ou 40 hectares), et l'utilisation des méthodes de la culture intensive avec une augmentation de la consommation d'énergie du pays, exigeraient la création d'emplois pour des millions de travailleurs en surnombre.

Dans une situation telle que celle-ci, il se pourrait que l'ensemble du processus de transformation pacifique des économies rurales qui sont actuellement en stagnation, dépende de la manière dont on réussirait à augmenter la productivité agricole, sans créer de chômage technologique.

L'industrialisation intense soumet les communautés urbaines à l'action directe des progrès technologiques et, malgré tous les problèmes sociaux que ceci entraîne, elle nous aide à créer un noyau de spécialistes, conformément à la tendance générale des pays avancés.

Dans les communautés rurales, au contraire, la mise en œuvre de l'énergie, avec les transformations socio-économiques qui s'ensuivront probablement, pourra être de nature à susciter des dérangements dans la vie de la communauté et à les incorporer dans le tourbillon des forces nationales et internationales (qui ne sont pas toujours désirables).

L'utilisation de l'énergie, dans ces communautés, doit donc être locale, ou tout au plus régionale. L'intensité de la consommation d'énergie et le régime de son utilisation doivent être déterminés, d'une communauté à l'autre, suivant la population, les besoins de l'agriculture, les disponibilités en spécialisations trouvées sur place et la possibilité d'assurer des marchés pour les produits. Toutes ces conditions seront remplies au mieux par la fourniture d'énergie

en petites quantités et le nombre des unités productrices pourra être multiplié suivant les besoins.

AVANTAGES DE L'ÉNERGIE SOLAIRE

Ce qu'il y a de plus important, en ce qui concerne l'utilisation de l'énergie solaire, c'est qu'elle représente la source la plus abondante d'énergie qui soit connue de l'homme et qu'elle est susceptible de durer aussi longtemps qu'on puisse le concevoir. Les générations à venir ne se trouveront pas devant les situations auxquelles nous avons à faire face aujourd'hui si on met l'énergie solaire au travail.

Pour les pays sous-développés, l'énergie solaire joue un plus grand rôle dans leur vie quotidienne que toute autre source d'énergie. La technologie moderne des transformations de l'énergie, telle que nous la connaissons aujourd'hui, n'est pas compréhensible pour eux. La mise en œuvre de l'énergie solaire, plus que toute autre, pourra permettre de surmonter les obstacles mentaux qui nuisent le plus souvent à l'adoption des techniques modernes.

L'examen serré des efforts faits sur le plan des recherches et du développement dans le monde entier met en lumière que les plus grands progrès ont été faits, sont en cours de réalisation et seront probablement faits dans le domaine de l'utilisation de l'énergie en quantités relativement modiques. Cette caractéristique s'adapte particulièrement bien à la satisfaction des besoins des régions sous-développées et au régime des économies rurales. Les petits groupes sont adaptables aux besoins propres à chaque communauté et on n'aura presque pas besoin d'automatiser, en raison de la disponibilité d'un surplus de main-d'œuvre.

La disponibilité, l'intermittence et la mise en réserve sont quelques-unes des considérations importantes ayant soulevé des questions pour les scientifiques et les ingénieurs en ce qui concerne l'utilisation de l'énergie solaire. Quant à l'incidence du rayonnement solaire ou la disponibilité d'énergie solaire, il est particulièrement intéressant d'observer que, si on laisse quelques cas spéciaux de côté, la presque totalité d'environ 2 000 millions d'habitants des régions que nous appelons actuellement « sous-développées » résident dans la zone limitée par les trentièmes parallèles, de chaque côté de l'Équateur, avec une beaucoup plus grosse concentration au nord. D'autre part, le revenu annuel moyen par personne de la masse de cette population est inférieur à 100 dollars. Bien que cette configuration soit un peu faussée par l'existence de ressources du sous-sol, dans certaines régions, le fait d'être près de l'Équateur et dans un pays chaud semble avoir quelque rapport avec l'exiguïté des revenus individuels. Ce régime est encore confirmé par la montée progressive des revenus, de l'Europe du sud à celle du nord.

La quantité de rayonnement, céleste et solaire, qui parvient effectivement à la terre dépend de nombre d'éléments tels que la position du soleil,

la saison, l'inclinaison du plan considéré et la hauteur du poste, le milieu et la présence de nuages de poussière et d'humidité dans l'atmosphère. Il faudrait un planning considérable et une organisation serrée pour obtenir des renseignements plus précis sur toutes ces régions, mais les évaluations faites jusqu'à présent indiquent que certaines des grandes zones de concentration des populations rurales reçoivent plus de 600 petites calories de rayonnement solaire par centimètre carré et par jour. Au surplus, nombre des pays d'Asie, d'Afrique et d'Amérique latine sont particulièrement pauvres, par habitant, en combustibles fossiles et en ressources hydro-électriques (1).

Dans les communautés rurales situées dans les régions sous-développées où d'importantes fractions de la population restent partiellement ou totalement sans emploi, les problèmes de l'intermittence et de la mise en réserve perdent la majeure partie de leur sens. Est-il très important d'avoir du soleil ou du travail tous les jours, sauf les dimanches et les jours de fête? Pourquoi devons-nous appliquer les points de vue et les considérations économiques propres aux sociétés avancées dans une situation où ceux-ci ne sont nullement justifiés? Ce qu'il faut faire, c'est créer des conditions propices au travail et à l'effort productif dans toute la mesure du possible, dans le cadre des limites actuelles des programmes de recherche et de mise au point.

Si on fait bon marché de l'aspect économique de la question, même dans les conditions existantes, il doit normalement être possible de créer des emplois en se servant de nouvelles sources d'énergie 200 ou 300 jours par an dans la plupart des pays sous-développés. Si donc, au cours des 25 années à venir, nous pouvons établir un régime bien défini et assurer une intégration satisfaisante et fructueuse des nouveaux points de vue relatifs à l'énergie dans la vie de ces communautés, on aura, d'emblée, fait un grand pas en avant. L'intermittence même des nouvelles sources d'énergie continuera peut-être à servir de tampon contre les premières répercussions, pendant qu'on s'attache à résoudre les problèmes ayant trait à la mise en réserve de cette énergie et à évaluer les répercussions sociales et économiques d'une mise en œuvre, même partielle, de la force motrice ainsi produite.

BESOINS ÉNERGÉTIQUES POUR LE DÉVELOPPEMENT D'UNE COMMUNAUTÉ RURALE

C'est dans le contexte présenté ci-dessus et en comprenant bien que les conditions qui, il y a des siècles, sont venues activer l'apparition et le développement pas à pas, complexe et progressif des sociétés industrielles avancées d'aujourd'hui, ne peuvent pas être reproduites, qu'il nous faut envisager les besoins énergétiques d'une communauté rurale dans un pays sous-développé.

Le tableau 6 comporte une analyse de ces besoins énergétiques pour une telle communauté, en Inde.

On s'est efforcé de tenir les exigences au minimum et de les grouper sous deux grandes rubriques :

a) Exigences imposant une fourniture continue d'énergie ou pour la satisfaction desquelles la mise en réserve de l'énergie est chose souhaitable ou absolument nécessaire et en raison desquelles les sources d'énergie solaire doivent nécessairement être complétées par des combustibles fossiles jusqu'à ce que l'on mette au point des techniques de mise en réserve. Ces applications ne provoqueraient pas de chômage technique;

b) Exigences qui sont à peu près insensibles à l'intermittence de l'apport d'énergie, dont on doit se servir pour élargir les bases économiques de la communauté. En d'autres termes, on augmenterait la consommation et la productivité des articles servant à satisfaire les besoins quotidiens, on créerait des marchés plus larges pour les produits du travail de la communauté et on faciliterait l'établissement de conditions dans lesquelles de nouveaux points de vue sur l'alimentation, la manière de vivre et l'occupation de loisirs se feraient jour. Cette application de l'énergie pourrait entraîner des transformations sociales et économiques profondes dans la vie de la communauté, sans que l'intermittence des nouvelles sources d'énergie ait une grande importance.

Cette communauté serait-elle une unité autonome, une partie d'un projet de développement ou un élément d'un système industriel complexe? Tout ceci dépendrait de son emplacement, des disponibilités en spécialistes et du voisinage des grosses industries.

a) Applications qui exigent une fourniture continue d'énergie

Tout d'abord, dès qu'on aurait besoin d'une fourniture continue d'énergie, on pourrait mettre au point un système approprié pour utiliser l'énergie solaire au maximum. Après le coucher du soleil, ou pendant les jours nuageux, on pourrait mettre en œuvre le pétrole, le charbon, la lignite, le bois ou tout autre combustible disponible sur place à des prix économiques.

La figure 1² donne un schéma d'un tel système dans lequel :

i) L'énergie solaire, ou 40 à 50 kilogrammes de combustible par heure (valeur thermique : 7 000 grandes calories) peut être utilisée pour produire 300 kilogrammes par heure de vapeur à haute pression;

ii) Au premier stade, on se sert de la vapeur pour produire 25 kilowatts d'énergie électrique à l'aide d'une turbine ou d'un moteur à vapeur;

iii) On emploie ensuite 100 kilogrammes de vapeur détendue à basse pression (1,5 atm.) pour produire 10 000 grandes frigories de réfrigération par absorption sous forme de refroidissement par la saumure et de mise en réserve à froid, avec possibilité d'une

² Voir le texte anglais, page 65.

Tableau 6

Évaluation de l'importance et de la nature des exigences énergétiques correspondant à l'augmentation de la productivité et du revenu par personne dans une communauté rurale en Inde

Hypothèses :

Population : hommes adultes, 302; femmes, 298; enfants et vieillards, 400; total : 1 000.
 Surface approchée du terrain à irriguer : 1 000 acres environ (400 hectares).
 Consommation de lait, à raison de 2 livres par personne : 2 000 livres par jour.
 Production attendue de tissu pour emplois sur place et vente à l'extérieur de la communauté : 20 000 yards par an.
 Fourniture ménagère d'eau : 10 000 gallons par jour.
 Éclairage des maisons et des rues, 15 watts par personne : 15 kilowatts au total.

<i>Application de l'énergie ou charge</i>	<i>Forme la plus adaptable d'énergie</i>	<i>Base de l'évaluation et charge correspondante</i>	<i>Exigences énergétiques annuelles</i>	<i>Emplois créés (+) ou chômage technique (-)</i>	<i>Investissements évalués par personne au titre du matériel de travail (roupies)</i>	<i>Méthodes possibles d'utilisation de l'énergie</i>
a) Applications qui exigent une fourniture continue d'énergie						
Cuisine	Solaire/électricité/gaz / charbon/ bois	0,6 kW par famille : 120 kW	65 700 kWh			Employer l'énergie solaire, complétée par le bois, le charbon, le lignite ou le pétrole. Production de vapeur à haute pression (300 kg à 22 atm.); utiliser cette vapeur pour produire 25 kW d'énergie électrique; 200 kg de vapeur à 1,5 atm. vont au bouilleur pour donner 2 500 kg d'eau à 85 °C et les 100 kg de vapeur qui restent à 1,5 atm. fournissent de l'énergie pour la réfrigération; 45 kg de combustibles ont un contenu thermique de 7 000 calories consommés à l'heure et complétés par l'emploi de l'énergie solaire ^a .
Fourniture ménagère de l'eau	Électricité	10 000 gallons / jour : 3 kWh	6 000 kWh			
Éclairage des maisons et des rues	Électricité	15 W par personne : 15 kW	21 900 kWh			
Traitement du lait, des fruits, des légumes, du poisson, des graines et des pommes de terre	Électricité / vapeur	Pompes et autres services : 7 kW 10 000 kcal/h de réfrigération, 1,5 atm. 100 kg de vapeur/h	35 000 kWh 200 × 10 ⁶ kcal	+ 20	5 000	
Service d'eau chaude pour le lait, la réfrigération et autres usages.	Vapeur	2 500 kg d'eau à l'heure de 45 à 85 °C, 200 kg/h de vapeur à 1,5 atm.	400 × 10 ⁶ kcal			
b) Applications où l'intermittence n'est pas bien importante						
Irrigation.	Électricité	10 kW pour 300 acres : 30 kW	40 000 kWh			Petit générateur solaire de 10 à 15 kW de préférence du type thermo-électrique, qui fonctionne pendant la période ensoleillée seulement, dont on devra être satisfait jusqu'à ce que l'on mette au point les techniques d'emmagasinage.
Manutention des produits agricoles tel que le décorticage du riz, matériel de 2 à 20 ch.	Électricité	Moyenne 5 kW par homme : 30 kW	22 500 kWh	+ 20	5 000	

Tableau 6 (suite)

Application de l'énergie ou charge	Forme la plus adaptable d'énergie	Base de l'évaluation et charge correspondante	Exigences énergétiques annuelles	Emplois créés (+) ou chômage technique (-)	Investissements évalués par personne au titre du matériel de travail (roupies)	Méthodes possibles d'utilisation de l'énergie
Tissages des produits textiles	Électricité	Métier de 0,8 kW : 8 kW	10 000 kWh	+ 10	6 000	La mise au point réussie d'une telle unité constituerait un grand pas en avant. Pour commencer, l'énergie pourrait servir à l'irrigation seulement, puis son application serait élargie peu à peu pour couvrir d'autres besoins.
Fabrication de matériaux de construction, tels que briques, tuiles, charpentes, quincaillerie et autres petites industries	Électricité	Moyenne 1 kW par machine : 20 kW	20 000 kWh	+ 25	3 000	
	TOTAUX	113 kW ^b	165 400 kWh ^b	+ 75	5 000 (moyenne)	

* Application utilisée dans les fermes de l'URSS. Source. — Danilov, *Centrales de refroidissement ou de rafraîchissement à absorption pour les petites installations agricoles* (Moscou, 1957).

^b Ceci ne comporte pas la charge nécessaire pour la cuisine, la réfrigération par absorption et les services d'eau chaude.

mise en réserve de l'énergie dans des accumulateurs à froid;

iv) 200 kilogrammes à l'heure de vapeur d'échappement (1,5 atm.) sont utilisés pour porter la température de 2 500 kilogrammes d'eau de 40 à 85 °C à l'heure. Cette eau pourrait satisfaire les besoins en eau chaude d'un procédé de pasteurisation, de lavage des bouteilles et autres applications;

v) L'importance et la manière d'utilisation de la vapeur d'échappement en basse pression, dont il est question aux sous-paragraphe iii et iv ci-dessus, pourraient être modifiées pour faire face aux diverses modalités d'exigences quant au refroidissement, pour les services d'eau chaude et autres applications dans les diverses communautés;

vi) Les colonnes 3 et 4 du tableau 6 donnent un bilan énergétique des applications considérées, ainsi que la manière dont 25 kilowatts d'énergie électrique pourraient être employés à certains services essentiels;

vii) Un système complexe, tel que celui qui est présenté ci-dessus, donne un fort coefficient d'utilisation de l'énergie.

b) Applications qui n'exigent pas une fourniture continue d'énergie

i) La section b du tableau 6 souligne les situations dans lesquelles, pour les raisons expliquées plus haut, l'intermittence de la fourniture d'énergie n'est pas un grave désavantage. Ainsi qu'on pourrait l'observer, ces besoins seraient satisfaits dans les meilleures conditions possibles en utilisant une série de petits générateurs électriques de 10 à 15 kilowatts pour des applications telles que l'irrigation, la fourniture ménagère de l'eau, le traitement des textiles, la

fourniture de courant à des centres où l'on traite les produits agricoles, par exemple pour le décorticage du riz, les moulins à farine, l'extraction des graines et de l'huile, etc.

ii) Ceci pourrait être suivi par la création d'un complexe industriel autour des matériaux de construction et du bâtiment. Pour ceux qui travaillent à leur compte dans les communautés rurales, l'amélioration réalisée à pied d'œuvre relèverait également les conditions de vie et faciliterait la création d'emplois;

iii) La réponse à l'ensemble de la question réside dans la disponibilité d'un générateur électrique à bas prix. Les progrès récemment faits dans le domaine de la thermo-électricité semblent offrir le plus de promesses. On signale des températures de conversion d'énergie de l'ordre de 600 et 800 °C et des prix ne dépassant pas 200 à 300 dollars par kilowatt installé. Pour autant que les dimensions de l'unité de production ne jouerait pas un rôle important dans le coût d'établissement des générateurs thermo-électriques par kilowatt, cette même thermo-électricité se prêterait idéalement à la couverture des besoins des communautés sous-développées.

CONSIDÉRATIONS PRATIQUES ET FINANCIÈRES

La question qui vient tout naturellement à l'esprit est celle des avantages socio-économiques que ces communautés pourraient retirer de l'adoption des nouvelles sources d'énergie. Combien coûterait un pareil plan et quels sont les problèmes technologiques qui devraient être résolus pour l'exécuter?

On observe que la mise en service des métiers mécaniques en remplacement des métiers à main, permet, en utilisant 1 kilowattheure d'énergie élec-

trique, d'ajouter 1,25 roupie à la valeur de la matière première, en sus de ce que l'on pourrait faire avec un métier à main. Les mêmes chiffres pour certaines des autres industries telles que le génie civil léger, les matériaux de construction, le traitement de la laine, la fabrication du savon, le décorticage du riz, etc., sont de l'ordre de 2 à 7 roupies par kilowattheure utilisé. Si on prend la moyenne raisonnable d'une addition de 2 roupies par kilowattheure consommé et si on ne tient pas compte de l'utilisation directe de la chaleur solaire et de la vapeur, il sera fondé de s'attendre à avoir une augmentation générale du revenu par habitant de cette communauté, directement attribuable à la mise en œuvre de l'énergie électrique, de 330 roupies (66 dollars).

Ce chiffre repose sur une production d'énergie, par habitant, de 155 kilowattheures par an (tableau 7).

Tableau 7

Bilan comparatif de l'énergie installée et produite par personne pour la communauté rurale suggérée

	Par personne	
	Puissance installée (kilowatts)	Énergie produite (kilowattheures par an)
Communauté rurale décrite au tableau 6	0,113	155
Inde	0,01	22
Japon	0,15	732
États-Unis	0,72	3 900

Les frais d'investissements au départ, quand on entreprend un projet de cette nature, dépendent de la nature et de l'importance des diverses industries et des spécialisations artisanales à développer, avec des variations considérables d'une communauté à l'autre. Si on prend un chiffre moyen par habitant de 7 000 roupies pour l'énergie et le travail nécessaires pour les personnes employées directement, les investissements totaux en capitaux à effectuer seraient de l'ordre de 500 000 roupies (100 000 dollars). Sur la base de la communauté, ceci correspondrait à un placement par tête de 100 dollars seulement. Si on admet que 1 500 millions des habitants du globe auraient besoin d'une telle aide, les dépenses totales seraient de l'ordre de 150 à 200 milliards de dollars. Pour une période de 20 à 30 ans, ceci ne dépasse pas les ressources des sociétés riches du monde.

Il n'est ni possible, ni recommandable de faire disparaître des siècles de disparité technologique en quelques années. Relativement parlant, la tâche constituée par la mise en œuvre de l'énergie dans ces communautés serait moins colossale si, comme premier pas, son utilisation se bornait à son intégration dans les spécialités artisanales de la communauté pour lesquelles on peut se procurer des marchés extérieurs. Les avantages économiques d'emblée manifestes, représenteraient un pas en avant considérable. Les progrès réalisés dans l'élevage des animaux et la fourniture de lait prérafraîchi, de légumes et d'autres articles de consommation aux communautés

urbaines du voisinage aideraient à transmettre une fraction des avantages d'un grand développement industriel aux régions rurales et contribueraient à l'élargissement des domaines d'utilisation de l'énergie.

Les spécialisations techniques exigées pour rendre l'utilisation de l'énergie possible tomberaient dans deux catégories :

a) La formation de techniciens qui pourraient exercer leurs talents spécialisés avec des machines actionnées par une force motrice appropriée;

b) L'entraînement de techniciens chargés de l'entretien du matériel, tels les électriciens et les mécaniciens, qui assureraient cet entretien pour la totalité du matériel électrique et mécanique, notamment celui des réflecteurs et des générateurs solaires, des bouilleurs et des turbo-générateurs, des centrales de réfrigération par absorption et du matériel de traitement du lait, les pompes et les moteurs et les articles domestiques.

Pour commencer les techniciens chargés de l'entraînement doivent être mis à la disposition d'une petite organisation régionale et être financés par elle. Une fois l'inertie initiale vaincue, une fois que l'artisanat local se développe et une fois que les applications de l'énergie se multiplient, les communautés seront en mesure d'avoir leurs propres techniciens.

Si les buts que la communauté se fixe, mentionnés au tableau 6, peuvent être réalisés et si 7 p. 100 des augmentations de gains sont mis de côté pour l'entretien et les organisations d'entraînement technique, la communauté pourrait être presque totalement autonome au bout de trois à cinq ans.

Dans l'hypothèse où ceci semblerait une simplification exagérée du problème, il ne serait pas injustifié de souligner que ni les ressources techniques, ni les ressources financières, ni celles de l'organisation, ne sont disponibles aujourd'hui même pour commencer la mise en œuvre d'un programme de cette ampleur sur une base mondiale. Nombre de facteurs ayant trait à l'économie politique, à la religion, aux coutumes, à la tradition, et au climat régissent la vie de ces communautés et constituent souvent des barrières insurmontables pour la réalisation des objectifs cherchés.

Tous autres éléments mis à part, il y a nombre de problèmes, quant aux conceptions, aux techniques et au matériel, qu'il faut encore résoudre pour fournir les avantages de ces nouvelles sources d'énergie au peuple.

Les progrès de la thermo-électricité, particulièrement la mise au point de thermo-éléments à bon marché capables de résister aux températures élevées et un petit bouilleur à vapeur à haute pression qui se prête à son utilisation avec l'énergie solaire, et diverses autres applications de multiples combustibles seraient d'un intérêt particulier pour les régions sous-développées.

La technique la plus pratique, en conséquence, serait l'organisation d'un centre expérimental pour chaque cinquantaine de millions de personnes dans

diverses régions du monde. Ceci permettrait de résoudre certains des problèmes les plus pressants de la technologie dans les conditions réelles d'exploitation et d'étudier les répercussions des progrès obtenus sur la vie de ces communautés.

CONCLUSION

Une offensive concertée contre la pauvreté, dans le monde entier, soulèverait de grosses exigences quant aux ressources d'énergie du monde, qui vont en diminuant rapidement. Protéger ces ressources, pour les pays avancés qui dépendent beaucoup de leur emploi, ne serait ni possible, ni désirable. En conséquence, il est devenu impératif que les derniers progrès de la technologie de l'énergie, particulière-

ment en ce qui concerne les nouvelles sources de cette dernière, soient mis à la disposition des pays sous-développés. Une telle mesure protégerait le capital thermique mondial de combustibles fossiles pendant plus longtemps et empêcherait les pays sous-développés de s'orienter vers la fin d'une route très parcourue, fin qui s'approche rapidement.

Au milieu de la turbulence croissante des processus d'égalisation économique, politique et sociale dans une ère où les technologies avancées deviennent rapidement surannées, le choix de la direction dans laquelle le développement et l'utilisation de l'énergie des pays sous-développés doivent s'orienter est une décision qui pose une grave responsabilité pour les scientifiques et les technologues qui se réunissent ici aujourd'hui.

RÉFÉRENCES

- (1) United Nations. Department of Economic and Social Affairs. Per capita endowment in conventional energy resources. Economic applications of atomic energy; power generation and industrial and agricultural uses. United Nations publication, Sales No.: 57.II.B.2. 108 pp.
- (2) Association for Applied Solar Energy. Proceedings, world symposium on applied solar energy, held at Phoenix (Arizona), United States, 1-5 Nov. 1955. Stanford Research Institute, Menlo Park (California), 1956. 304 pp.
- (3) UNESCO. Arid zone research. Wind and solar energy; proceedings of the New Delhi symposium [1954]. UNESCO, 1956, Ref. No.: NS.55.III.7.AFS. 304 pp.
- (4) United Nations. Department of Economic and Social Affairs. New Sources of energy and economic development. United Nations publication, Sales No.: 57.II.B.1. 150 pp.
- (5) F. Daniels and J. A. Duffie (editors). Solar energy research. Madison, University of Wisconsin Press, 1955. 290 pp.
- (6) United Nations. Department of Economic and Social Affairs. World Economic Survey 1959. United Nations publication, Sales No.: 60.II.C.1. 300 pp.
- (7) United Nations. Department of Economic and Social Affairs. Economic Development in Africa, 1956-1957. United Nations publication, Sales No.: 58.II.C.3. 97 pp.
- (8) United Nations. Department of Economic and Social Affairs. Financing and Housing and community improvement programmes. United Nations publication, Sales No.: 57.IV.1. 61 pp.
- (9) Norman L. Gold. Regional economic development and nuclear power in India. (Reports on the productive uses of nuclear energy, 4). Washington, National Planning Association, 1957. 132 pp.
- (10) Norman Lansdell. The atom and the energy revolution. New York, Penguin Books, 1958. 200 pp.
- (11) Japan. Economic Survey of Japan (1956-1957). Tokyo, Economic Planning Agency, [1957?]. 352 pp.
- (12) New long-range economic plan of Japan (FY1958-FY1962). Tokyo, The Japan ECAFE Association [1958?]. 196 pp.
- (13) J. E. Aronin. Climate and architecture. New York, Reinhold, 1953. 304 pp.
- (14) A. F. Joffe and L. S. Stilbans. Physical problem of thermoelectricity. Leningrad, Academy of Science.
- (15) F. W. Hutchinson. Thermodynamics of heat-power systems. Reading (Mass., United States), Addison-Wesley, 1957. 490 pp.
- (16) W. W. Rostow. The stages of economic growth; a non-communist manifesto. Cambridge University Press, 1960. 178 pp.
- (17) India. Third five year plan; a draft outline. New Delhi, Government of India Planning Commission, 1960. 265 pp.
- (18) W. F. Cottrell. Energy and society; the relation between energy, social change, and economic development. New York, McGraw-Hill, 1955. 330 pp.
- (19) India. Report of the village and small-scale industries; second five year plan. New Delhi, Government of India Planning Commission, 1956. 130 pp.
- (20) United Kingdom. Community development; a handbook, prepared by a Study Conference on Community Development held at Hartwell House, Aylesbury, Buckinghamshire, Sept., 1957. London, Colonial Office, 1958. 84 pp.

PROBLEMS OF ENERGY SUPPLY IN UNDER-DEVELOPED COUNTRIES WITH SPECIAL REGARD TO NEW SOURCES OF ENERGY

(Original text : German *)

Herbert F. Mueller, Professor of Energy Economy

Technische Hochschule

Karlsruhe, Federal Republic of Germany

INTRODUCTION

The utilization of "new energy sources" is feasible especially where an economic application of conventional energy sources meets with difficulties. This applies mainly to certain under-developed countries. As will be shown in this paper, however, the technical range of application of new energy sources is limited. Experiences acquired elsewhere cannot be generalized. Above all, it must be kept in mind that the requirements of the various countries are, indeed, very different. We read of so many misconceptions and erroneous opinions in this respect as well as in regard to the planning of energy supply to under-developed countries that it is necessary first to answer the following questions:

What is "an under-developed country"?

What is "to be developed"?

In which order should the various problems and duties be tackled?

Following that, the usual criteria for the reasons of energy consumption and the planning of energy supply should be examined and, finally, the question to what extent non-conventional energy sources can be used within the assistance programmes for under-developed countries should be answered.

I. WHAT IS AN "UNDER-DEVELOPED COUNTRY"?

As long as we have had assistance to under-developed countries, attempts have been made to define what is actually meant by "under-developed" countries. In an address entitled "The need for atomic energy in the under-developed countries", delivered in Geneva on 5 September 1958, at the Second International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy, Dr. H. J. Bhabha said that a country is called eligible for development if the standard of living of its people is low compared with the standard which could be obtained by a production corresponding to the present state of science and engineering. A quantitative expression of the living standard is the per capita income of

the population. But what is the per capita income of the population? National income is a statistical conception. It is the total of all income arising from work and property in the country plus income obtained in foreign countries, minus goods and services supplied to foreign countries. Thus, the "national income" is identically equal to the "net national product at factor cost".¹

Since the definition of national income is so difficult and varies so much from one country to the other, it is impossible, under present conditions, to transform the relevant economic factors into a certain currency or compare them with each other. It cannot be done because of the great differences, in the various countries, in such factors as the way of life, prices for goods and the demand for them, but particularly the total amount of investments, including savings, and also government expenditures for administration, public building projects and national defence. It is therefore not possible to arrive at comparable conceptions and, thereby, comparable figures, simply by dividing the national income by the number of the population. In a recent book on the role of energy in development policy A. Ghanie Ghaussy states quite rightly that it is most difficult to find, in view of the many different conditions in the individual countries or areas concerned, a definition for "under-development" which takes all relevant factors into account, and all efforts to do so have so far met with practically no success.² He is also right in pointing out that the term *Entwicklungsländer* ("countries in development"), which is preferred in Germany to the term *unterentwickelte Länder* ("under-developed coun-

¹ This national income, however, is calculated in different countries in different ways. The definitions given here were recommended by the Organisation for European Economic Co-operation (OEEC) to its members and are quoted from the Statistical Yearbook for the Federal Republic of Germany for 1960. By adding indirect taxes and deducting subsidies, we obtain the "net national product at market prices". Again adding to this the amount of depreciations, we obtain the "gross national product at market prices", i.e. the total of private consumption, state consumption, capital expenditure and exports minus the imports of goods and services. "Gross national product" is often equated with "national income".

² A. Ghanie Ghaussy, *Die Rolle des Energiesektors in der Entwicklungspolitik* (Cologne, Westdeutscher Verlag, 1960).

* This text is a slightly modified version of the translation presented at the Conference.

tries”), is rather biased and therefore not generally valid. On the basis of relevant literature,³ he sets forth seven factors that are applicable, wholly or in part, to the countries or areas in question:

- (a) Predominant monoculture;
- (b) Overpopulation;
- (c) Under-development in the sense that the production potential is not much, or at least not fully, utilized;
- (d) Technical backwardness;
- (e) Low adaptability;
- (f) Lack of capital;
- (g) Many-sided economic and political dependence.

Most of the authors, however, do not sufficiently take into consideration the notion that “assistance to under-developed countries” is by no means the same as “industrialization”.⁴ When President Truman, in his inaugural address before the Congress of the United States in 1949, presented a programme of technical assistance, he said that “our aim should be to help the free peoples of the world, through their own efforts, to produce more food, more clothing, more materials for housing, and more mechanical power to lighten their burdens”. Bruecher quotes President Truman’s message in his paper and goes on to say: “The logical conclusions that can be drawn from this have so far hardly been translated into action... that is to say, in the form of advice on the improvement of cultivation methods, the supply of modern farm machinery, and so on. On the other hand, everybody gives great effort to the building of industrial super-plants, as if irresistibly drawn to it. The greater part of all financial assistance has benefited such activities, while the peasant in the under-developed countries works his field now as always with a wooden plough and draws water by hand...”

As another author, Manfred Siebker, points out:⁵ “the influence of western civilization on the under-developed countries has had four consequences:

- “(a) They became acquainted with nationalistic ideas previously unknown to them;
- “(b) Hygiene and medical science brought about a sharp decline in the death rate, without a corresponding decline in the birth rate;

³ See especially G. M. Meier and E. Baldwin, *Economic Development, Theory, History, Policy* (New York, John Wiley, 1957) and R. Nurkse, *Some Aspects of Capital Accumulation in Under-developed Countries* (Cairo, 1952).

⁴ This is stressed with great emphasis by Max Bruecher in his paper “Das Doppelgesicht der Entwicklungshilfe” (The two sides of development assistance), in *Mitteilungen der List-Gesellschaft*, 1961, No. 2.

⁵ “Die Möglichkeit der Atomkerntechnik für die beschleunigte wirtschaftliche Entfaltung von Entwicklungsländern” (The possibilities of nuclear science for the rapid economic development of under-developed countries), in *Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen*, No. 870 (Cologne, Westdeutscher Verlag, 1960).

“(c) The standard of living became the yardstick by which they measured human life;

“(d) Because of the closer contact between the peoples brought about by technical advances, the peoples of the under-developed countries became increasingly conscious of the discrepancy between their standard of living and that in the industrialized countries.

“The combination of these four consequences has resulted in a political pressure which can be, or may eventually become, of decisive importance in the present period of East-West tensions.”

Nevertheless, it should be possible to convince the leading officials in the under-developed countries of the advantages of sound assistance programmes, adapted to the conditions of the different countries. In his book *Energie in Westeuropa*⁶ the present author repeatedly stressed the point that the economic structure of a country depends not only on its mineral resources and its climate but also on the character, intelligence, industry and state of development of its population. It cannot be a sound policy to establish large factories or industrial works in a country if its people have little aptitude for industrialization. This has already been found in some areas of southern Europe. Bruecher, again, considers the establishment of the infra-structure to be the foundation of any development assistance and suggests that the first step should be to spread knowledge and information, the second to develop the country by irrigation projects, roads and other means of communication.

He then goes on to recall the great political economist, Friedrich List, who, when asked more than a hundred years ago for the origin of wealth, gave the following answer: “What else can it be than the genius animating the human beings, the social order stimulating their activities, the natural forces at their command.” Referring to this quotation, Bruecher continues: “As these three factors — talent, social order and natural forces — are either non-existent or variable, however, the results of any attempts at industrialization must accordingly be either negative or different from case to case. Hence it follows that only a few of the young nations will reach the ultimate goal, namely, wealth by industrialization, even if the western Powers or the Soviet Union should continue to invest billions of dollars in them. Consequently, many of the under-developed countries will never get beyond the stage of an agrarian State, which, of course, is no reason to regard them as inferior. A highly developed agrarian State is just as important for the world economy as a highly developed industrial State.”

These considerations lead to the following conclusion: if an attempt to classify countries eligible for development assistance can be made at all, a classification according to the value of the national product must be just as inadequate as the frequently used break-down into geographical groups. Neither

⁶ München-Gräfelfing, Technischer Verlag H. Resch, 1961.

can be discarded entirely, but they conceal the essential factors. What is needed is an analysis of the character of the people in question, the economic structure, the climate, the condition of the soil and the physical accessibility of the country concerned.

These facts should be the first consideration when we speak of the role of energy supply in under-developed countries.

II. PROBLEMS OF ENERGY ECONOMY IN UNDER-DEVELOPED COUNTRIES

In the previously quoted message, President Truman mentioned the supply of "mechanical power" as one of the possible means of assistance to under-developed countries. Ghaussy begins his book referred to above by recalling the well-known words of Lenin, "Soviet power is communism plus electricity", and goes on to say that "this statement could also be used as a still-valid expression for the extent to which industrialization and, thereby, economic and political power are connected with energy". Again, it becomes evident that different conceptions must be kept clearly apart. That applies not only to development assistance and industrialization, about which, I think, everything necessary has been said in the previous chapter, but also to such terms as "mechanical energy", usually referred to as "power", "electricity" or "energy" in the comprehensive meaning of the word. President Truman meant primarily that human productivity should be increased by a sufficient supply of energy.

This aim is often said to be the same as the replacement of manual work by machines, or, in other words, mechanization through technically produced "power". This is not only done by electric motors. In transportation and agriculture, internal combustion engines predominate, mostly as the motive force for passenger cars and trucks, auto-rail cars and locomotives, tractors, mowing machines, harvesters, and so on. "Energy supply" means, however, much more than just a replacement of manual work. In technically highly developed countries, electric motive power accounts for only a little more than half of the total electricity consumption. The rest is used for heating, metallurgical and chemical purposes. In decidedly hydroelectric countries like Norway, the three latter uses even preponderate over the use of electricity for the production of mechanical energy. In relation to the total energy demand in the highly industrialized countries of the temperate zone, the energy demand for mechanical purposes diminishes to 10 to 15 per cent of the total demand. From 85 to 90 per cent are used for the production of heat, about one-third of which is for space heating. Trying to classify the energy demand by causes, we are faced again—as in the previous chapter—with the difficulty of making demand forecasts based on concrete statistics.

It follows from the foregoing that the economic and especially the industrial structure of a country

must have a decisive influence on its energy consumption. In this respect, the idea that the level of energy consumption depends on the level of the national product must be discarded. Almost all studies on the subject contain a more or less modified version of a graph comparing the per capita national income with the per capita energy consumption, which seems to have been presented for the first time by E. A. G. Robinson at the first International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy in Geneva in 1955.⁷ Still, depending on what was to be proved, energy consumption has variously been expounded as a function of the national product, or—in a liberal interpretation—of the living standard, or, on the contrary, the level of the national product as a result of a more or less elevated energy consumption.

Apart from what has been said above about the great variety of factors influencing the energy consumption of a country (which must necessarily give countries favoured with a good climate the appearance of having a "lower standard of living" because of the absence of considerable energy consumption for heating purposes, consideration of the subject brings to mind the old question of what came first on this earth, the egg or the hen? In a certain sense, of course, a high industrial standard and a high standard of living are related to a high energy consumption, but cause and effect can hardly be determined on the basis of that correlation. The same applies to the question whether natural resources are necessary and compelling prerequisites for a high energy consumption, not to mention a high standard of living. Figures 1 and 2 show clearly that different countries with approximately the same standard of living (which is not the same as having equally high per capita national income, as follows from the previous section) can make use of different energy sources in very different ways, if it is assumed that most of the indigenous coal and hydroelectricity of a country are consumed within its borders.

Frequently, however, the standard of living is not related to the total energy consumption, but rather to the total consumption of electricity. This is reflected in Lenin's statement as well as in the declaration of Mr. Truman. But also in this case, one should beware of drawing the wrong conclusions. To explain and prove this fully is beyond the scope of this paper.⁸ It is, however, illustrated in figure 3, which shows the per capita electricity consumption, as compared to the gross national product per capita, converted to equivalents of Deutsche Mark according to (a) official exchange rates and (b) relative real

⁷ See E. A. G. Robinson and G. H. Daniel, "The World's Need for a New Source of Energy", in *Proceedings of the International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy, Vol. 1* (United Nations publication, Sales No. : 56.IX.1, Vol. 1), pp. 38-49.

⁸ See Herbert F. Mueller, "Der Einfluss der Energiewirtschaft auf die wirtschaftliche Struktur" (The influence of energy economy on the economic and social structure), in *Mitteilungen der List-Gesellschaft*, 1957, No. 10.

Tons of coal equivalent
per capita, 1959
Equivalents de tonnes
de charbon par personne, 1959

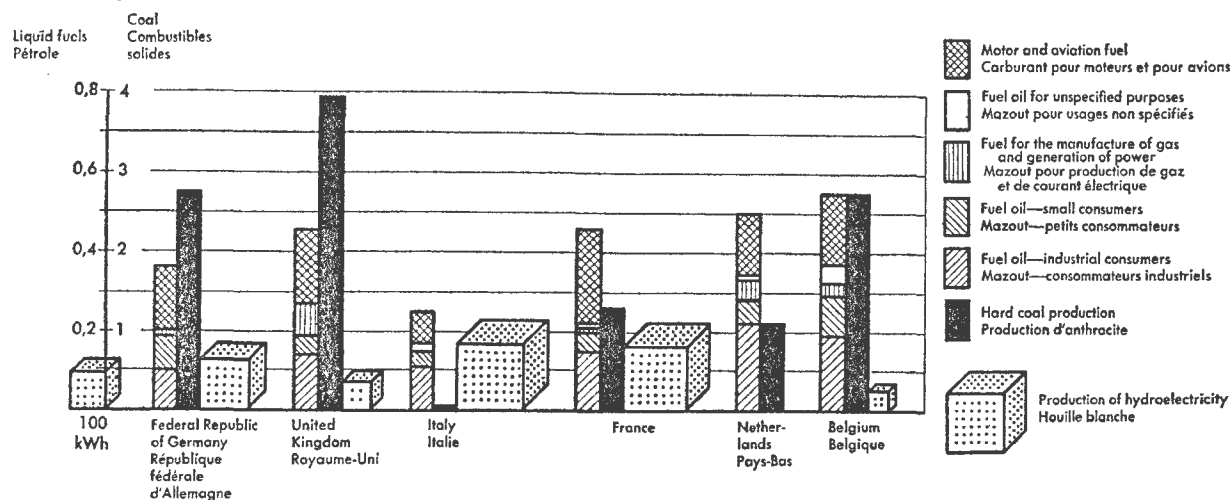


Figure 1

Per capita consumption of liquid fuels, 1959; per capita hard coal production, 1959; production of hydroelectricity, 1957
Consommation de pétrole par personne et production d'antracite en 1959; production d'hydro-électricité en 1957

Tons of coal equivalent
per capita, 1959
Equivalents de tonnes
de charbon par personne, 1959

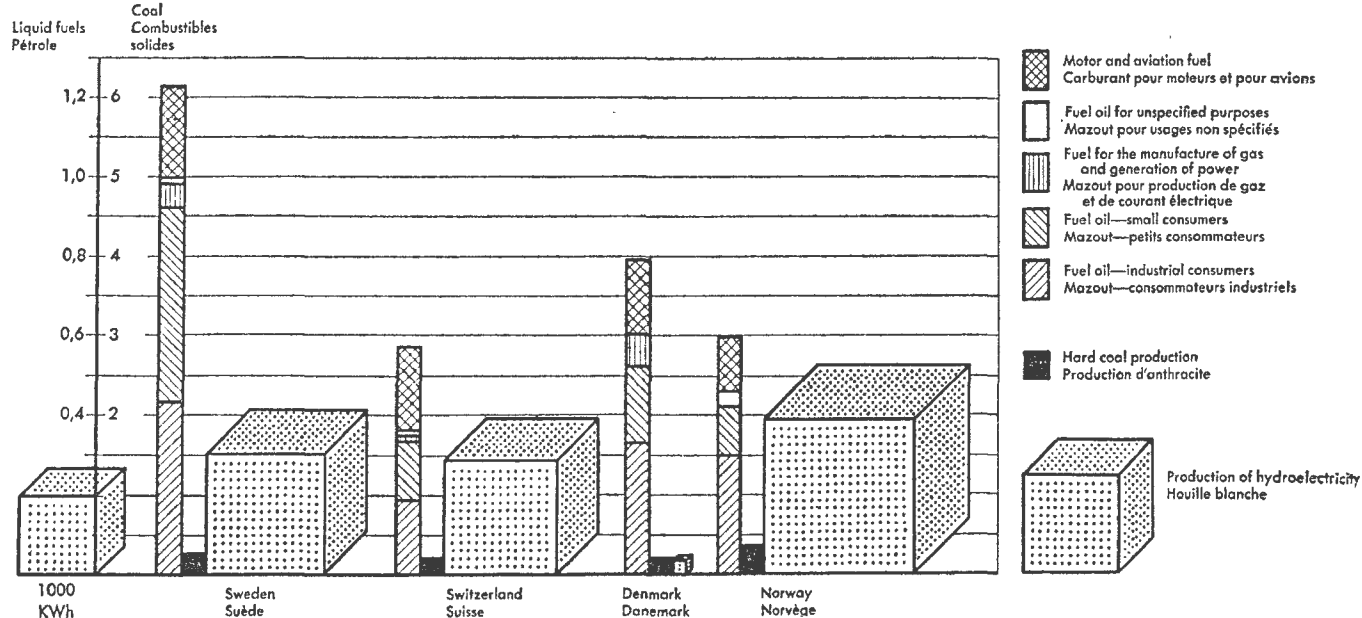


Figure 2

Per capita consumption of liquid fuels, 1959; per capita hard coal production, 1959; production of hydroelectricity, 1957
Consommation de pétrole par personne et production d'antracite en 1959; production d'hydro-électricité en 1957

purchasing power,⁹ of which the latter no doubt is a more accurate method.

It can clearly be seen that the consumption of electricity is first of all a function of relative real prices, rather than of the national product. In

⁹ Based on the mean value between the figures in the German calculation and those of the other country concerned.

figure 3 expenditure in the United States appears too low because of the very high wage level. Otherwise there would be a still closer correlation between the consumption of electricity and the expenditure, as expressed in wage-hours per 100 kilowatt-hours. This can be readily understood, if it is borne in mind that the heat requirements in countries with low electricity prices are often filled by electricity rather

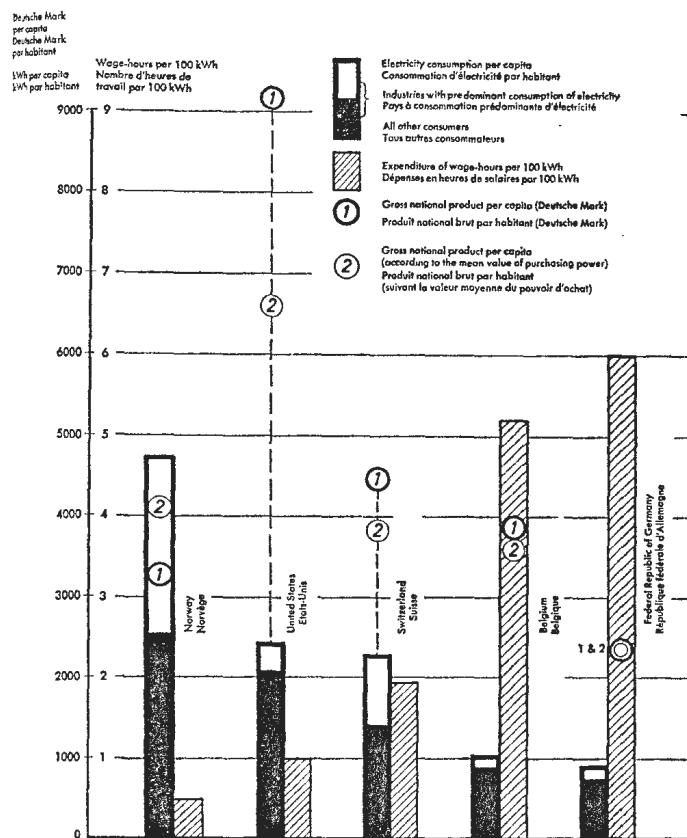


Figure 3

Comparison of per capita electricity consumption with price of electricity, expressed in expenditure of wage-hours per 100 kWh, and gross national product per capita 1951

Comparaison entre la consommation d'électricité par habitant et le prix de l'électricité, exprimée sous forme de dépenses en heures de salaires par 100 kWh, et produit national brut en 1951

than by coal, gas and fuel oil. Although the national product is not a very good yardstick for the standard of living, it can be seen that the higher electricity consumption in Norway does not at all mean a higher standard of living than that of the United States or Switzerland, and that Switzerland lags behind the United States in standard of living, although it does so hardly at all in regard to the consumption of electricity.

We have no generally valid criteria for what would be the best planning for supplying energy to the under-developed countries, that is, which sources of energy should be preferred, how much energy should be provided in the initial stage, and what speed of development can be expected. The answers to these questions depend essentially on the demands of the various countries, which are indeed very different from case to case, as explained in chapter I. It is only in a few of the countries in development, to give an example, that heating is of the same importance as in the temperate zone. The supply of heat for cooking and the demand for low-temperature heat for hygienic purposes and small trades, for instance, face the engineers and the technicians with problems and tasks that must be solved in a different way in each case. Generally speaking,

the opening of a country in development by traffic routes and other means of communications will have first priority. To this end, internal combustion engines of various types and sizes, and the appropriate fuels for them, must be supplied. On the other hand, the power requirements in the agriculture, trade and industries of countries in development will be very different. It follows, then, that the energy requirements as well as the best possible way to satisfy them, must be studied individually in regard to each country concerned.

III. THE ROLE OF NON-CONVENTIONAL ENERGY SOURCES IN UNDER-DEVELOPED COUNTRIES

In the previous chapter, in connexion with the interaction of industrial and energy-economic structures, the role of a country's indigenous energy sources was mentioned. When assessing their importance, however, it is necessary to exercise great care, as the national character of the population is the decisive factor. As long ago as 1875, the enormous oil deposits near Baku on the Caspian Sea were first being developed by Swedish engineers, the brothers of Alfred Nobel. It took more than half a century for Russia, however, to get around to a systematic exploitation and development of its rich oil fields for its own use. A still more striking example has been given by the countries of the Near East, whose vast oil fields were developed by European and American experts, while the native population never had taken any initiative on their own. On the other hand, there are countries like India, Brazil and Egypt which are eagerly and assiduously developing their natural resources of energy on their own.

Considering the necessity (as described in section I above) for a sound development policy to set different goals for the various countries according to their individual requirements, the hectic search for still unexplored sources of oil and natural gas, and the planning of high-tension networks, even in technically backward countries, appear in a different light from what is often the case in the daily press. It was even worse when, a few years ago, the coming generation of atomic energy was praised as a hopeful development aid within easy reach.¹⁰ It makes much more sense to find out what sources of energy nature offers in a form that requires only a minimum of technical knowledge and investment. Such sources are the sun and the wind. To date there has not been much prospect of any large-scale, economically sound exploitation of these sources. It is necessary to begin on a modest scale in many under-developed countries, and the time for large-scale projects will come only much later. It is exactly for this reason that sun and wind should be used to satisfy the initial energy needs of such countries.

It is true that previous investigations in this field have proved rather disappointing. It seems

¹⁰ Siebker severely—and with good reason—criticized such day-dreams (see footnote 5).

that the needs of a more developed civilization can benefit more from the progress made in the utilization of solar energy than can the needs of a primitive economy. Water heating, air conditioning and even refrigeration are problems that can be solved, though at some expense of course, in the tropical and sub-tropical regions just as successfully as the problem of supplying heat during cold nights or in cool weather. The short-term production of higher temperatures needed for cooking depends, to be sure, on the occurrence of direct solar radiation and is, moreover, only possible by means of appliances of which even the simplest types often are too expensive for the circumstances.

In other words, besides the further technical development needed, this also calls for financing to make it possible to offer such devices free of cost. Even today dung is still being burnt for fuel, even in Southern Europe, in quantities corresponding to an energy equivalent that must be of the order of the hard coal consumption of the European Coal and Steel Community. Bearing in mind that this material could and should rather be utilized as manure for the benefit of agricultural production, it seems that the importance of this technically very promising utilization of solar energy can hardly be over-estimated.

Technically more difficult is a second very urgent means of assistance to the agriculture of many needy countries: the raising of water, especially for drainage and irrigation schemes. Many "solar engines" have been developed, and, theoretically, they could be of any desired capacity. In practice, however, the realization of such projects has failed on account of the high cost of construction and installation of solar engines and the fact that the applicability of such engines is limited because their operation depends on times of direct sunshine.

In a different way, this applies also to wind machines, which are sometimes still used in Europe as motive power for pumps. The well-known Dutch windmills which are giving way to the electric motor and the Diesel engine, just as in all industrialized countries, always were and are still mostly wind-driven pumping installations. Now and then, one can still find small wind wheels for watering gardens and fields in European countries. There is no reason why such wind-driven plants should not be set up in under-developed countries, provided that favourable wind conditions prevail, as they do in Central Europe and the North European coastal areas. This would have to be thoroughly investigated to start with.

Apart from such decisive contributions to the promotion of agriculture in under-developed countries,

there are further possibilities, especially for the utilization of solar energy, under certain conditions, e.g. distilling plants for the purification of water, for the utilization of salt water in the cultivation of plants and, perhaps, also for industrial purposes. As far as high temperature is concerned, there should be possibilities of utilizing solar heat for the extraction and processing of metals and minerals.

The question whether sun and wind could be used to generate electric current has often been raised, and it should be answered more cautiously. The direct conversion of solar radiation in thermocouples and photo-electric cells is very expensive and can thus be utilized only for particular technical purposes in communications and similar fields. Solar energy can be utilized for large-scale generation of electricity only in certain cases, such as using it for the creation of an artificial temperature gradient through the evaporation of water, or the more problematical method of using the difference between surface and bottom temperatures of the water in large basins or gulfs of the sea. As regards the utilization of wind power, however, the same basic prerequisites apply to large power stations as to small units, and a continuous power supply can only be secured by providing stand-by generators, or by interconnection of several widely dispersed smaller plants.

It is obvious that the availability of geothermal energy in sufficient quantity at relatively high temperature offers a favourable potential for the supply of heat and perhaps even electric power. Unfortunately, such sources of energy have so far only been found in a few areas.

Summing up, it is useful to remember that the most practical energy source in almost the whole world for the generation of electricity where there is a limited demand is still the internal-combustion engine, especially the Diesel engine, and in certain circumstances also the oil- or gas-driven turbine. Furthermore, the utilization of water-power of small capacity, which still plays a relatively important role even in Western Europe, offers a good potential in many other areas.

The foregoing, however, is no reason to discontinue serious study and research in these fields, particularly the utilization of solar energy and wind power. There are many tasks which deserve priority over the construction of hydropower plants and chemical industries of European and American proportions, especially in areas where life is still very primitive, where the first step in any programme of development assistance is to raise the standard of agriculture, followed by the development of small trade and agricultural supply and processing industries.

LES PROBLÈMES POSÉS PAR LA FOURNITURE D'ÉNERGIE AUX PAYS SOUS-DÉVELOPPÉS, EN TENANT PARTICULIÈREMENT COMPTE DES SOURCES NOUVELLES D'ÉNERGIE

(Texte original en allemand *)

Herbert F. Mueller, Professeur d'économie énergétique

Technische Hochschule

Karlsruhe (République fédérale d'Allemagne)

INTRODUCTION

La mise en œuvre des « nouvelles sources d'énergie » est chose possible, particulièrement là où l'utilisation des sources classiques dans de bonnes conditions économiques se heurte à des difficultés. Ceci est particulièrement vrai dans certains pays sous-développés. Cependant, ainsi qu'on le montrera dans le mémoire, la gamme technique des applications des nouvelles sources d'énergie est restreinte. On ne saurait généraliser toute l'expérience acquise dans d'autres domaines. Avant tout, il convient de se rappeler que les exigences des divers pays sont très différentes les unes des autres. On trouve tant d'erreurs et d'opinions erronées à cet égard, ainsi qu'au sujet du planning de la fourniture d'énergie aux pays sous-développés, qu'il est nécessaire de commencer par éclaircir les questions suivantes : a) Que doit-on entendre par pays « sous-développés » ? b) Que doit-on entendre par « être développé » ? c) Dans quel ordre convient-il de s'attaquer aux problèmes et aux travaux à résoudre et à exécuter ?

Ceci fait, on examinera les critères habituels qui jouent en faveur de la consommation d'énergie et le planning applicable à sa fourniture. Finalement on se demandera jusqu'à quel point les sources non classiques d'énergie peuvent être utilisées dans le cadre du programme d'assistance aux pays sous-développés.

I. — QUE SONT LES « PAYS SOUS-DÉVELOPPÉS » ?

On s'efforce de définir le terme depuis qu'il y a des programmes d'aide à ces pays. Dans une communication intitulée « Le rôle de l'énergie nucléaire pour les pays sous-développés », lue à Genève le 5 septembre 1958, le Dr H. J. Bhabha l'a défini comme suit : « On peut dire qu'un pays est valablement candidat au développement dans le cas où le niveau de vie de sa population est inférieur à celui qui pourrait être réalisé avec une production correspondant à l'état actuel de la science et du génie civil.

* Le texte français est une traduction de la version anglaise. C'est le même texte qui a été présenté à la Conférence.

Une expression quantitative du niveau de vie est le revenu par tête. Mais que doit-on entendre par « revenu par tête » ? Le revenu national est un concept statistique auquel on aboutit en déduisant les amortissements de la valeur de la production domestique (ce qui donne la totalité du revenu produit par le travail et la propriété à l'intérieur), en ajoutant les revenus tirés des pays étrangers et en déduisant la valeur des marchandises et des services fournis aux pays étrangers. C'est dire que le revenu national est identique au « produit national net au coût des facteurs¹ ».

La définition du revenu national étant une chose si difficile et si variable d'un pays à un autre, il est impossible, dans les conditions actuelles, de convertir les facteurs économiques qui conviennent en une monnaie donnée ou de les comparer l'un à l'autre. Les manières de vivre, les prix des produits d'une même nature mais qui font l'objet d'une demande différente, et particulièrement le montant des investissements avec les taux d'épargne, les dépenses administratives de l'État, les projets de travaux publics, la défense nationale, etc., sont beaucoup trop différents d'un pays à l'autre pour qu'une telle comparaison soit concevable. Il n'est donc pas possible d'aboutir à des comparaisons valables, et par conséquent à des chiffres comparables, en divisant tout simplement le revenu national par la population. Dans son ouvrage *Rôle de l'énergie dans l'aide aux pays sous-développés*² A. Ghanie Ghaussy a parfaitement raison lorsqu'il fait observer : « Il est très

¹ Ce revenu national, cependant, est calculé de manière différente suivant les pays. Les définitions données ci-dessus et ci-dessous ont été recommandées par l'Organisation européenne de coopération économique à ses membres et elles ont été prises dans l'annuaire statistique de la République fédérale d'Allemagne de 1960. En ajoutant les impôts indirects et en déduisant les subsides, on obtient le produit ou revenu national net au prix du marché. En ajoutant encore à ce chiffre les amortissements, nous obtenons le produit national brut au prix du marché, c'est-à-dire le total de la consommation privée, de la consommation de l'État, des investissements en capitaux et des exportations, moins les importations de marchandises et de services. Fréquemment le produit national brut est considéré comme étant égal au revenu national.

² A. Ghanie Ghaussy, *Die Rolle des Energiesektors in der Entwicklungspolitik* (Cologne, Westdeutscher Verlag, 1960).

difficile de trouver, eu égard aux différences de conditions dans les divers pays et les diverses régions en cause, une définition du « sous-développement » qui tienne compte comme il convient des facteurs appropriés, et tous les efforts dans ce sens n'ont eu, jusqu'à présent, virtuellement aucun succès. » Ghaussy a également raison lorsqu'il souligne que le terme « *Entwicklungsländer* » ce qui veut dire sensiblement « pays à développer », préféré en Allemagne à l'expression « *Unterentwickelte Länder* » (pays sous-développés), est plutôt partiel et, comme tel, n'est pas d'une validité générale. Suivant en cela la littérature appropriée³, il souligne sept facteurs applicables, en tout ou en partie, aux pays ou aux régions en cause :

- a) Pays à monoculture dominante;
- b) Zones de surpeuplement;
- c) Pays sous-développés en ce sens que les moyens de production ne sont guère utilisés, ou tout au moins que leur utilisation est loin d'être idéale;
- d) Pays techniquement retardés;
- e) Régions peu adaptables;
- f) Manque de capital;
- g) Pays en dépendance marquée (économique et politique) à nombre d'égards.

Cependant, la plupart des auteurs ne tiennent pas suffisamment compte d'un point de vue, à savoir que l'aide aux pays sous-développés ne signifie aucunement « industrialisation »⁴. Lorsque le président Truman a demandé une telle assistance à la Chambre des Représentants des États-Unis, pour la première fois en 1949 (dans son discours d'inauguration), il se proposait de « soulager les pays libres de leur fardeau en développant leur énergie mécanique pour leur permettre de produire plus d'aliments, plus de vêtements et plus de matériaux de construction qu'avant, par leur propre travail ». Bruecher ajoute dans sa communication (dont le message du président Truman a été extrait) : « On n'a jamais tiré les deductions voulues de ce message, jusqu'à présent, pour les mettre en pratique, par exemple une consultation aux pays sous-développés ou une amélioration de la culture, l'installation de systèmes modernes, etc. Au contraire, tous les pays qui exécutent des programmes d'aide aux nations sous-développées se sont attachés pour eux à la réalisation d'usines industrielles de premier ordre. La majorité des projets antérieurs d'aide portaient sur de telles super-usines et le paysan, dans les pays sous-développés, exploite ses champs comme auparavant, avec une charrue en bois et va pomper son eau. » Malheureu-

sement les projets d'aide mis au point, d'une manière que Manfred Siebker⁵ a caractérisée comme suit :

« L'influence prise par les puissances occidentales sur les pays sous-développés a entraîné quatre conséquences :

« a. Ils font leurs des points de vue nationalistes qui leur étaient inconnus auparavant;

« b. L'hygiène et la médecine réduisent beaucoup la mortalité, mais la natalité ne diminue que lentement;

« c. La conception du niveau de vie, en tant que paramètre applicable à la condition humaine, est créée dans l'esprit des intéressés;

« d. En raison des contacts plus étroits entre les peuples qu'entraînent les produits techniques divers, les habitants des pays sous-développés se rendent de plus en plus compte des différences qui existent entre leur niveau de vie et celui des pays industrialisés. »

Il devrait toutefois être possible de convaincre les principaux représentants officiels des pays sous-développés des avantages qu'il y a à se servir de programmes d'aide raisonnables, adaptés aux conditions qui règnent dans les divers pays. Dans son ouvrage *Energie in Westeuropa* (L'énergie en Europe occidentale)⁶, l'auteur du présent mémoire a répété que la structure économique d'un pays n'est pas conditionnée seulement par ses ressources minérales et son climat, mais bien aussi par la nature de l'intelligence, le goût au travail et l'état de développement de sa population. Il ne saurait être raisonnable de construire de grandes usines ou des installations industrielles dans un pays dont la population est peu disposée à l'industrialisation. Cette expérience a déjà été faite dans certaines régions d'Europe méridionale. De son côté, Bruecher considère que l'établissement de ce qu'il appelle « l'infrastructure » comme base de tout programme d'aide peut se caractériser comme suit : on doit accorder la toute première priorité à la diffusion des connaissances et de l'expérience, le deuxième rang au développement du pays par des plans d'irrigation, des voies de communication, etc.

Dans le mémoire qui a déjà été cité ci-dessus, Bruecher souligne que « ... notre grand économiste Friedrich List auquel on demandait, il y a plus de 100 ans, quelle était la raison de la richesse des nations, avait donné la réponse suivante : « que pourrait-ce être, si ce n'est le génie qui anime l'être humain, que serait-ce d'autre que l'ordre social qui stimule leur activité et que serait-ce d'autre encore que les forces naturelles qu'il a appris à dominer. » Se reportant à cette citation, Bruecher continue : « Pour autant que ces trois facteurs —

³ Voir particulièrement G. M. Meier et E. Baldwin, *Economic Development, Theory, History, Policy* (Développement économique, théorie, histoire, politique) [New York, John Wiley, 1957], et R. Nurkse, *Some Aspects of Capital Accumulation in Underdeveloped Countries* (Quelques aspects de l'accumulation des capitaux dans les pays sous-développés) [Le Caire, 1952].

⁴ Ceci est souligné d'une manière très sensible par Max Bruecher dans son mémoire « Das Doppelgesicht der Entwicklungshilfe » (L'aspect double de l'aide au développement), dans *Mitteilungen der List-Gesellschaft*, 1961, n° 2.

⁵ « Die Möglichkeit der Atomkerntechnik für die beschleunigte wirtschaftliche Entfaltung von Entwicklungsländern » (Les possibilités d'utiliser les ressources nucléaires en vue du développement économique rapide des pays sous-développés), *Forschungsbericht des Landes Nordrhein-Westfalen* n° 870 (Cologne, Westdeutscher Verlag, 1960).

⁶ München-Gräfelfing Technischer Verlag H. Resch, 1961.

la nature des gens, l'ordre social, les forces naturelles — sont tout à fait absents ou différents d'un pays à l'autre, les résultats de toute tentative d'industrialisation doivent donc être négatifs ou différents l'un de l'autre. Il s'ensuit que fort peu de jeunes pays aboutiront à l'ultime objectif, c'est-à-dire à la richesse par l'industrialisation, même si les puissances occidentales ou l'URSS continuent à y investir des milliards de dollars. En conséquence, nombre de pays sous-développés n'arriveront jamais à dépasser le stade de l'état agraire pour cette raison, bien qu'il ne faille pas, pour autant, les considérer comme inférieurs. Un état agraire éminemment développé est tout aussi important à l'économie du monde qu'un état industriel très développé.»

Ces considérations amènent aux résultats suivants : si on s'efforce de classer les pays qui peuvent avoir besoin d'aide en vue de leur développement, toute classification basée sur l'importance du produit national doit être tout aussi insuffisante que la subdivision si fréquemment employée, en groupes géographiques. On ne saurait rejeter catégoriquement les deux méthodes, mais elles masquent certains facteurs essentiels. Ce qui importe, au premier chef, c'est une analyse adaptée au caractère des gens, à la structure économique, au climat, à l'état du sol et à l'accessibilité du pays en cause aux grands courants de circulation.

Ces constatations doivent être envisagées tout d'abord lorsque l'on parle du rôle de la fourniture de l'énergie aux pays sous-développés.

II. — PROBLÈME DE L'ÉCONOMIE ÉNERGÉTIQUE POUR LES PAYS SOUS-DÉVELOPPÉS

Dans son message à la Chambre des Représentants, cité ci-dessus, le président Truman avait déclaré que la fourniture d'une « énergie mécanique » était l'un des moyens possibles de venir en aide aux pays sous-développés. Ghaussy commence son livre en citant le passage bien connu de Lénine : « le socialisme, c'est le communisme plus l'électricité ». Ghaussy poursuit en ces termes : « cette déclaration peut être utilisée comme étant une expression encore valide de l'étendue de l'industrialisation et, avec elle, du lien qu'il y a entre la puissance économique et politique et l'énergie ». Une fois de plus, il devient évident que les notions bien différentes doivent être scrupuleusement séparées. Ceci ne s'applique pas seulement à l'aide au développement et à l'industrialisation, au sujet desquels je crois que tout ce qui était nécessaire a été dit au chapitre I, mais également à des termes tels qu'« énergie mécanique », que l'on désigne habituellement sous le nom d'« énergie », tout court, « électricité » ou « force motrice », au sens large du mot. Le président Truman voulait dire, en premier lieu, que le rendement du travail humain doit être augmenté en le complétant par une force motrice adéquate.

Cet objectif est souvent identifié avec le remplacement du travail manuel par la machine ou, en d'autres termes, avec la mécanisation par une pro-

duction technique « d'énergie ». Ceci n'est pas l'apanage exclusif des moteurs électriques. Dans le domaine des transports et de l'agriculture, ce sont les moteurs à combustion interne qui dominent, principalement en tant que sources de force motrice pour les voitures de tourisme et les camions, les autorails et les locomotives, les tracteurs, les machines de manutention, les moissonneuses, etc. Mais le terme « fourniture d'énergie » veut dire bien davantage qu'un simple remplacement de la main-d'œuvre manuelle. Dans les pays où le développement technique est avancé, l'électricité force motrice ne correspond qu'à la moitié environ de la consommation totale d'énergie électrique. Le reste va au chauffage, à la métallurgie et à l'industrie chimique. Dans les pays où le développement de la houille blanche est avancé, par exemple en Norvège, ces trois dernières applications absorbent même plus d'énergie que la force motrice. En liaison avec la demande totale d'énergie dans les pays éminemment industrialisés de la zone tempérée, les exigences d'énergie destinée à la force motrice tombent à 10 ou 15 p. 100 de la consommation totale, 85 à 90 p. 100 allant à la production de chaleur, dont un tiers environ pour le chauffage des locaux. Si on s'efforce de subdiviser la consommation totale d'énergie par applications, on se heurte une fois de plus, comme au chapitre I, à la difficulté qu'il y a à faire des affirmations concrètes, appuyées par des chiffres valables, quant à la nécessité de ces applications.

Il s'ensuit que la structure économique, et plus particulièrement la structure industrielle d'un pays, doit avoir des répercussions très nettes sur sa consommation d'énergie. A cet égard, l'opinion fréquemment exprimée suivant laquelle la consommation d'énergie dépend de l'importance du produit national, doit être abandonnée. Toute comparaison entre le produit national par personne et la consommation d'énergie spécifique, comparaison qui pour autant qu'on le sache, a été suggérée pour la première fois par Robinson à la première Conférence internationale sur l'énergie atomique, à Genève, en 1955⁷, peut se trouver, sous une forme plus ou moins modifiée, dans presque tous les travaux de cet ordre. Suivant le sujet de ces recherches, la consommation d'énergie était interprétée jadis comme fonction du produit national ou, par le jeu d'une identification un peu généreuse, du niveau de vie, ou encore le niveau du produit national était considéré comme étant fonction d'une consommation d'énergie plus ou moins élevée.

Indépendamment de ce qui a été dit ci-dessus en ce qui concerne les facteurs très différents qui se répercutent sur la consommation d'énergie d'un pays, ce qui pourrait donner parfois, dans les pays dont le climat est chaud l'impression que le niveau de vie est plus bas car ils n'ont pas besoin ou presque pas

⁷ Voir E. A. G. Robinson et G. H. Daniel, « Le monde a besoin d'une nouvelle source d'énergie », *Actes de la Conférence internationale sur l'utilisation de l'énergie atomique à des fins pacifiques*, Vol. 1 (publication des Nations Unies, n° de vente : 56.IX.1, Vol. 1), p. 40-52.

besoin d'énergie pour le chauffage, cette manière d'examiner la question rappelle la vieille plaisanterie à propos de l'ordre d'ancienneté de l'œuf et de la poule. A certains égards, bien entendu, niveau industriel et niveau de vie élevés veulent dire grosse consommation d'énergie. Néanmoins on ne saurait définir des relations de cause à effet d'après cette simple corrélation. Il en va de même quant à la question de savoir si les sources d'énergie naturelle représentent une condition nécessaire et impérative à une consommation d'énergie massive ou même un niveau de vie élevé. On voit très clairement, aux figures 1 et 2 (voir le texte anglais, p. 80), que les divers pays qui ont à peu près le même niveau de vie — ce qui n'est d'ailleurs pas identique à l'égalité du produit national par personne, ainsi qu'il ressort du chapitre I — peuvent très bien faire usage de diverses sources d'énergie d'une manière toute différente si on admet que la majeure partie du charbon et de la houille blanche produite dans un pays est également consommée à l'intérieur de ses frontières.

Fréquemment, toutefois, le niveau de vie ne présente pas de rapports avec la consommation totale d'énergie, mais bien avec la consommation totale d'électricité. C'est ce que faisait observer la déclaration de Lénine, ainsi que celle du président Truman. Mais, dans ce cas également, il faut se garder de tirer des conclusions fausses de certaines observations. Il reste cependant impossible d'expliquer et de prouver ceci complètement dans le cadre de la présente communication⁸. A des fins illustratives, la figure 3 (voir le texte anglais, p. 81) nous donne, à titre de comparaison, la consommation spécifique d'électricité, la valeur du kilowattheure exprimée en fonction du salaire et le produit national brut par personne converti en valeurs égales en Deutsche Mark a) aux cours officiels du change, b) en fonction du pouvoir d'achat⁹, mesures dont la seconde est évidemment la plus juste.

On peut voir clairement que la consommation d'électricité est tout d'abord fonction des dépenses dues aux prix en vigueur et nullement fonction du produit national. En figure 3, les dépenses indiquées pour les États-Unis semblent trop faibles en raison du niveau très élevé des salaires. Dans le cas contraire, il y aurait une corrélation encore plus étroite entre la consommation d'électricité et les dépenses faites par 100 kilowattheures au titre des salaires. Ceci sera compris facilement si on se rappelle que les besoins de calories, dans les pays où l'électricité est bon marché, sont souvent satisfaits par l'électricité au lieu du charbon, du gaz et, aujourd'hui du mazout. Bien que le produit national ne soit pas un très bon paramètre indicatif du niveau de vie, on peut voir que la plus forte consommation d'électricité de la Norvège ne signifie nullement que son

niveau de vie est plus élevé qu'aux États-Unis ou qu'en Suisse. Cette dernière d'ailleurs, n'est pas arriérée par rapport aux États-Unis à cet égard, bien que ce soit vrai pour sa consommation d'électricité.

Nous n'avons pas de critères généralement valides pour le régime du planning des fournitures d'énergie aux pays sous-développés, pour les sources d'énergie qui sont à préférer, l'importance de la fourniture d'énergie qui doit être assurée au départ et le régime de développement qui doit être attendu. Les réponses à ces questions dépendent essentiellement des exigences des divers pays, qui sont bien différentes les unes des autres, ainsi que nous l'avons expliqué au chapitre I. Par exemple, ce n'est que dans quelques pays en cours de développement que le chauffage aura la même importance que dans les zones tempérées. La fourniture de chaleur pour la cuisine et les exigences en fait de chaleur à basse température pour l'hygiène, les petits métiers, etc., présentent aux ingénieurs et aux techniciens des problèmes et des tâches qui doivent être résolues et exécutées dans chaque cas d'une manière différente. Généralement parlant, l'ouverture d'un pays en développement aux routes et autres voies de communication auront la priorité. Il faut prévoir des moteurs à combustion interne de tous types et de tous modèles et les combustibles appropriés. Au contraire, les exigences énergétiques dans le domaine de l'agriculture, du commerce et de l'industrie des pays en voie de développement seront bien différents. Il s'ensuit que les exigences d'énergie, ainsi que la manière idéale de les satisfaire, doivent faire l'objet d'une étude individuelle pour chaque pays en cause.

III. — RÔLE DES SOURCES D'ÉNERGIE NON CLASSIQUES DANS LES PAYS SOUS-DÉVELOPPÉS

Quand on parlait, au chapitre précédent, de l'interaction des structures industrielles et énergétiques-économiques, on mentionnait le rôle des sources naturelles d'énergie d'un pays. On doit faire attention, quand on détermine l'importance de ces sources naturelles d'énergie, car le caractère de la population joue un rôle important. Par exemple, dès 1875, les énormes gisements de pétrole de Russie, près de Bakou, sur la mer Caspienne, ont été découverts par des ingénieurs suédois, frères d'Alfred Nobel. Néanmoins il a fallu plus d'un demi-siècle pour que la Russie mette systématiquement en œuvre ces vastes champs pétrolifères en vue de leur utilisation par le pays lui-même. Un exemple plus frappant encore est donné par les pays du Proche-Orient dont les immenses gisements pétrolifères ont été découverts et ouverts par des experts européens et américains sans que la population locale ait pris la moindre initiative de son côté. Au contraire, des pays tels que le Brésil ou l'Égypte s'efforcent de mobiliser et d'utiliser eux-mêmes leurs ressources.

Si on considère que, de toute nécessité (voir chapitre I), une politique de développement raisonnable doit fixer des buts bien différents aux divers

⁸ Herbert F. Mueller, « Der Einfluss der Energiewirtschaft auf die wirtschaftliche und gesellschaftliche Struktur » (Influence de l'économie énergétique sur la structure économique et sociale), *Mitteilungen der List-Gesellschaft*, 1957, n° 10.

⁹ Sur la base de la valeur moyenne prise pour la méthode allemande de conversion et celle du pays étranger en cause.

pays suivant les besoins individuels, une recherche à outrance des sources encore inexplorées de pétrole et de gaz naturel, ainsi que le planning de réseau d'électricité à haute tension dans des pays encore peu développés apparaît sous un tout autre aspect que celui qui ressort fréquemment des articles de journaux quotidiens. C'est avec moins de raison encore, il y a quelques années, que la production d'énergie atomique pour l'avenir a été saluée comme un apport riche en promesses à la somme totale de l'énergie disponible pour les pays sous-développés, qui devait leur être fait dans quelques années¹⁰. Il serait beaucoup plus raisonnable d'étudier les sources naturelles d'énergie qui exigent un minimum de connaissances techniques et de travaux d'installation dans les pays en cours de développement. Ces sources naturelles sont plus particulièrement le soleil et le vent. Jusqu'à présent il y a peu de perspectives d'utiliser l'énergie solaire et l'énergie éolienne sur une échelle technique. C'est précisément parce que nous devons commencer à une échelle très modérée dans nombre de pays sous-développés jusqu'au jour où des projets de grande envergure viendront, que le soleil et l'énergie éolienne peuvent, dans bien des cas, fournir l'énergie nécessaire à ces pays, au premier stade de leur programme de développement.

Il est vrai que les recherches antérieures dans ce domaine ont été plutôt décevantes. Il semble que les exigences d'une population plus civilisée bénéficieront davantage du progrès réalisé dans l'utilisation de l'énergie solaire que les pays moins développés. La fourniture d'eau chaude, du conditionnement d'air et, en cas de besoin, l'utilisation de l'énergie pour des installations de refroidissement ou de congélation, sont autant de problèmes qui peuvent être résolus — mais à grands frais! — tout aussi bien pour les pays tropicaux et semi-tropicaux, que la fourniture de chaleur pendant les nuits froides ou la totalité de la saison fraîche. La production à court terme de températures plus élevées quand il les faut, par exemple pour la cuisine, est possible, tout d'abord, seulement pendant les heures de rayonnement solaire direct et ne peut être mise en œuvre, d'autre part, que par un recours à des dispositifs dont les types même les plus simples dépassent le pouvoir d'achat de la population.

En plus des développements techniques ultérieurs qui s'imposent dans ce domaine, il serait indiqué de mettre sur pied des plans de financement permettant aux habitants des pays sous-développés d'acquiescer gratuitement ces installations. En se rappelant que, même en Europe méridionale, l'engrais naturel séché est encore brûlé en grandes quantités, et que sa teneur en énergie correspond à peu près à celle de la totalité de la production d'anthracite des pays de la Communauté européenne du charbon et de l'acier, cette application de l'énergie solaire, techniquement riche en promesses, ne doit pas être

surestimée. Au contraire, ces engrais pourraient être utilisés d'une bien meilleure façon pour améliorer la qualité et la quantité des produits agricoles de ces pays.

Une deuxième aide à l'agriculture, pour nombre de pays qui en ont besoin, est techniquement plus difficile à réaliser : il s'agit de faire monter l'eau, particulièrement dans le cadre des plans de drainage et d'irrigation. Nombre de moteurs solaires ont été mis au point et, théoriquement on pourrait les réaliser de toutes tailles, à volonté. En pratique, cependant, la réalisation de ces projets a échoué en raison des frais élevés qu'exige la construction et l'installation des moteurs solaires. L'applicabilité de ces moteurs est limitée en outre par le fait que leur fonctionnement dépend des durées d'ensoleillement direct.

D'une autre façon, ceci s'applique également aux machines éoliennes qui sont parfois utilisées en Europe pour actionner des pompes. Les fameux moulins hollandais, qui cèdent de plus en plus le pas aux moteurs électriques et aux diesels, de même que les moulins à vent dans tous les pays industrialisés, ont toujours été et sont encore toujours essentiellement des installations de pompage à énergie éolienne. De temps à autre, on peut encore trouver de petits moulins pour l'irrigation des jardins et des champs dans les pays européens. Rien ne s'oppose à l'installation de ces centrales éoliennes dans les pays sous-développés. Bien entendu, une exigence préliminaire est que des conditions favorables règnent quant au vent, ainsi que c'est le cas en Europe centrale et dans les régions côtières de l'Europe septentrionale. Ceci devrait tout d'abord être étudié de très près.

Indépendamment de ces indications catégoriques quant au développement de l'agriculture dans les pays sous-développés, il y a encore d'autres possibilités, particulièrement pour l'utilisation de l'énergie solaire dans certaines conditions, par exemple des centres de distillation pour la purification de l'eau, pour l'utilisation de l'eau salée en vue de la culture des plantes et peut-être également pour des fins industrielles. Dans les pays où règnent des températures élevées, nous pourrions également songer à la possibilité d'utiliser l'énergie solaire pour l'extraction ou la transformation des métaux et des minéraux.

La question de savoir si le soleil et le vent ne pourraient pas être utilisés pour la production de courant électrique a été soulevée fréquemment, mais la réponse doit être donnée avec la plus grande circonspection. La conversion directe d'énergie rayonnante par des thermocouples et des éléments photo-électriques est très coûteuse et ne peut donc être utilisée que pour des fins techniques spécialisées, dans le domaine des télécommunications par exemple. L'énergie solaire peut servir à la production de courant électrique à grande échelle dans des cas spéciaux seulement, à savoir en utilisant l'évaporation de l'eau pour produire une pente de température artificielle ou, ce qui est encore plus difficile, en se servant des différences de température entre la

¹⁰ Siebker avait raison en critiquant violemment ces rêves dorés (voir note 5).

surface et le fond de bassins ou de golfes maritimes de grand diamètre. Les mêmes conditions s'appliquent cependant essentiellement aux centrales éoliennes, si bien que, pour les petites centrales, on ne peut obtenir une fourniture continue d'énergie qu'en disposant de génératrices auxiliaires, ou encore en branchant ensemble plusieurs centrales éoliennes situées à des distances appréciables les unes des autres. Il est évident que l'utilisation de la chaleur de la terre pour le chauffage et peut-être également pour la production d'énergie, est possible là où elle est présente en quantité suffisante et à des températures assez élevées. Malheureusement ces sources de chaleur terrestre n'ont été trouvées jusqu'à présent qu'en quelques lieux du globe.

Pour résumer, il faut faire face au fait que l'échelle la plus pratique de fourniture d'énergie pour les besoins restreints, ainsi que pour la production d'électricité dans des centrales petites et moyennes est fournie par le moteur à combustion interne et

maintenant, plus particulièrement, par moteur diesel, dans presque tous nos pays, ainsi que, dans les pays à développement poussé et dans des cas spéciaux, par la turbine à pétrole ou à gaz. En certains lieux, l'utilisation des petites sources d'énergie hydraulique, qui jouent encore un rôle non négligeable en Europe occidentale, fournira l'appoint dont on aura besoin.

Il ne faut pas interpréter ces conclusions comme indiquant qu'on ne doive pas aller franchement de l'avant dans l'étude et, ce qui est encore plus nécessaire, dans l'utilisation de l'énergie solaire et éolienne. Il y a encore nombre de projets qui méritent priorité avant les centrales hydrauliques et les usines chimiques à l'échelle américaine et européenne, particulièrement là où les populations vivent encore dans des conditions assez primitives; pour celles-ci, le développement de l'agriculture doit toujours être la tâche essentielle; ensuite viendra le développement du petit commerce et des centres de fourniture et de transformation des produits agricoles.

NEW SOURCES OF ENERGY IN THE WORLD ENERGY ECONOMY

*Bruce C. Netschert **

National Economic Research Associates
Washington, D.C.

and

*George O. G. Löf ***

Consulting Chemical Engineer
Denver, Colorado

INTRODUCTION

In the period since the Second World War the world has seen the development of great interest and endeavor in two lines of effort to add new sources of useful energy to the conventional sources, the fossil and vegetable fuels and hydropower. One of these constitutes the effort to develop on an economic basis a newly discovered energy source — atomic fission, and what may be thought of as its extension, atomic fusion. The other, paradoxically, is an effort to do the same with what is almost the opposite, the development on an economic basis of the most promising of those energy sources whose existence has always been known to man — solar radiation, the winds, and the earth's interior.

Although this Conference terms them "new" sources, they were the first ones available to man and did not require the accumulation of knowledge for awareness of them. The interest in them at this advanced stage in man's technological development is in part a measure of the advance; it is only with the new knowledge, materials, and techniques that their exploitation on a significant scale in competition with the conventional energy sources appears feasible. The new interest also appears to be related to the more general concern with man's future energy needs engendered by the emergence of atomic energy and the expectation of rising costs for energy from conventional sources which was the result of the investigations of the first half of the nineteen-fifties. Finally, interest in the "new" sources has been stimulated by the problem of accelerating the development of the under-developed countries, many of which have very limited indigenous conventional energy resources and where the availability of energy at reasonable cost is an essential prerequisite for the desired economic development.

It is the purpose of this paper to sketch out the limits and nature of the opportunities for the new energy sources through matching what is known about their physical and economic characteristics against the present and indicated future levels and patterns of energy use in the world.

CHARACTERISTICS OF THE NEW ENERGY SOURCES

Solar, wind, and geothermal energy have numerous characteristics which distinguish them from the conventional sources and from each other. Magnitude of the resource, its distribution, the limitations to its use, and various other features are unique to each type. It is these characteristics that largely determine the type, extent, location, and period of application of these energy supplies.

Geothermal energy

Of the three sources, geothermal energy appears to have the most restricted availability, but to be the most advanced in the technology of utilization. A rather fortuitous combination of large masses of fractured or porous hot rock at a depth not exceeding a very few thousand feet, a natural supply of water to this heat source, and a layer of impervious rock between the hot zone and the surface are generally required. If wells are drilled into this hot material, steam at a pressure of several hundred pounds per square inch may be tapped from it, just as natural gas is produced. With a number of wells and steam collection facilities, a central power plant comprising principally a steam turbine, condenser, and electric generator can be operated. Large installations in northern Italy and New Zealand are now in use. Under certain circumstances, such as in Reykjavik, Iceland, the steam can be economically used directly for heating purposes.

As a qualitative guide to these characteristics, a tabulation of the principal features having some significance in the usefulness of each source is presented below.

* Formerly with Resources for the Future, Inc., Washington, D.C.

** Also consultant, Resources for the Future, Inc., Washington, D.C., and research associate, University of Wisconsin.

Characteristics of the new energy sources

Characteristic	Energy type		
	Geothermal	Wind	Solar
Geographic distribution in the world	Scattered throughout world	Universal, except equatorial regions	Tropic and middle-latitude zones
Geographic distribution in general areas of availability	Highly localized	Limited	Excellent
Constancy of availability in favourable locations :			
Hourly	Excellent	Fair	Poor
Seasonally	Excellent	Good	Fair
Constancy of output with diurnal energy storage	Irrelevant	Fair	Fair
Constancy of output with longer-term energy storage	Irrelevant	Good	Good
Type of energy output	Heat and power	Power	Heat and power
Concentration of the raw energy	Moderate	Low	Low
Theoretical total quantities available for conversion, compared with use of conventional sources	Probably very small	Small	Immense
Probable size of the individual developments	Moderately large	Small	Primarily small
Knowledge of sources	Limited	Fairly advanced	Advanced
Status of development :			
Equipment	Advanced	Considerable	Limited
Applications	Appreciable	Few	Very few

The existence of natural steam under commercially usable conditions may be more widespread than is generally assumed, because there has been very little exploration for this resource. Discoveries have been through surface hot springs and accidental findings while drilling for minerals. But, judging from present indications, this type of energy appears best suited to intensive use in localized, widely scattered areas. The combination of energy need and scarcity with geothermal availability should probably be considered as fortuitous. If geothermal energy can ever be economically obtained from plutonic sources or from the earth's mantle, it will be the most ubiquitous of all energy supplies, but for the foreseeable future, this must be considered as only a theoretical possibility.

Geothermal energy is in some respects similar to hydropower. Its present availability, limited to specific sites, is analogous to the sites for dams to capture the hydro potential. The expense of transporting steam from geothermal sites or high-pressure water from hydropower sites is so high that on-site conversion to electric power is a practical necessity in both cases, if the use for the energy is distant from the source. Exploitation of hydropower has been possible only because of two circumstances: (1) where the hydro potential occurs in conjunction with well-developed electricity networks, the disadvantage of the fixed location of those hydropower sites which are not favourably situated with respect to demand centres has been overcome by integrating the hydropower into the total system; (2) where the potential occurs in isolated, remote areas, it has been possible to exploit it through utilization

for specific "electricity-intensive" projects such as alumina reduction. Where it is possible to integrate geothermally generated electricity into an existing system, this is likely to be done, but in the case of the remote occurrences it is not enough to be merely competitive with other energy sources in electricity production, if a specific industry is to be lured to a remote site. The prospects of development are contingent on whether such sites offer very large power output at attractively low cost. Remote hydropower sites have sometimes proved valuable under such circumstances; it remains for remote geothermal sites to demonstrate similar advantages.

As a source of electricity, geothermal energy is further analogous to hydropower in the economics of its capture. It requires considerable investment to drill wells, to equip them with the proper facilities, and to provide turbine and generator equipment. Once in operation, running expenses are low. Since geothermal energy is "lumpy", as is hydropower—that is, each "deposit" represents a relatively large energy source—full use of the potential it affords is desirable. Large central stations and power transmission facilities therefore appear essential to economic exploitation. It is unlikely that establishment of a sizable number of small generating plants, below the megawatt level, will be practical because of the high cost per unit of generating capacity.

Geothermal energy exists naturally as heat, so it may also be utilized directly as heat rather than by conversion to electricity. But this use is handicapped by the practical limits to the transport of steam. Electricity may be economically transported hundreds of miles, depending on the amount of power involved,

but the cost of piping, the need for heavy insulation on steam mains, and the inevitable heat loss limit the practical use of the steam to a radius of a few miles from its source. In Iceland, where the fortuitous occurrence of natural steam and hot water in large quantity coincides with a house-heating need, the application of geothermal energy to this use has been successful.

The temperature of natural steam (roughly 200 to 300 degrees centigrade at the well head) suggests its usability as a source of process heat for industry, but its sporadic occurrence is a handicap. It is questionable whether there are industries in which the requirements for process heat are of such overriding importance that the activity would be drawn to a geothermal energy source. A notable exception is the processing of natural steam itself for recovery of chemicals vapourized from the same deep deposits.

The characteristics of geothermal energy occurrence indicate that near-term utilization will be in widely scattered but reasonably well delineated and localized districts throughout the world. Electric power generation in the megawatt range appears to be the most promising application. In the long view, deep earth-heat might become universally available by the development of new technology.

Wind energy

Whereas geothermal energy utilization is recent and growing, wind energy has been used more in past centuries than at present. It has been, at various times and places, the principal source of propulsive power for ships and the motive force for water pumping, mechanical operations, and rural electricity generation. But the development of more "concentrated", convenient, and dependable energy sources gradually displaced wind power from practical use, and at the present time, this source of energy remains significant only for water pumping in rural areas where conventional energy is expensive.

Conversion of the kinetic energy in the moving air mass to a useful form can be most conveniently accomplished by providing pitched or tilted blades in a radial array so that, in passing between them, the wind exerts a turning force on them. If some sort of load is furnished to the shaft on which the blades are mounted, a portion of the wind's kinetic energy can be converted to useful work. For electricity production, propeller-type blades have been advantageously used, and the generator has been operated directly on the propeller shaft or through a gearing system. Both for the adequate clearance of long propeller blades and for the utilization of the greater wind velocity well above ground level, the equipment is usually mounted on a tall tower.

There is a large wind velocity variation both in time and place. Some areas nearly always have rather steady high winds, and there are many well-exposed sites that are excellently suited to wind power generation. Air velocities of 15 to 25 miles per hour are generally desired for such systems. Thus, although

winds are everywhere in the temperate and arctic zones, the general areas and specific sites for their practical use are more limited.

Wind power suffers the drawbacks of extreme variability and low "concentration". It is readily amenable to small-scale mechanical use, as in pumping, but wind is not a "new" energy source in this respect. Its significance in the present context is therefore as a source of electricity. Here the variability is a serious handicap, overcome at the small-scale level through storage batteries; at the large-scale level and in suitable circumstances, it can be offset by connecting the wind generating station to an electrical network having numerous, well separated wind generators and conventional energy sources. It is not clear, however, whether the use of wind power for electricity generation is subject to economies of scale — whether the additional unit cost of the larger capacity is progressively less, as with conventional power systems. The construction of large wind-powered generators in the megawatt range presents formidable structural requirements and the cost at this size level may be disproportionately high. In any event, large-scale power generation with the wind is capital intensive; in comparison with conventional thermal power generation it involves large investment, but low operating cost.

The variability of the wind dictates some form of storage, because practically all energy uses require continuous availability. Storage of electricity in batteries is expensive, and for this reason is not practical for large installations. "Storage" in the form of fuel or impounded water for auxiliary generating facilities is feasible, but if the load factor on the auxiliary is low, high costs result. As a small portion of a network input, perhaps with other wind generators distributed over a large region, the variable output from a single wind generator is not such a disadvantage.

The gradual disappearance of "windmill" water pumps and electricity generators from farms in the United States is an interesting commentary on wind power economics under these particular conditions. Before rural electric transmission lines were so widely distributed, nearly every farm house in the central and western States was provided with a wind power machine, usually for pumping, but often for electricity input to a storage battery. But as commercial power became available, the wind machines fell into disuse, partly because, all factors considered, the purchased power was cheaper, but mainly because the farm's electrical needs grew rapidly beyond the capacity of its wind power equipment.

Experience in the United States suggests that small-scale application of wind power generators — perhaps one to ten kilowatts — will be best adapted to use by individual families, small groups of families, or small commercial establishments too remote from central electricity generating facilities for economic power transmission. If wind power units of hundreds or possibly thousands of kilowatts are utilized, the variability characteristics of this

energy source indicate the need for integration with other types of generating facilities in a network.

Solar energy

Solar energy, the third of the "new" sources, is characterized by ubiquity—it is available everywhere on earth—together with the handicaps of variability, periodicity, and diffuseness. The quantity available at any one place changes with the season and weather and falls to zero for a large fraction of every 24 hours (except during summer in the polar regions). Although the quantity received by an acre through a day's time may exceed 25,000 kilowatt-hours of heat, the rate of energy delivery to a surface of a few square feet is small. Thus, most applications of solar energy require considerable areas for collecting and converting it, and they usually require some type of means for energy storage.

The conversion of solar energy to some useful form, except for biological processes and photoelectric methods, requires its absorption in or on a surface that intercepts the radiation. The absorbed radiant energy is thus converted to heat, which can be delivered for use as a hot liquid, vapor, or other medium. These heat sources can be used directly in various ways, or they can be utilized for electricity generation by any of several processes.

The temperature level at which the heat is supplied is an important factor in its application. It is affected by the thermal losses from the system and by the rate at which the transfer medium is circulated in the energy absorbing surface. If temperatures appreciably above the boiling point of water are desired, as in the production of steam for power generation, solar radiation must be concentrated, by means of focusing reflectors, on to smaller heat transfer surfaces, which can thus attain much higher temperatures. It should be realized, however, that the recovery of a given quantity of energy, regardless of temperature, requires comparable areas of solar-intercepting surface, whether of the reflecting or absorbing type.

The applications of solar energy are, in general, the same as those for any other heat source. The more common uses and possibilities at moderate temperatures are house-heating, water-heating, drying, evaporation (salt production and fresh water production from sea water), and heat-operated cooling and refrigeration systems. For most of these uses, the energy conversion unit consists of a black metal surface beneath one or more transparent layers of glass or plastic film. At higher temperatures, focusing reflectors of paraboloidal (dish) shape or cylindrical (trough) shape may be used to produce steam or other vapour for power generation in a heat engine, to cook foods, to generate electricity directly with solid-state devices, and to carry out very high temperature processes. In each case, concentrated solar energy from a sun-following reflector is delivered to a focus where the heat transfer medium is circulating or where the material to be heated is located.

Indicative of the requirements for sizable solar receiver areas are statistics on radiation intensities. In English units, solar intensity in clear weather is 300 to 350 BTU per square foot per hour, or on a horizontal surface in the temperate zone, 1,500 to 2,500. Comparable metric equivalents are 800 to 950 kilocalories per square metre per hour and 4,000 to 6,500. These energy intensities are very low in comparison with those utilized in transfer processes of industrial heat, so relatively large surfaces must be provided for recovery of solar energy. Hence, the unit cost of the solar collecting surface must be minimized to the greatest extent possible.

As with wind energy, variability in solar energy supply is a disadvantage that either limits its use to certain intermittent needs, or necessitates storage of solar heat, power, or other products of the system. The alternative is the use of conventional sources to supplement the solar energy when it is not available. All these measures entail costs which are additive to those of the solar collector unit.

It is fortuitous that in geographic occurrence, solar energy is most plentiful in the parts of the world which suffer from a scarcity of conventional energy sources. Many of the world's arid and semi-arid regions have very limited fuel reserves, but abundant sunshine. Moreover, solar variability is less severe in those areas, thereby minimizing the storage problem. Being arid, those regions may also be best suited to the application of solar demineralization of saline water for augmenting potable supplies.

Other characteristics of solar energy affecting potential uses are its ubiquity and its rather simple convertibility to heat. These features make possible its application on a small scale by the individual user. For such purposes as water heating, space heating, crop drying, home and food cooling, and cooking, units for single households or families are in a practical size range and should be operable by the owners without unreasonable difficulty. The costs of such equipment appear high, at the present stage of development, and their reduction is a prime objective.

Power generation by solar energy may ultimately supplement central station output, but early application appears to be in the few-kilowatt range for families or small community groups beyond economic power transmission areas. Salt water demineralization may most likely be in large central installations for distribution to individual consumers. In suitable climates, the solar process has some unique advantages and economics of scale should favour large installations over individual units.

Scale economies in the use of solar energy are probably not great. If applicable at all, they will probably be limited to such uses as salt production, salt water distillation, and possibly to drying and power generation. Because a comparatively large solar collector is required for recovery of even a modest heat supply, and because the collector itself is the most costly component in nearly all solar energy

conversion systems, minimum unit capital cost is reached at a relatively small capacity. Further enlargement does not reduce unit cost appreciably. This is another factor which places small solar utilization systems at a lesser disadvantage than small systems of conventional type.

The principal characteristics of solar energy which affect potential uses of this source may be summarized by recognizing that the wide availability of this intermittent, low-intensity heat supply, particularly in regions of high fuel costs, is advantageous for several types of domestic and small commercial applications. The high investment requirement must be minimized, however, through the development of improved and cheaper equipment. The conversion of solar heat to electric power appears best suited to small- or moderate-scale use in areas remote from central generation facilities. The total quantity of solar energy available far exceeds our foreseeable total energy needs, and its ultimate use on a wide scale is practically certain.

TOTAL AND PER CAPITA ENERGY CONSUMPTION, CURRENT LEVELS AND TRENDS

According to the United Nations Statistical Office, total world energy use from the conventional sources (coal, crude oil, natural gas and hydropower) in 1959 was the equivalent of 4 billion metric tons of coal equivalent. As shown in table 1, this consumption was distributed very unequally: North America and western Europe together accounted for almost three-fifths of the total, whereas the Caribbean and Latin America, the Middle and Far East, Oceania and Africa all together totalled little more than one-tenth. In part this was due to differences in the sizes of population, as in Oceania, but the chief reason for the disparity in energy use in different parts of the world was the much greater disparity in per capita consumption, discussed below.

The figure for total world energy consumption in any year has little meaning by itself, however.

Table 1
World energy use, 1959

Region	Aggregate (million metric tons of coal equivalent)	Per cent of world total	Per capita (kilogramme of coal equivalent)
North America	1,485	37.4	7,634
Caribbean America . .	67	1.7	788
Other American States .	56	1.4	481
Western Europe	769	19.4	2,376
Middle East	31	0.8	233
Far East	185	4.7	226
Oceania	45	1.1	2,824
Africa	58	1.5	311
Other countries	1,269	32.0	1,229
WORLD	3,966	—	1,360

SOURCE: Statistical Office of the United Nations, *World Energy Supplies, 1956-1959* (United Nations publication, Sales No.: 60.XVII.6).

Table 2

Percentages of annual growth rate in total world energy consumption, selected years and periods

Year	Gain over preceding year	Gain in preceding three years	Gain in preceding five years	1949- 1959	1937- 1959	1929- 1959
1959 . .	5.70	5.0	6.3	5.5	3.6	2.9
1958 . .	5.71	5.2	5.6			
1957 . .	3.65	6.7	5.1			
1956 . .	6.30	6.3	4.9			
1955 . .	10.19	5.3	5.0			
1954 . .	2.41	2.7	4.8			
1953 . .	3.40	4.3	—			
1952 . .	2.37	6.0				
1951 . .	7.02	—				
1950 . .	8.81					
1949 . .	2.0					
1937 . .	0.8					
1929 . .	—					

SOURCE: See table 1.

It was large in 1959 in relation to levels in past periods and it was the largest in history, as was consumption in each succeeding year subsequent to the Second World War. But these historically high levels acquire real significance in the growth they reveal and in the indications of very much higher levels to come in the future.

Table 2 examines recent growth rates in the data provided by the United Nations Statistical Office. It is apparent that growth in the post-war period of 1949 to 1959 was much faster than during the pre-war years. Much of this is no doubt due to the impact of the great depression of the nineteen-thirties and recovery from the Second World War, but there appears to be some evidence, not yet unequivocal, that the growth rate is still accelerating. Even without further acceleration, at the 1949-1959 average growth rate total world consumption in the year 2000 would reach the level of 35,600 million metric tons of coal equivalent.

Growth rates are not, of course, uniform throughout the world. Table 3 shows the regional variation in the average annual rate over the period 1951-1959. The industrially most mature regions of North America, western Europe and Oceania (dominated statistically by Australia) exhibit the lowest rates, all well below the world average. The less developed regions, correspondingly, show the higher rates. This conforms to the expectation that the already high level of consumption in the advanced countries would increase at a slower rate.

Table 1 shows that the disparity in total regional energy consumption is in part due to differences in population size, as in Oceania, but that the chief reason is the much greater disparity in per capita consumption. The growth rates in world and regional per capita energy consumption are given in tables 3 and 4. Again, the growth varies regionally and again, the industrially more mature countries exhibit growth rates below the world average (see table 3).

Table 3

Percentages of average annual growth rate in aggregate and per capita energy consumption, 1951-1959, by world regions

Region	Aggregate	Per capita
North America	2.1	0.2
Caribbean America	8.5	5.7
Other American States	5.7	3.3
Western Europe	2.4	1.6
Middle East	6.3	1.9
Far East	6.6	5.2
Oceania	4.0	1.3
Africa	5.4	5.5
Others	11.6	9.4
WORLD	5.0	3.0

SOURCE: See table 1. Regions as defined therein.

Table 4

Percentages of growth rate in world per capita energy consumption

Year	Gain over preceding year	Gain in preceding three years	Gain in preceding five years	1949-1959	1937-1959	1929-1959
1959 . .	3.18	2.7	4.0	2.7	1.9	1.5
1958 . .	3.45	3.1	3.6			
1957 . .	1.59	4.4	3.4			
1956 . .	4.41	4.3	3.2			
1955 . .	7.23	3.7	2.6			
1954 . .	1.44	1.5	1.5			
1953 . .	2.60	1.6	—			
1952 . .	0.56	1.1				
1951 . .	1.51	—				
1950 . .	1.34					
1949 . .	1.2					
1937 . .	0.3					
1929 . .	—					

SOURCE: See table 1.

In addition, the Middle East shows an anomalously low growth rate, indicating that during the period covered by table 3, at least, that region was falling behind the rest of the world in the intensiveness of energy use. In the other less developed regions the low absolute level of per capita energy consumption shown in table 1 is to some extent counterbalanced by a high growth rate in this measure.

The stronger evidence of an increasing growth rate in the figures in table 4 supports the suggestion of an increasing rate in total energy consumption. In any event, energy consumption is clearly growing at a faster rate than population.

ENERGY CONSUMPTION BY SOURCE

It is evident from table 5 that the pattern of world consumption of energy from conventional sources has been undergoing a progressive shift of long duration from coal to petroleum and natural gas. Whereas coal accounted for four-fifths of the total in 1929,

Table 5

World consumption of conventional energy, percentage of total by energy source, selected years, 1929-1959

Year	Solid fuels	Liquid fuels	Natural gas	Hydropower
1959 . . .	53.2	30.6	14.2	2.0
1958 . . .	54.3	30.2	13.6	2.0
1957 . . .	54.8	30.2	13.1	1.9
1956 . . .	55.6	30.0	12.5	1.9
1955 . . .	56.4	29.4	12.3	1.8
1954 . . .	56.3	28.8	13.1	1.8
1953 . . .	57.6	27.9	12.6	1.8
1952 . . .	58.7	27.1	12.3	1.8
1951 . . .	60.3	26.1	11.8	1.7
1950 . . .	62.3	25.2	10.8	1.6
1949 . . .	64.0	24.1	10.3	1.6
1937 . . .	74.5	18.0	6.3	1.2
1929 . . .	79.8	14.9	4.4	0.8

SOURCE: See table 1.

by 1959 its share had been reduced to only a little more than one-half. In recent years, according to the figures in table 5, the pace of this shift appears to have slowed. This is a reflection, however, of what has happened in the United States.¹ As shown in table 6, in the world exclusive of the United States the shift has continued without such a slowdown in recent years.

The shift is merely a manifestation of the differential rates of growth in the use of the several energy sources for, although coal has been losing ground relative to the others, there has been an absolute growth in its consumption as well. Over the period 1929-1959 the average growth rates as shown in the United Nations statistics were: solid fuels, 1.5 per cent; liquid fuels, 5.3 per cent; natural gas 6.9 per cent; and hydropower, 5.9 per cent.

In addition to the so-called conventional sources there are what have been termed the "non-commercial energy sources". Statistics on the consumption of fuelwood and agricultural wastes (dung, straw, corncocks, bagasse, etc.) are almost wholly lacking, yet in some regions and countries energy from such

Table 6

Percentage of total conventional energy consumption by energy source, world excluding the United States, selected years, 1955-1959

Year	Solid fuels	Liquid fuels	Natural gas	Hydropower
1959 . . .	68.5	24.9	4.2	2.4
1958 . . .	69.8	24.1	3.7	2.4
1957 . . .	70.4	24.1	3.2	2.3
1956 . . .	71.5	23.6	2.6	2.3
1955 . . .	73.0	22.3	2.4	2.3

SOURCE: See table 1.

¹ See Sam H. Schurr, Bruce C. Netschert, *et al.*, *Energy in the American Economy, 1850-1975* (Baltimore, Johns Hopkins Press, 1960).

sources may be a significant or even dominant portion of the total energy input. Unfortunately, the estimates or guesses that have been made in the absence of statistical data on the consumption of these materials have tended to consider use for cooking only, excluding use for space heating, with some coverage of industrial use, and are thus minimal. "This introduces a possibly serious understatement in many energy consumption estimates, with the largest proportional effect being felt in under-developed countries whose total is small."²

It is nevertheless useful to accept, as having reasonable validity, the few guesses that have been made concerning the proportion of total world energy consumption that comes from wood and agricultural wastes. Putnam has estimated that the use of fuelwood accounted for 4 per cent of the energy input from mineral fuels, hydropower and fuelwood.³ Ayres and Scarlott used a figure for fuelwood of 7 per cent of the total from all sources; and Thirring estimated that fuelwood accounted for 4 to 7 per cent of total world energy use in 1955.⁴ The United Nations analysis of energy input in the non-communist countries of the world in 1952 yielded a figure of 4 per cent of the total of inanimate energy for fuelwood.⁵ For present purposes fuelwood can be considered to constitute the proportion estimated by the United Nations.

From a sampling of eight countries accounting for some five-sixths of total world energy input from the conventional energy sources in 1937, Putnam concluded that the input from agricultural waste equalled some 20 per cent of the total world input

² E. S. Mason, "Energy Requirements and Economic Growth", *Proceedings of the International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy*, Geneva, 1955 (United Nations publication, Sales No. : 56.IX.1. Vol. 1), p. 54, footnote.

³ Palmer Putnam, *Energy in the Future* (New York, van Nostrand, 1953), p. 172.

⁴ Eugene Ayres and C. A. Scarlott, *Energy Sources—The Wealth of the World* (New York, McGraw-Hill, 1952), p. 232; Hans Thirring, *Power Production* (London, Harrap, 1956), p. 221.

⁵ United Nations, Department of Economic and Social Affairs, "World Energy Requirements in 1975 and 2000", *Proceedings of the International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy*, Geneva, 1955, Vol. 1, p. 3 *passim*.

Table 7

Present pattern of world energy input from all conventional sources

Source	Per cent of total	
	United Nations 1952 ^a	This paper, 1959 ^b
Coal and lignite	41.8	46
Liquid fuels	32.0	26
Gas	10.4	12
Agricultural wastes	8.5	10
Wood	5.5	4
Hydropower	1.7	2

^a SOURCE: "World Energy Requirements in 1975 and 2000" (see footnote 5), pp. 21-22.

^b Derivation: Total world consumption, 1959, mineral fuels and hydropower, 3,966.43 million metric tons of coal equivalent (*World Energy Supplies, 1956-1959*). If this is 95 per cent of the total including wood, that total becomes 4,175.19 million. Assuming agricultural waste to be equal to 10 per cent of the grand total, the latter becomes 4,639.10 million metric tons.

from those sources, but was under no delusions as to the accuracy of this estimate, suggesting that it might range from 10 per cent to 40 per cent.⁶ Ayres & Scarlott again used a higher figure, estimating the energy input from agricultural waste to be "about 3.5 times" that from fuelwood, or 24.5 per cent of the total.⁷ The United Nations analysis of 1952, however, yields the low end of Putnam's range, or 10 per cent, and this is adopted here as a conservative estimate.

With these assumptions, the suggested present pattern of world energy input is shown in table 7 and compared with an earlier, detailed compilation by the United Nations (the current uses of the new sources can be ignored here, since they constitute no more than a fraction of one per cent of the total). Although the specific percentages in both estimates contain a large element of error, there is sufficient agreement to warrant the conclusion that the general proportions are probably correct.

This over-all pattern conceals a considerable regional variety, as is shown in table 8. For many of

⁶ Putnam, op. cit., p. 444.

⁷ Ayres and Scarlott, op. cit., p. 232.

Table 8

Pattern of energy input from all conventional sources, by world regions, 1952^a

Region	Per cent of total sources				
	Solid fuels	Liquid fuels	Gas	Hydropower	Non-commercial sources
North America	34.1	36.6	24.1	1.7	3.5
Caribbean America	3.3	53.2	7.6	1.1	35.0
Other American States	10.2	38.7	4.0	1.9	45.2
Western Europe	77.7	12.2	0.4	2.5	7.2
Asia	29.6	10.0	0.6	1.8	58.0
Oceania	57.5	28.3	—	1.6	12.6
Africa	34.6	14.6	—	0.2	50.5

SOURCE: "World Energy Requirements in 1975 and 2000", pp. 18-20.

^a Excluding communist countries.

the under-developed countries it is apparent that the non-commercial sources are dominant.

The implications of these energy source patterns for the new sources lies as much in the uses to which the various sources are put as in their relative importance within the total energy input pattern. Before looking at the pattern by function, however, a few observations are pertinent on the implications of the source pattern alone.

Because of the haphazard occurrence of all the conventional energy sources in relation to the location of the demand for energy, they cannot be utilized without transportation of the source itself or of the energy derived from it. The transport costs are an important element in the delivered price of energy and restrict both the distances and quantities involved.

Table 9 compares the transport costs, in terms of unit energy content and for a standard distance, of conventional energy. It must be emphasized that the figures are extremely rough, for not only are transportation costs constantly changing, but there is a wide range in the transport cost of the same commodity by the same means in different parts of the world, and the means themselves can vary considerably (tanker size, pipeline diameter, etc.). Nevertheless, table 9 provides a useful measure on a rough scale of the relative costs for different commodities by different means.

It is clear that water transport is by far the cheapest method, and that the economies of scale provided by large ocean ships are considerable. The initial advantage of oil in this respect is enhanced by its ease of handling. As a liquid, it is conveniently transhipped at low cost, giving it a further advantage not included in table 9. It is not surprising, therefore, that oil is the most "active" energy commodity in world commerce. World trade in crude oil alone (aside from that in its products) represents one-third of total crude production. Nevertheless, transportation of crude oil and its products is the

cheapest of all energy movements only in bulk tanker movement. Transport inland by barge, pipeline, tank car or tank truck is, in increasing order, much more expensive. Imported oil, in other words, is relatively cheap only at ports of entry.⁸

Coal is both bulky and heavy, and as a solid, its handling is expensive; it is not surprising that international trade in coal averages only 8 per cent or so of total world production, given the alternative of oil use. Even within countries, if overland transport is needed, this keeps transport costs high. Thus a country of any size is not necessarily fortunate in regard to energy if it contains good coal resources. For an under-developed country the very large capital requirements of an adequate railroad system still further diminishes the value of indigenous coal in its development.

Although the geography of natural gas occurrence has until recently inhibited the possibility of international trade in natural gas, the high cost of transporting it by pipeline, as yet restricted to overland transport only, has been an important deterrent to such trade. The very high cost of electricity transport, on the other hand, is unquestionably the dominant reason for the very minor portion of total world production (mostly in Europe and North America) that moves across international boundaries. Recent technological advances give promise of reduced costs for both forms of energy in the future: extra high voltage transmission of large blocks of electricity and undersea pipeline transmission or large-scale overseas transport of liquefied natural gas by tanker. It is not yet apparent, however, whether these will result in any basic changes in the source pattern of energy consumption. It is likely that for some time to come the new transport techniques will provide advantages to electricity and gas over oil only under special circumstances.⁹

For the vegetable fuels the transport problem is overwhelming. Their large bulk relative to energy content makes transport for any distance economically prohibitive. Their use is thus severely localized.

All this points to petroleum and its products as the most widespread conventional competitor facing the new sources on the world scene. In this connexion, the history of recent discovery suggests that petroleum is much more widespread in occurrence than has hitherto been realized. The more widespread its production, the less significant the transport cost, and the more ubiquitous it will be as a competitor.

⁸ The emphasis here is entirely on relative costs. The combination of low per capita energy demand and poor port facilities commonly present in under-developed countries is highly adverse. Most petroleum products move in small tankers, with higher transport costs in relation to distance. Thus oil may be expensive even at ports. (See C. J. Dwyer, *op. cit.* (table 9), p. 28.)

⁹ In electricity transmission, for example, the benefits of the transmission accrue only in the movement of large blocks of power. For very long distance transmission it is necessary, in addition, that the generating costs also should be low if the delivered cost of the electricity is to be economic.

Table 9

Relative transport costs of conventional energy^a

(Oil by super tanker = 100)

Long water transport	
Super tanker (oil)	100
Collier (coal)	225
Short water transport	
Barge (oil)	240
Barge (coal)	690
Long overland transport	
Railroad (coal)	1,975
Pipeline (oil)	375
Pipeline (gas)	640

SOURCE: Based on J. Davis, *Canadian Energy prospects* (Ottawa, Royal Commission on Canada's Economic Prospects, 1957), p. 348; and C. J. Dwyer, *Nuclear Energy and World Fuel Prices* (Washington, D.C., National Planning Association, 1958), p. 29.

^a Cost per unit energy content per 100 miles.

ENERGY CONSUMPTION BY FUNCTION

The function of energy use in man's economic activity falls into two basic categories: the provision of heat and the provision of power. These two types of function are performed within the consuming sectors, industry, agriculture, households and transportation. In the first three sectors both types are performed; the last consists entirely in power use.

Any attempt to analyse energy consumption in the world by function is handicapped by an acute deficiency of data. No statistics are collected on this basis; only a few analyses have been attempted by various groups and individuals. One such recent source for the world as a whole is the United Nations paper on world energy use presented at the first International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy, held in Geneva in 1955. The functional pattern given in table 10 is derived from the data presented in that study. It would be desirable to show the pattern for the under-developed regions of the world as a whole, or at least for the world except the United States and western Europe and their dominance in the statistics. Unfortunately, the data presented in the United Nations paper do not provide a breakdown by function and by country.

Some idea of the influence of the United States and the other highly industrialized countries on the world figures can be obtained from tables 11 and 12. The 53 per cent of total energy use that industry in Europe accounts for is somewhat higher than the 49 per cent figure for the world: in the United States, however, the proportion is nearer 40 per cent. Consumption in the domestic, or household, sector in Europe is also close to the proportion in the world as a whole (something less than 31 per

Table 10

Estimated functional pattern of world energy use in 1952

Function and sector	Per cent of total use
Heat	62
In industry	33
In households	29
Power	38
In industry	16
In households	2
In transportation	19
In agriculture	1

SOURCE : Derived from data presented in "World Energy Requirements in 1975 and 2000" (see footnote ¹).

Derivation of table 10

Total use	27.6
Heat (table XIII)	17.2
Industry (table VI)	9.2
Households (table IX)	8.0
Power (residual)	10.4
Industry (residual)	4.5
Transportation	5.2
Households	0.5
Agriculture	0.3

Table 11

Functional pattern of energy use in the United States, 1955

Function and sector	Per cent of total use
Heat	55.0
Space heating	23.8
(of which industrial)	(8.0)
Industrial processing	24.1
Household cooking	4.0
Commercial (cooking and "process")	3.0
Power	45.0
In industry	10.4
In households	4.6
In transportation	23.3
In agriculture	1.9
Other uses	4.8

SOURCE : Derived from data in Sam H. Schurr, Bruce C. Netschert, *et al.*, op. cit. (see footnote¹), part II and appendix.

cent), but in the United States it is less than 25 per cent. Transport use shows the widest divergence: 19 per cent for the world, 14 per cent for Europe, and 23 per cent for the United States, the latter figure reflecting the very high consumption by private automobiles. In agriculture the United States proportion is double that of the world as a whole—testimony, no doubt, to the high level of mechanization of agriculture in that country.

Under the statistical circumstances one can do little more than acknowledge the regional differences and treat the world as a whole. With due allowance for the crudity of the figures in table 10 (because the United Nations study made liberal use of estimates and assumptions to fill in the many statistical gaps) it appears that heat uses constitute some three-fifths to two-thirds of the total world energy use, with power uses accounting for the remaining two-fifths to one-third.

Within the heat category somewhat more than half, or about one-third of the total use, is for industrial heat. It would be useful to know how much of the industrial heat is used for processing, which involves high temperature, and how much for space heating, at comparatively low temperatures. It has been assumed that 25 per cent of the direct fuel input into industry in the United States is for space

Table 12

Consumption pattern of energy by sector in the OEEC countries, 1953

Sector	Per cent of total
Industry	53.7
Domestic and miscellaneous uses	31.0
Transport	14.3
Agriculture	1.0

SOURCE : L. Armand, *Some Aspects of the European Energy Problem* (Paris, Organisation for European Economic Co-operation, 1955), p. 54.

heating.¹⁰ As a reasonable first approximation this can also be applied to the world as a whole in view of the fact that most of the world's industry is concentrated within the same or similar climates as those within which United States industry is located. This suggests that industrial space heating would account for a maximum of 8 per cent of total world energy use.

It is also unfortunate that there is no available breakdown of the use of process heat into different temperature levels. Industrial process temperatures run the gamut from such high levels as those for refractories, ceramics, glass and cement, through the levels of many kinds of metallurgical and chemical processes at lesser but still elevated temperatures, down to the low levels of water heating in such activities as canneries and laundries. It has been estimated that one-eighth of the total world energy input goes into the making of iron and steel.¹¹ This would constitute more than one-third of the total use of industrial heat as shown in table 10.

Within the roughly 30 per cent of the total that constitutes the use of heat in households it can be assumed, in the light of the concentration of "high-energy households" in the middle and upper latitudes, that the bulk of the energy goes into space heating, the remainder for cooking at higher temperatures.

Within the power function it is perhaps surprising to find more energy use in transportation than in industry, an indication of the importance of the world's transportation activities in total energy use. Indeed, even the agricultural power use can be included within transportation, since it consists very largely of motive power in tractors. Also within the power function a distinction must be made between direct mechanical power (i.e., the use of power from a stationary engine for any purpose other than electricity generation) and electrical power, cutting across the categories in table 10. According to the United Nations analysis, over 92 per cent of the stationary power use was in the form of electricity.¹² This would suggest that direct mechanical power accounts for only around one per cent of total energy. At the same time, the transportation function consumes almost all its energy mechanically—less than 5 per cent of the total is electricity, according to the United Nations.

What are the implications of this functional pattern for the new energy sources? Without going into the matter of costs it is possible to point out the advantages and disadvantages of the new sources in the several functional areas. The entire heat function can be ruled out at once as an application

of wind energy. Although it is physically possible to convert wind energy into electricity, which in turn could be used to produce heat, the combined energy losses in the two conversions make "wind heating" impractical, especially in competition with any other sources in which the contained energy is initially available in the form of heat.

The application of geothermal energy within the heat function is limited by its characteristics described in the introduction. Obviously, the highest temperature of the natural steam is the limiting temperature at which it can be used. To date the maximum temperature obtained at the surface in geothermal wells is not over 200°C, although temperatures of more than 300°C have been reported downhole. This falls within the medium temperature range of industrial processes and rules out all higher temperature processes. On the other hand, the available temperatures are more than adequate for space heating, the limitation here being the fortuitous occurrence of the geothermal energy at a site where the climate requires space heating and where the population density is sufficient to make space heating through a central station practical.

Of the three new sources, only solar energy possesses the characteristics making it possible to apply it to any use within the heat function over the whole temperature range. With a focusing collector, temperatures of 3,000°C can be obtained—higher than that found in all but the most advanced industrial processes. At the same time, most pyrometallurgical operations in which ore is reduced to metal are ruled out because of the double function of coke in those processes as a heat source and reducing agent. For the other industrial heat processes the suitability of solar energy is largely a matter of scale. As noted in the introduction, there are no economies of scale in the use of solar energy, hence it is at a disadvantage when faced with the large-scale demands of most industrial processes. The same characteristic becomes an advantage, however, at the smaller scale but higher temperature level of household cooking. These relations are, of course, responsible for the heat applications of solar energy that have received the most emphasis to date: the small-scale, very high temperature solar furnace, the solar heating of homes and small commercial establishments, and solar cookers.

Turning to the power function, transportation can at once be eliminated as an application for all three of the new sources except through electricity, as in the use of geothermal electricity by railroads in Italy. (Wind energy captured in a sail is not a "new" source and can be ignored in the same manner as the solar drying of agricultural products spread on a field can be ignored as a heat application of that energy source.) Modern transportation requires a portable source of high unit energy content. Indeed, all direct mechanical energy use on a large scale can be considered unsuitable as an application for any of the new sources. On a small scale, wind and solar energy can be considered to have limited utiliza-

¹⁰ G. W. Rusler, "Nuclear or Solar Energy: Which is More Practical for Space Heating?", *Heating, Piping and Air Conditioning* (Chicago, Keeney Publ. Co.), vol. 31, No. 2 (February 1959), p. 109. This assumption is used in table 11.

¹¹ E. A. G. Robinson and G. H. Daniel, "The World's Need for a New Source of Energy," *Proceedings of the International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy*, vol. 1, p. 42.

¹² "World Energy Requirements in 1975 and 2000" (see footnote 5), p. 8.

Table 13

Electricity production as a percentage of total energy consumption

(Average, 1956-1959)

Region	Total energy consumption (million metric tons coal equivalent)	Electricity production (million kWh)	Coal equivalent ^a of electricity (million metric tons)	Electricity as per cent of total
World	3,673	1,874.36	234.3	6.4
North America	1,440	826.06	103.3	7.2
Caribbean America	62	21.76	2.7	4.4
Other American States	54	34.98	4.4	8.1
Western Europe	772	465.10	58.1	7.5
Middle East	29	8.54	1.1	3.8
Far East	169	110.27	13.8	8.2
Oceania	42	27.76	3.5	8.3
Africa	55	30.44	3.8	6.9
Other countries	1,049	349.46	43.7	4.2

SOURCE: *World Energy Supplies, 1956-1959* (see footnote to table 1). Regions as defined therein.

^a At 0.125 metric tons per 1,000 kilowatt-hours, as in source.

tion in stationary applications such as irrigation pumping.

The common ground for application of all the new sources of energy is in electricity generation. As shown in table 13, electricity production currently averages some 6 per cent of aggregate energy input from mineral fuels and hydropower. The proportionate size of electricity in the total energy scene within a country depends upon such diverse elements as climate (the importance of space heating) and the place of transportation in aggregate economic activity, as well as on the degree of electrification of the economy. In view of the well known increase of productivity and income through electrification, it can confidently be assumed that in the underdeveloped regions of the world, at least, the place of electricity in the total energy picture will be larger in the future. Here the characteristics of wind and solar energy are advantageous. It has been observed that the immediate benefits of electricity in the underdeveloped countries can best be obtained on a small scale. The conversion of both wind and solar energy to electricity is practicable through a capacity range from watts to kilowatts. Since the conventional energy sources are ill adapted to such use, this application of the two new sources would probably constitute a net addition to energy input and electricity production rather than a replacement of the conventional sources, with the exception of internal combustion electricity generation.

FUTURE DEMAND-SUPPLY POSITION IN CONVENTIONAL ENERGY SOURCES

With an already large total energy use in the world, constituting a large drain on the conventional energy sources, and with even higher levels a certainty in the future, there has developed an understandable

concern about the adequacy of conventional energy resources to sustain the future growth in demand. In the over-simplified view this is seen as a question of physical exhaustion of the conventional sources. This course of events would mean that the world would at some point turn perforce, and rather abruptly, to new energy sources.

But this will not happen. The question is in truth one of relative scarcity, where advanced resource depletion, when it occurs, will become apparent or will make itself felt through rising energy costs. Alternative energy sources would then become relatively cheaper, and opportunities for the new sources to supplant the conventional sources would open up gradually. The question then becomes the pace and timing of such a development.

The projection of future world energy demand is an exercise in itself, and in view of the degree of uncertainty inherent in even the most thorough work it is unnecessary for present purposes to develop new and independent projections. A useful authoritative source of recent opinion on this score is provided in a report prepared for the Joint Committee on Atomic Energy of the United States Congress. According to the projections presented therein, total world consumption of energy from conventional sources in 1975 should be 7,710 million metric tons of coal equivalent, and in the year 2000, 14,879 million metric tons of coal equivalent.¹³

It would be futile to argue the merits of these figures. For present purposes the projections need serve only as working assumptions with which to gauge the cumulative demand through the end of the century. It is significant, however, that the growth rates implicit in these projections are lower, both in the aggregate and for each of the individual sources, than in the period from the Second World War to the present. For aggregate consumption the implied rates are 4.4 per cent per annum for the period 1960-1975 and 2.6 per cent from 1975 to 2000, or an average of 3.3 per cent over the forty years 1960 to 2000. The further decline in the growth rate after 1975 is projected for each of the individual energy sources except hydropower, as well as for the aggregate.¹⁴

These growth rates are, on the other hand, in the same range as those of the longer term past periods—3.6 per cent from 1937 to 1959, and 2.9 per cent from 1929 to 1959 (see table 2). Although this point is nowhere discussed in the Committee's document, the question is one of great fascination and importance. Are the present higher rates temporary and is the suggestion of recent acceleration no more than

¹³ Basic data from Joint Committee on Atomic Energy, Congress of the United States, *Review of the International Atomic Policies and Programs of the United States* (Washington, D.C., U.S. Government Printing Office, 1960), vol. 4, *passim*. Conversion factors applied to these data taken from *World Energy Supplies, 1956-1959* (see footnote to table 1).

¹⁴ For reasons noted in the Committee's report, the hydropower projection is considered to be substantially lower than what can actually be expected.

that? In view of the conclusions reached by Robinson and Daniel in their analysis of the very long-term record of energy consumption and its relation to economic growth,¹⁵ the recent rates may be considered a temporary aberration, and the projection above can be accepted as reasonable.

But actual demand is for energy in specific forms; it is conceivable that an acute scarcity (indicated by an inordinate price increase) could develop in one of the energy sources, even though total energy resources were sufficient (regional supply-demand relationships must of necessity be passed over here).

The cumulative projected demand of the world for the individual fossil fuels through the year 2000 is given in table 14, based on the United States Congressional Committee's report referred to above. Against these requirements can be placed the reserve and resource estimates also presented in the report. As used here, the term "reserves" means the natural stocks, known to exist, of material that can be recovered with present technology and under current economic conditions; "resources" include those natural stocks, in addition, whose recovery may or may not be technically and economically feasible at present, and which are either known or presumed to exist. The resources are "potential" in that their future availability is hypothetical. Nevertheless, they provide a measure of what is thought to be afforded by the environment for future technology to work on through the remainder of the century. The various estimates in the Committee report are consolidated on this basis in table 15.

Much could be said about the validity of these figures, but again, for present purposes, they can be taken as given. When table 14 is compared with table 15 it is evident that for the world as a whole

¹⁵ Robinson & Daniel, *op. cit.* (footnote 11). They considered the range of 2 to 3 per cent as being most representative of the longer term.

the indicated cumulative demand for coal during the next forty years should readily be met from reserves. The situation for oil and gas is different, however; the existing reserves are very much less than the indicated cumulative demand. Although a portion of the additional potential resources consists of oil already known to exist but currently not economically recoverable, the larger portion is what is presumed to exist but has not yet been found. If the estimates are correct, the oil and gas resources of the earth's crust are more than ample to take care of the world's needs for the remainder of the century, provided (a) the presumed resources actually exist and (b) the resources that exist can be found and exploited economically.

If the resources should prove to be inadequate, the world's needs for liquid and gaseous hydrocarbons can also be met from other sources. Both methane and petroleum products can be produced from "oil shales" and "tar sands", rocks with a high hydrocarbon content. Estimated world resources of this type as given in the Congressional Committee's report are :

Oil shale (shale oil content)	267 × 10 ⁹ metric tons
Tar sand (hydrocarbon content) . .	133 × 10 ⁹ metric tons

These resources have the advantage of not depending on discovery; they are known to exist, and the estimating problem is merely one of measurement. This advantage is offset by the disadvantage of being uneconomic at present. (Small shale oil operations are carried on at several places in the world, but none is unequivocally economic.) Nevertheless, the technical feasibility is already demonstrated, and there is evidence that the use of these resources even now would entail only slightly higher costs at the point of production. Beyond this there are the very large resources of coal, also available as a source of liquid and gaseous hydrocarbons. Again, technical feasibility has been

Table 14

Cumulative projected world demand for the fossil fuels, 1960-2000

Coal	122.29 × 10 ⁹ metric tons
Oil	114.7 × 10 ⁹ metric tons
Gas	66.128 × 10 ¹² cubic metres

Table 15

Estimated world reserves and resources of the fossil fuels

Fuel	Reserves	Additional potential resources
Coal and peat	858 × 10 ⁹ metric tons	1,864 × 10 ⁹ metric tons
Liquid hydrocarbons (crude oil and natural gas liquids)	52.8 × 10 ⁹ metric tons	729 × 10 ⁹ metric tons
Natural gas.	18 × 10 ¹² cubic metres	214 × 10 ¹² cubic metres

demonstrated, but in this instance the currently indicated cost increase is large.

Hydropower, the remaining conventional energy source, is renewable, hence one cannot measure cumulative "demand" (i.e., production) against resource estimates. Rather, the degree of resource utilization can be measured by comparing the projected hydropower output in the terminal year 2000 against the estimated potential annual output. In the Committee's report world hydropower output in the year 2000 is projected as 1.2×10^{12} kilowatt-hours, excluding the Communist countries for which data are insufficient. The potential annual hydropower output in the world, as projected in the Committee's report on the same coverage, is estimated to be 10.2×10^{12} kilowatt-hours; thus the projected hydropower output in 2000 would be only some 15 per cent of the potential.

The picture of the future world energy position through the remainder of the century which the foregoing presents differs drastically from that offered as recently as five years ago. At that time conventional energy reserves (including the undiscovered potential as then estimated) were considered to be so small relative to indicated future needs that the world could be expected to face significant increases in the cost of energy from those sources within a few decades. It now appears that the conventional energy resources are much larger than was previously suspected—so much larger, indeed, that the present patterns of energy use by source, or something like them, could continue well into the next century, and the possibility that this would occur only at substantially higher costs is correspondingly reduced.

As a generalization applied to the world as a whole this statement cannot be interpreted too rigidly; allowance must be made for the transportation aspect (see above). The enormous hydropower resources of Africa, for example, are not available to meet the electricity needs of other continents or, for that matter, of much of Africa itself, because of the severe cost limits on the distance over which electricity can be transmitted except in very large blocks.

It is thus logical, as has recently been pointed out,¹⁶ to expect an increase in world reliance on petroleum (and to a lesser extent, natural gas) as an energy source, at least through the end of the century. It is no coincidence that the projections of world energy demand summarized above foresee petroleum accounting for almost half the total world energy consumption from conventional sources in 2000, compared with less than one-third in 1960; or that oil and gas together account for less than one-half the total in 1960, compared with almost three-quarters in the year 2000. Oil thus seems

destined to become even more important as a competitor facing the new energy sources.

It must be kept in mind that the foregoing indicates optimism only in the matter of cost as it is affected by resource availability and technological progress. Even with no increase in cost on this score, it is possible that the price of the energy commodity might be higher owing to other cost determinants, to national trade policies and to short-term imbalances between demand and supply leading to the higher market determined price.

For the long-term response of supply to demand the projections assume adequate discoveries. What if these are not forthcoming? As a first supplementary source there are the known petroleum resources currently unrecoverable economically. In the United States only one-third of the oil in place, on the average, is currently recovered. Data are not available for the rest of the world, but there is no reason to believe that recovery is substantially better elsewhere—if, indeed, it is as good. Developments in the United States now indicate that average recovery levels can be doubled or more with new techniques being perfected, and in view of the pace of modern technological progress it is wholly reasonable to assume the successful utilization of the bulk of these resources not only in the United States, but in the rest of the world, at little if at all higher costs, especially if stimulated by inadequate discovery of new reserves.

Recourse to the oil shales and tar sands as a second supplementary source could well bring with it higher costs, as noted above. It is not yet possible to say categorically that this should not occur, but if these resources are, as claimed, already marginal, there are strong grounds for expecting technology to keep costs from rising much more than, say, 10 per cent, under the stimulus which the need for these sources would create.

All this is, moreover, aside from the possibilities of atomic energy. Although the earlier over-optimism on this score has now been succeeded by sober conservatism, it seems to be agreed that atomic power will be commercial on a large scale well before the end of this century. To the extent that this occurs, the demands on the conventional fuels—especially coal, but in many places to a significant degree oil and gas—will be lessened, and the possibilities of resource stringencies and resultant cost increases thereby lessened.

These conclusions are of great importance for the new energy sources. Their proponents, and those engaged in research and development, should not look on them as available in the foreseeable future as the alternative to depleted, higher-cost conventional resources. If the new sources do come to be widely employed in the next few decades, it is not likely to be because of rising costs of conventional energy. There will, in other words, be no opportunity for at least the next several decades for a massive advance by the new energy sources because the energy markets of the world, or even an appreciable portion

¹⁶ J. L. Ivers and E. Symonds, "Energy for Economic Development," paper presented at the Second Arab Petroleum Congress, Beirut, 19 October 1960.

of them, have turned to them as a means of deliverance. For this to happen, the new sources would have to offer clear cost advantages — not merely equal costs, but such attractive savings that institutional obstacles to the use of the new sources can be overcome through strong economic motives.

These institutional obstacles take several forms. The recent development of geothermal energy in California, for example, did not occur because it suddenly became economic. The potential was known for many years; its exploitation involved the risk of working with the unknown as against the conventional alternative of the fossil-fuelled steam plant.

Another institutional obstacle is apathy and ignorance. The lack of awareness of economic opportunity may be especially relevant for the small-scale energy application. There is available in Japan a simple solar water heater that pays for itself in fuel savings in about four months; as yet there appears to be no awareness of its potential savings in countries and regions with fuel costs even higher than those in Japan.

Even with the awareness, however, convenience and habit may override the economics. Househeating in some areas of the world is by electricity, despite the known alternative of cheaper furnace heating.

This preference is probably abetted by the cheaper first cost of electric heating, which outweighs in the consumer's mind the discounted present value of the savings in fuel costs over electricity. Given a free choice by the consumer, the institutional obstacles of indifference to the economic advantage may never be overcome. As has been frequently noted, habit and custom may be especially strong obstacles to change. The change from indoor open-fire cooking to outdoor solar cooking has had only slight success in experiment, partly because of the cost of the appliance, to be sure, but even the high cost of fuel or the advantage, as in India, of using dung for fertilizer instead of burning it does not seem to weigh much against the aversion to outdoor cooking.

All of which underscores the desirability, if not the necessity, for large, obvious savings to be offered by recourse to the new energy sources, if they are to be adopted on even a modest scale in the foreseeable future. The most attractive opportunities exist for the small-scale application, for use by individuals or households. The emphasis, accordingly, should be on a lowest possible first cost. This, together with the costless energy itself from the new sources, should provide the necessary large cost advantages and thus the stimulus for overcoming the institutional obstacles.

LES NOUVELLES SOURCES D'ÉNERGIE ET L'ÉCONOMIE ÉNERGÉTIQUE DU GLOBE

(Traduction du mémoire précédent)

Bruce C. Netschert *

National Economic Research Associates
Washington (D. C.)

et

George O. G. Löf **

Ingénieur conseil
Denver (Colorado)

INTRODUCTION

Au cours des années qui se sont écoulées depuis la fin de la seconde guerre mondiale on a vu se développer, dans le monde, un vif intérêt et un effort concerté, qui évoluent suivant deux voies, pour compléter les sources classiques d'énergie constituées par les combustibles d'origine fossile et végétale et la houille blanche par de nouvelles sources de force motrice utile. Il s'agit, pour la première, de la mise en œuvre économique d'une source d'énergie récemment découverte, la fission atomique, avec ce que l'on pourrait considérer comme son corollaire, la fusion. Paradoxalement, la seconde porte sur quelque chose de presque diamétralement opposé, la mise en œuvre, sur des bases économiquement acceptables, des sources d'énergie les plus prometteuses dont l'existence est connue de l'homme depuis des temps immémoriaux — le rayonnement solaire, les vents et les ressources de l'intérieur du globe.

Bien que ces sources d'énergie soient identifiées comme « nouvelles » par la Conférence, ce sont les premières qui aient été connues de l'homme et il en a toujours été conscient, sans avoir à accumuler des connaissances particulières. L'intérêt qui se manifeste vis-à-vis d'elles, au stade avancé actuel du développement technologique de l'humanité, est à certains égards une mesure des progrès qui ont été réalisés. Ce n'est que grâce aux nouvelles connaissances, aux matériaux récemment mis au point et aux techniques ultra-modernes que leur exploitation sur une échelle appréciable en concurrence avec les sources classiques d'énergie, peut sembler conce-

vable. Cette nouvelle orientation de l'intérêt semble également présenter quelque lien avec les préoccupations, actuellement de plus en plus généralisées, qui se font jour en ce qui concerne les besoins d'énergie de l'humanité pour l'avenir, avec la mise en œuvre de l'énergie nucléaire et l'attente d'une augmentation des frais afférents à l'énergie en provenance des sources classiques indiquées par les recherches de la première moitié de la décennie qui va de 1950 à 1960. Finalement, l'intérêt vis-à-vis des « sources nouvelles » a été suscité par les problèmes que soulève le besoin d'accélérer la complète mise en œuvre des pays sous-développés, dont beaucoup n'ont que des ressources nationales en énergie classique fort limitées et pour lesquels un apport d'énergie à prix modique constitue une condition préliminaire *sine qua non* de développement économique.

On se propose, dans le présent mémoire, d'ébaucher les limites et la nature des possibilités qui s'ouvrent aux nouvelles sources d'énergie en rapprochant ce que l'on sait de leurs caractéristiques physiques et économiques des niveaux et des régimes d'utilisation de l'énergie dans le monde, tant actuels qu'attendus pour un proche avenir.

CARACTÉRISTIQUES DES NOUVELLES SOURCES D'ÉNERGIE

Les énergies solaire, éolienne et géothermique présentent nombre de caractéristiques qui les distinguent des sources classiques et entre elles. L'importance des ressources, leur répartition, les limites imposées à leur utilisation et diverses autres caractéristiques sont entièrement propres à chacun de ces types. Ce sont ces caractéristiques mêmes qui dictent, dans une large mesure, le type, l'étendue, l'emplacement et la période d'application de ces réserves énergétiques.

* Ancien associé du groupe Resources for the Future, Inc. (Resources d'avenir, S.A.), Washington.

** Conseil de Resources for the Future, Inc., Washington (D.C.) [États-Unis]; chargé de recherches, université du Wisconsin.

Énergie géothermique

Des trois sources considérées ci-dessus l'énergie géothermique est celle dont les disponibilités semblent être les plus restreintes, mais dont la technologie d'application semble la plus évoluée. Il faut, généralement parlant une combinaison plutôt fortuite de grosses masses de roches chaudes fracturées ou poreuses situées à une profondeur ne dépassant pas quelques centaines de mètres, un apport naturel d'eau à cette source de chaleur et une couche de roches imperméables entre la zone chaude et la surface. Si on fonce des puits dans ces matières chaudes, on peut en soutirer de la vapeur sous une pression atteignant plusieurs dizaines de kilogrammes par centimètre carré, d'une manière entièrement analogue à celle dont on se sert pour la production de

gaz naturel. Que l'on dispose d'un nombre suffisant de puits et de moyens appropriés pour accumuler la vapeur et on pourra exploiter une centrale électrique constituée, le plus souvent, par une turbine à vapeur, un condenseur et une génératrice d'électricité. De grandes installations sont actuellement en service dans le nord de l'Italie et en Nouvelle-Zélande. Dans certaines conditions, telles que celles que l'on rencontre en Islande, à Reykjavik, on peut utiliser la vapeur directement pour le chauffage, dans des conditions économiquement satisfaisantes.

Pour servir de guide en ce qui concerne ces caractéristiques de diverses sources, on présente ci-dessous un tableau des principales indications qui ont quelque importance quant à l'utilité de chacune d'elles :

Caractéristiques des nouvelles sources d'énergie

Caractéristiques	Forme d'énergie		
	Géothermique	Éolienne	Solaire
Répartition géographique dans le monde	Dispersée	Universelle, à l'exception des régions équatoriales	Tropiques et latitudes moyennes
Répartition géographique dans les régions où elle est généralement disponible	Éminemment localisée	Limitée	Excellente
Stabilité d'apport aux emplacements favorables :			
Horaire	Excellente	Acceptable	Faible
Saisonnnière	Excellente	Bonne	Acceptable
Constance ou stabilité du débit avec accumulation diurne d'énergie	Sans intérêt	Acceptable	Acceptable
Constance du débit avec mise en réserve de plus longue durée	Sans intérêt	Bonne	Bonne
Type d'énergie fournie	Chaleur et force motrice	Force motrice	Chaleur et force motrice
Concentration de l'énergie sous sa forme brute ou naturelle	Modérée	Faible	Faible
Quantités totales théoriques disponibles en vue de leur conversion, à comparer avec l'emploi des sources classiques	Probablement très faibles	Faibles	Immenses
Dimensions probables de chaque installation	Assez grandes	Petites	Petites au départ
Connaissance des sources	Limitée	Assez développée	Développée
État du développement :			
Outillage	Avancé	Considérable	Limité
Applications	Appréciables	Peu nombreuses	Très rares

Il est possible que les sources de vapeur naturelle qui se présentent dans des conditions commercialement exploitables soient plus répandues qu'on ne le suppose d'une manière générale, en raison du très petit effort de prospection fait dans ce domaine. Les découvertes ont été dues à la présence de sources chaudes en surface et à des accidents, survenus au cours de forages faits à la recherche de minéraux. D'après les indications dont on dispose actuellement, ce type d'énergie semble s'adapter au mieux à un emploi intense dans des régions localisées et très dispersées. Les combinaisons d'un besoin d'énergie

et de la rareté de celle-ci avec les disponibilités d'énergie géothermique doivent probablement être considérées comme fortuites. Si jamais on peut récupérer de l'énergie économique de sources plutoniennes ou de l'écorce terrestre, elle représentera avant peu la plus répandue de toutes les formes d'énergie mais, pour un avenir prévisible, il ne faut voir là qu'une possibilité d'ordre théorique.

A certains égards, l'énergie géothermique rappelle la houille blanche. Ses disponibilités actuelles, limitées à des emplacements spécifiques, rappellent la situation qui se présente quant aux sites de barrages

destinés à mettre la houille blanche en œuvre. Les dépenses afférentes au transport de la vapeur du site des gîtes à un lieu d'utilisation, ainsi d'ailleurs qu'à celui de l'eau à forte pression depuis l'emplacement des barrages, sont si élevées, que leur conversion sur place en énergie électrique représente un impératif à peu près catégorique dans les deux cas si le lieu d'utilisation se trouve à quelque distance de la source d'énergie. La mise en œuvre de l'énergie hydraulique n'a été possible qu'en raison de deux circonstances : 1) là où on trouve de la houille blanche en liaison avec des réseaux de distribution d'électricité bien développés, les désavantages de l'emplacement fixe des centres de production de houille blanche mal situés par rapport aux centres de consommation ont été surmontés par l'intégration de cette houille blanche dans l'ensemble du système; 2) là où les ressources exploitables se trouvent dans des régions isolées et peu accessibles, il est devenu possible d'y faire appel en l'utilisant à des fins nécessitant une grosse concentration d'énergie, par exemple pour la réduction de l'alumine. Là où il est possible d'intégrer l'électricité produite par des moyens géothermiques dans un système existant, il est probable que cela se fasse mais, pour les emplacements en des lieux peu accessibles, il ne suffit pas à la nouvelle source de pouvoir faire concurrence aux autres pour la production d'électricité si on doit espérer attirer une industrie donnée en un lieu isolé. Les perspectives de développement sont conditionnées par la capacité que peuvent avoir de tels emplacements à débiter de très grosses quantités d'énergie à un prix de revient assez bas pour être attrayant. Les installations de houille blanche en des lieux isolés ont parfois démontré leur valeur en de telles situations. Ce sera aux sites géothermiques d'en faire autant.

L'énergie géothermique, en tant que source d'électricité, présente d'autres points d'analogie avec la houille blanche quant aux aspects économiques de sa captation. Il faut de gros placements de fonds pour foncer des puits, les doter des installations convenables et monter turbines et génératrices. Une fois en fonctionnement, ces centrales ne coûtent pas beaucoup à exploiter. Pour autant que l'énergie géothermique se présente « en masses » comme la houille blanche — en ce sens que chaque gîte représente une source d'énergie assez considérable — il est souhaitable de mettre pleinement en œuvre ses possibilités pour chaque emplacement. L'emploi de grosses centrales et de moyens de transport d'énergie importants semble donc essentiel à une exploitation économique. Il est peu probable que l'établissement d'un nombre appréciable de petites centrales, inférieures au mégawatt quant à la puissance installée, s'avère pratique, en raison de l'importance des frais de premier établissement spécifiques.

L'énergie géothermique se présente naturellement sous forme de chaleur, si bien qu'il est possible de l'utiliser directement sous cette même forme, plutôt qu'en la convertissant tout d'abord en électricité. Ce genre d'exploitation se heurte aux limites pra-

tiques qu'impose le transport de la vapeur. L'électricité peut être transportée économiquement sur des centaines de kilomètres si la puissance en cause est suffisante, mais les frais de constructions des tuyaux, le besoin d'un épais calorifugeage des conduits principaux et les pertes de chaleur inévitables limitent l'emploi pratique de la vapeur à un rayon de quelques kilomètres de sa source. En Islande, où la présence fortuite de grosses quantités de vapeur et d'eau chaude naturelles coïncide avec le besoin de chauffage ménager, l'application de l'énergie géothermique à ce genre d'emploi a donné de bons résultats.

La température de la vapeur naturelle (environ 200 à 300°C à la bouche des puits) fait songer à sa valeur possible comme source de chaleur pour certaines transformations industrielles mais la nature sporadique de son incidence soulève certaines difficultés. On est en droit de se demander s'il y a des industries dont les besoins de chaleur, pour certains procédés de traitement ou de fabrication, sont d'une importance tellement suprême que leurs installations puissent être attirées au site des gîtes géothermiques. Une exception qui mérite de retenir l'attention réside dans le traitement de la vapeur naturelle elle-même, en vue de la récupération de produits chimiques vaporisés en provenance de gîtes profondément situés.

Les caractéristiques de l'incidence de l'énergie géothermique indiquent que son utilisation à court terme sera très diffuse mais raisonnablement bien définie et localisée de par le monde entier. La production d'énergie électrique, dans l'ordre de grandeur du mégawatt, semble devoir représenter son application la plus prometteuse. Si on voit plus loin, on peut songer à la mise universelle de la chaleur des profondeurs de la terre à la disposition de l'humanité par la mise au point d'une technologie qui, aujourd'hui, est encore en projet.

Énergie éolienne

La mise en œuvre de l'énergie géothermique est récente et en plein développement. En revanche, on s'est davantage servi de l'énergie éolienne au cours des siècles passés qu'actuellement. C'est elle qui, en diverses époques et en divers lieux, a représenté la source principale de force motrice pour les navires et le pompage de l'eau, certaines opérations mécaniques et l'électrification rurale. La mise au point de sources d'énergie plus « concentrées », d'emploi commode et stables, est venue progressivement déplacer l'énergie éolienne de ses applications pratiques et, dans le moment, cette source d'énergie ne conserve d'importance que pour le pompage de l'eau dans les régions rurales où l'énergie classique coûte cher.

La conversion de l'énergie cinétique disponible dans une masse d'air en mouvement de manière à lui donner une forme utilisable peut être réalisée de la manière la plus commode possible en prévoyant des pales dotées d'un pas convenable ou inclinées

dans un groupe à disposition radiale, de telle sorte que le vent fasse apparaître un moment tournant quand il passe entre elles. Si on applique une forme quelconque de charge à l'arbre sur lequel les pales sont montées, il est possible de transformer une partie de l'énergie cinétique de ce vent en un travail utile. Pour la production d'électricité, on a fait usage avec avantage de pales rappelant celles d'une hélice et on entraîne la génératrice directement par l'arbre de cette hélice ou un train d'engrenages. Tant pour assurer le dégagement voulu aux pales d'hélice, qui peuvent être longues, que pour utiliser la plus grande vitesse de vent que l'on rencontre à bonne hauteur au-dessus du sol, on a coutume de monter ce matériel sur une tour élevée.

La vitesse du vent varie beaucoup avec le temps et le lieu. Il est des régions dans lesquelles on trouve des vents forts assez réguliers de façon presque constante et il existe nombre d'emplacements bien dégagés qui se prêtent admirablement à la production d'énergie éolienne. On recherche pour de semblables systèmes, des vitesses de vent comprises entre 24 et 40 kilomètres par heure. De la sorte, bien que le vent souffle partout dans les zones tempérée et arctique, les régions générales et les emplacements spécifiquement indiqués pour une utilisation pratique sont plus restreints.

L'énergie éolienne souffre des inconvénients d'une extrême variabilité et d'une faible « concentration ». Elle se prête commodément à des applications mécaniques à petite échelle, comme pour le pompage, mais le vent n'est pas une « nouvelle » source d'énergie à cet égard. Dans le contexte qui nous intéresse, son importance réside donc dans son emploi comme source d'électricité. La variabilité dans ce domaine est un inconvénient grave, que l'on surmonte, dans les installations à petite échelle, en ayant recours à des batteries d'accumulateurs. A une plus grande échelle et dans des circonstances appropriées, on peut la compenser en branchant la centrale éolienne sur un réseau d'électricité comptant nombre de génératrices à énergie éolienne bien séparées et des sources classiques d'énergie. Il n'est pas clair, toutefois, si l'emploi du vent pour la production d'énergie électrique peut bénéficier des économies de dimensions c'est-à-dire si le prix unitaire à payer pour les additions diminue progressivement, ainsi que c'est le cas pour les systèmes classiques. La construction de puissants groupes à énergie éolienne d'une puissance installée de l'ordre du mégawatt comporte de grosses exigences structurelles et le prix de revient, à une telle échelle, peut être d'une importance disproportionnée. En tout état de cause, la production d'énergie à grande échelle par le vent exige de gros placements initiaux si on la compare à la production thermique, mais ses frais d'exploitation sont faibles.

La variabilité du vent impose l'emploi d'un système d'accumulation ou de mise en réserve, car on peut dire que presque toutes les manières dont on puisse se servir de l'énergie imposent que la fourniture en soit continue. L'emploi des batteries d'accumulateurs est coûteux et, de ce chef, n'est pas pratique pour

les grosses installations. La « mise en réserve » sous forme de combustible ou d'eaux retenues par une digue à l'intention de génératrices auxiliaires est réalisable mais, si le facteur de charge des auxiliaires est faible, les frais sont élevés. Quand un aéromoteur représente une petite fraction de l'apport total fait à un réseau, peut-être en liaison avec d'autres éoliennes réparties sur une ample région, la variabilité du débit d'une telle source n'est pas un désavantage aussi grave.

La disparition progressive des pompes à eau actionnées par un « moulin à vent » et des génératrices électriques du même genre des exploitations agricoles des États-Unis constitue un commentaire intéressant sur l'économie de l'énergie éolienne dans ces conditions. Avant que les réseaux ruraux de distribution d'électricité soient aussi complets, presque chaque ferme des États du centre et de l'ouest était dotée d'une éolienne, habituellement pour le pompage de l'eau mais, bien souvent pour la production d'électricité qui était alors fournie à une batterie d'accumulateurs. Mais, avec la fourniture commerciale généralisée de l'électricité, ces éoliennes sont tombées en désuétude, en partie parce qu'il en coûtait moins d'acheter l'électricité une fois que tous les facteurs étaient pris en considération, mais principalement parce que les besoins de la ferme dépassaient rapidement la capacité des éoliennes.

L'expérience acquise aux États-Unis donne à penser que l'utilisation de groupes électrogènes à aéromoteur de petite taille — peut-être sur la gamme de puissances comprise entre 1 et 10 kilowatts — s'adaptera au mieux à la fourniture des familles, de petits groupes de familles ou de petits établissements commerciaux trop isolés des grandes centrales électriques pour que le courant puisse leur être fourni économiquement. Si on se sert d'éoliennes ayant des puissances de centaines, voire de milliers de kilowatts, la variabilité qui est propre au vent indique le besoin de les combiner avec d'autres types de producteurs d'énergie dans le cadre d'un réseau.

Énergie solaire

L'énergie solaire, troisième des « nouvelles » sources, se caractérise par son universalité — on la trouve partout sur cette terre — qui s'accompagne des inconvénients que représentent la variabilité, la périodicité et le manque de concentration : c'est une énergie diffuse. Les quantités de cette énergie qui sont disponibles en un lieu donné varient avec la saison et avec le temps et tombent à zéro pendant une bonne fraction de chaque période de 24 heures (excepté pendant l'été, dans les régions polaires). Bien que la quantité d'énergie que reçoit un hectare pendant une journée entière puisse dépasser 62 500 kilowattheures de chaleur, le régime de fourniture de cette énergie à une surface de quelques pieds carrés est faible. C'est dire que la majeure partie des applications de l'énergie solaire exigent de grosses surfaces de captation et de conversion et qu'il leur faut également certains moyens de mise en réserve.

La conversion de l'énergie solaire en une forme utilisable, sauf pour le cas de certains processus biologiques et diverses méthodes photo-électriques exige son absorption par — ou sur — une surface qui intercepte le rayonnement. De la sorte, l'énergie rayonnante absorbée est convertie en chaleur, que l'on peut livrer sous la forme d'un liquide chaud, d'une vapeur ou de tout autre moyen. On peut se servir de ces sources de chaleur directement de diverses manières, ou encore on peut s'en servir pour la production d'électricité par l'un quelconque de plusieurs procédés possibles.

Les gammes de températures sur lesquelles on fournit la chaleur sont un facteur important de son application. Elles sont modifiées par les pertes thermiques du système et le régime auquel le moyen de transport de l'énergie circule dans la surface absorbante. Si on souhaite réaliser des températures sensiblement plus élevées que le point d'ébullition de l'eau, comme il se passe quand on veut produire de la vapeur destinée à fournir de la force motrice, il faut concentrer le rayonnement solaire, au moyen de réflecteurs appropriés, sur des surfaces de transmission de la chaleur plus réduites, qui peuvent de la sorte être portées à des températures beaucoup plus élevées. Il convient de comprendre toutefois que la récupération d'une quantité d'énergie donnée, quelle que soit la température, exige des surfaces comparables d'interception de l'énergie solaire, qu'elle soient du type réfléchissant ou du genre absorbant.

D'une manière générale, les applications de l'énergie solaire sont les mêmes que celles de toute autre source de chaleur. Les utilisations les plus fréquentes et les possibilités d'application à des températures modérées sont le chauffage des locaux, celui de l'eau, le séchage, l'évaporation (production de sel et d'eau douce à partir de l'eau de mer) et des systèmes de refroidissement et de réfrigération commandés par la chaleur. Pour la majeure partie de ces applications, l'élément de conversion d'énergie est une surface de métal noir recouverte d'une ou plusieurs couches transparentes de verre ou de composition plastique. A des températures plus élevées, on peut se servir de réflecteurs de concentration, paraboliques (dits en forme de « plat ») ou cylindriques (en forme d'« auge ») pour la génération de vapeur d'eau ou de toute autre substance en vue de la production d'énergie au moyen d'un moteur thermique, pour assurer la cuisson des aliments, pour fournir de l'électricité par conversion directe en se servant des propriétés de l'état solide ou pour mener à bien certains procédés qui s'exécutent aux très hautes températures. Dans chacun des cas considérés, l'énergie solaire concentrée en provenance d'un réflecteur qui suit la trajectoire du soleil est fournie à un foyer où circule le produit utilisé pour la transmission de la chaleur ou bien où le produit à chauffer se trouve.

Les statistiques relatives à l'intensité du rayonnement donnent des indications utiles sur le besoin de surfaces importantes pour les collecteurs. Par temps clair, l'intensité du soleil est de 300 à 350 BTU

par heure et par pied carré, ou, pour une surface horizontale et dans la zone tempérée, de 1 500 à 2 500 BTU par jour et par pied carré. Ceci correspond, dans le système métrique, à 800 à 950 kilocalories par heure et par mètre carré d'une part et 4 000 à 6 500 kilocalories par jour et par mètre carré de l'autre. Ces intensités d'énergie sont très faibles par rapport à celles qui sont utilisées dans les procédés industriels de transmission de la chaleur, si bien que la captation de l'énergie solaire exige des surfaces assez importantes. C'est dire que le coût unitaire de la surface de récupération du soleil doit, dans toute la mesure du possible, être réduit au strict minimum.

Tout comme pour l'énergie éolienne, la variabilité de la fourniture d'énergie solaire est un désavantage qui en limite l'emploi à certaines applications intermittentes, ou qui impose l'accumulation ou la mise en réserve de cette chaleur solaire, de l'énergie ou des autres produits du système. Une autre solution consiste à compléter l'énergie solaire par des sources classiques quand elle n'est pas disponible en quantité suffisante. Toutes ces mesures imposent des frais qui s'ajoutent à ceux du collecteur solaire.

Il se trouve par hasard que l'énergie solaire se répartit géographiquement de telle manière qu'elle est à son maximum d'abondance dans les parties du monde qui souffrent d'une insuffisance des ressources énergétiques classiques. Nombre des régions arides et semi-arides du monde ont des réserves de combustible très limitées mais un soleil abondant. Au surplus, la variabilité de l'ensoleillement est moins grave dans ces régions, ce qui réduit le problème de l'accumulation au minimum. Étant arides, ces régions peuvent également être les mieux adaptées à la mise en œuvre de la déminéralisation des eaux salines par le soleil, pour augmenter les ressources disponibles en eau potable.

D'autres caractéristiques de l'énergie solaire qui se répercutent sur ces possibilités d'utilisation sont sa grande abondance et la facilité relative avec laquelle on peut la convertir en chaleur. Ces caractéristiques se prêtent à son utilisation sur place par les usagers, à petite échelle. Pour des fins telles que le chauffage de l'eau, celui des locaux, le séchage des produits agricoles, le refroidissement des maisons et des aliments et la cuisine, les installations appropriées pour un seul foyer ou quelques familles sont d'une taille pratique et doivent pouvoir être exploitées par leurs propriétaires sans difficultés exagérées. Le prix de ce matériel semble élevé dans les conditions actuelles de son développement et leur réduction est un objectif de première importance.

Il se peut que la production d'énergie par le soleil en vienne un jour à compléter celle qui est fournie par des centrales électriques mais les premières applications semblent devoir se cantonner à la gamme des quelques kilowatts pour les familles ou les petites communautés qui se trouvent au-delà des distances sur lesquelles il est encore économique de transmettre de l'énergie motrice. Il peut se faire que les installations de déminéralisation des eaux

salées constituent des centrales importantes d'où se fera la distribution aux consommateurs individuels. Sous des climats appropriés, la technique solaire présente certains avantages qui lui sont tout à fait propres et l'économie dite « d'échelle » doit militer en faveur des grandes installations plutôt que des petites.

Ces économies dues à la taille, dans le cas des applications de l'énergie solaire, ne sont probablement pas importantes. Si elles sont valables, ce qui n'est pas certain, elles se limiteront sans doute à des applications telles que la production de sel, la distillation de l'eau salée et, le cas échéant, le séchage de certains produits et la force motrice. Étant donné qu'il faut un collecteur solaire relativement grand pour récupérer ce qui n'est au fond qu'une modeste quantité de chaleur et pour autant que le collecteur est le plus coûteux de tous les éléments de la presque totalité des systèmes de conversion d'énergie solaire, les frais spécifiques minimum de premier établissement sont atteints pour une capacité qui, en elle-même, est relativement faible. À ce moment-là, on ne gagne plus rien à continuer à agrandir le matériel. C'est là un autre élément qui crée, pour les systèmes d'utilisation de l'énergie solaire, un moindre désavantage que pour les petits systèmes du genre classique.

Les principales caractéristiques de l'énergie solaire qui ont des répercussions sur les emplois possibles de cette source pourront être résumées en reconnaissant que l'ample distribution de cette source de chaleur intermittente et de faible intensité, particulièrement dans les régions où le combustible est cher, présente des avantages pour plusieurs types d'applications ménagères ou commerciales à petite échelle. Il faut cependant réduire les exigences relatives aux importants investissements au départ, par la mise au point de matériels plus perfectionnés et moins coûteux. La conversion de l'énergie solaire en force électrique semble s'adapter idéalement aux usages à une échelle réduite ou modeste, dans les régions éloignées des centrales de production. La quantité totale d'énergie solaire disponible dépasse de très loin nos exigences totales d'énergie actuellement prévisibles et son emploi sur une grande échelle est chose virtuellement assurée.

CONSUMMATIONS TOTALE ET INDIVIDUELLE, NIVEAUX ACTUELS, TENDANCES

D'après le Bureau de statistique des Nations Unies la consommation totale d'énergie, dans le monde entier, s'est élevée en 1959, pour les sources classiques (charbon, pétrole brut, gaz naturel, houille blanche) à l'équivalent de 4 milliards de tonnes de charbon. Le tableau 1 nous indique que cette consommation se répartissait d'une manière extrêmement inégale : l'Amérique du Nord et l'Europe occidentale, prises ensemble, avaient absorbé près des trois cinquièmes du total, tandis que les Antilles, l'Amérique latine en général, le Moyen et l'Extrême-Orient, l'Océanie et l'Afrique, ensemble, ne dépassaient

Tableau 1
Consommation mondiale d'énergie en 1959

Région	Total, en équivalents-charbon (millions de tonnes métriques)	Pourcentage du total mondial	Par tête, en équivalents-charbon (kilogrammes)
Amérique du Nord	1 485	37,4	7 634
Antilles	67	1,7	788
Reste des Amériques	56	1,4	481
Europe occidentale	769	19,4	2 376
Moyen-Orient	31	0,8	233
Extrême-Orient	185	4,7	226
Océanie	45	1,1	2 824
Afrique	58	1,5	311
Autres pays	1 269	32,0	1 229
MONDE	3 966		1 360

SOURCES. — Bureau de Statistique des Nations Unies, *World Energy Supplies, 1956-1959* [en anglais seulement] (publication des Nations Unies, n° de vente : 60. XVII. 6). Ces bulletins donnent une définition des régions.

saient guère un dixième. Ceci s'expliquait en partie par des différences de population, comme pour l'Océanie, mais la raison principale de cette disparité dans la consommation d'énergie, d'une partie du monde à l'autre, se trouvait dans une disparité plus grande encore dans la consommation individuelle, que l'on examinera ci-dessous.

Le chiffre de consommation totale du globe pour une année quelconque n'a cependant que fort peu de sens en soi. Il a été élevé pour 1959, par rapport aux niveaux des périodes passées, et il a atteint son maximum de même que la consommation de chacune des années qui suivirent la dernière grande guerre. Cependant ces niveaux historiquement élevés prennent leur véritable signification dans le développement qu'ils révèlent et les indications qu'ils

Tableau 2

Pourcentages annuels de croissance de la consommation globale d'énergie pour des années et des périodes choisies

Années	Taux de gain pour l'année précédente	Taux moyen de croissance pendant les trois années précédentes	Taux moyen de gain pendant les cinq années précédentes	1949-1959	1937-1959	1929-1959
1959 . .	5,70	5,0	6,3	5,5	3,6	2,9
1958 . .	5,71	5,2	5,6			
1957 . .	3,65	6,7	5,1			
1956 . .	6,30	6,3	4,9			
1955 . .	10,19	5,3	5,0			
1954 . .	2,41	2,7	4,8			
1953 . .	3,40	4,3	—			
1952 . .	2,37	6,0				
1951 . .	7,02	—				
1950 . .	8,81					
1949 . .	2,0					
1937 . .	0,8					
1929 . .	—					

SOURCE. — Voir la note au bas du tableau 1.

donnent de niveaux à venir beaucoup plus élevés encore.

On passe en revue, au tableau 2, les régimes d'accroissement récents qui ressortent des données fournies par le Bureau de statistique de l'ONU. Il est apparent que la croissance de la période d'après-guerre, soit 1949-1959, a été beaucoup plus rapide que celle des années d'avant-guerre. Une bonne partie de ceci s'explique par les répercussions de la grande crise économique de la décennie 1930-1940 et celles de la période de rétablissement après la guerre, mais il semble que l'on ait certaines indications, nullement encore univoques, suivant lesquelles ce rythme de croissance est encore en accélération. Même sans autre accélération, la consommation totale pour l'an 2000, à la moyenne de 1949-1959, atteindrait le niveau de 35,6 milliards de tonnes métriques en équivalents de charbon.

Les taux d'augmentation ou de croissance, bien entendu, ne sont pas uniformes dans le monde entier. Le tableau 3 indique la variation régionale du taux annuel moyen pour la période 1951-1959. Les régions industriellement plus développées de l'Amérique du Nord, de l'Europe occidentale et de l'Océanie (dominée, statistiquement parlant, par l'Australie) présentent toutes les taux de croissance les plus faibles, bien inférieurs à la moyenne mondiale. Les pays moins développés, au contraire, nous présentent les plus gros pourcentages. Ceci est conforme à l'attente de voir le niveau de consommation déjà élevé des pays développés augmenter plus lentement.

Le tableau 1 révèle que la disparité de la consommation énergétique régionale totale est due en partie à des différences d'importance de la population, comme en Océanie, mais que la raison principale de ces différences réside dans la plus grande disparité de la consommation individuelle. Les taux de croissance de la consommation individuelle d'énergie pour le monde et diverses régions sont donnés aux tableaux 3 et 4. Ici encore, la croissance

Tableau 3

Taux d'augmentation annuels moyens des consommations totale et individuelle d'énergie de 1951 à 1959 par régions du globe

(Pourcentages)

Régions	Consommation totale	Consommation individuelle
Amérique du Nord	2,1	0,2
Antilles	8,5	5,7
Reste des Amériques	5,7	3,3
Europe occidentale	2,4	1,6
Moyen-Orient	6,3	1,9
Extrême-Orient	6,6	5,2
Océanie	4,0	1,3
Afrique	5,4	5,5
Autres pays	11,6	9,4
MONDE	5,0	3,0

SOURCE. — Voir la note au bas du tableau 1. Les régions sont celles qui y sont définies.

Tableau 4

Taux de croissance de la consommation mondiale d'énergie, par tête
(Pourcentages)

Années	Accroissement sur l'année précédente	Taux de croissance moyen pendant les trois années précédentes	Taux de croissance moyen des cinq années précédentes	1949-1959	1937-1959	1929-1959
1959 . .	3,18	2,7	4,0	2,7	1,9	1,5
1958 . .	3,45	3,1	3,6			
1957 . .	1,59	4,4	3,4			
1956 . .	4,41	4,3	3,2			
1955 . .	7,23	3,7	2,6			
1954 . .	1,44	1,5	1,5			
1953 . .	2,60	1,6	—			
1952 . .	0,56	1,1				
1951 . .	1,51	—				
1950 . .	1,34					
1949 . .	1,2					
1937 . .	0,3					
1929 . .	—					

SOURCE. — Voir la note au bas du tableau 1.

varie d'une région à l'autre et, une fois de plus, les pays industriellement les plus développés nous présentent des taux de croissance inférieurs à la moyenne mondiale (voir le tableau 3). Au surplus, le taux de développement est anormalement bas pour le Moyen-Orient, ce qui indique que, pour la période que couvre le tableau 3, au moins, cette région traînait derrière le reste du monde quant à l'intensité de son utilisation d'énergie. Dans les autres régions de moindre développement, le faible niveau absolu de consommation individuelle d'énergie que donne le tableau 1 est compensé, dans une certaine mesure, par le taux de croissance élevé.

Les preuves, plus convaincantes, de l'accélération du rythme de la croissance, que donne le tableau 4, viennent à l'appui du point de vue suivant lequel la consommation totale d'énergie augmente à un rythme accéléré. En tout état de cause, la consommation d'énergie augmente à un taux nettement plus rapide que celui de la population du globe.

CONSOMMATION D'ÉNERGIE, PAR SOURCES

Il ressort clairement du tableau 5 que la configuration de la consommation mondiale de l'énergie fournie par les sources classiques est en train, de longue date, de passer progressivement d'un aspect dominé par le charbon au pétrole et au gaz naturel. Le charbon, qui représentait les quatre cinquièmes du total en 1929, avait été ramené, en 1959, à juste au-dessus de la moitié. Au cours de ces dernières années, d'après les chiffres du tableau 5, le rythme de ce changement semble avoir ralenti. Il se trouve cependant que ceci reflète ce qui s'est passé aux États-Unis¹. Ainsi que l'indique le tableau 6, pour

¹ Voir Sam H. Schurr, Bruce C. Netschert *et al.*, *Energy in the American Economy, 1850-1975* (L'énergie et l'économie américaine, 1850-1975) [Baltimore, Johns Hopkins Press, 1960].

Tableau 5

Consommation mondiale d'énergie fournie par les sources classiques. Pourcentages du total par sources d'énergie, années spécialement choisies entre 1929 et 1959

Années	Combustibles solides	Combustibles liquides	Gaz naturel	Houille blanche
1959 . .	53,2	30,6	14,2	2,0
1958 . .	54,3	30,2	13,6	2,0
1957 . .	54,8	30,2	13,1	1,9
1956 . .	55,6	30,0	12,5	1,9
1955 . .	56,4	29,4	12,3	1,8
1954 . .	56,3	28,8	1,31	1,8
1953 . .	57,6	27,9	12,6	1,8
1952 . .	58,7	27,1	12,3	1,8
1951 . .	60,3	26,1	11,8	1,7
1950 . .	62,3	25,2	10,8	1,6
1949 . .	64,0	24,1	10,3	1,6
1937 . .	74,5	18,0	6,3	1,2
1929 . .	79,8	14,9	4,4	0,8

SOURCE. — Voir la note au bas du tableau 1.

le monde moins les États-Unis, l'évolution s'est poursuivie sans un tel ralentissement au cours de ces dernières années.

Le changement observé n'est qu'une manifestation de la différence notée dans les taux de croissance de la consommation de l'énergie en provenance de diverses sources car, bien que le charbon ait perdu du terrain par rapport aux autres combustibles, il y a eu augmentation absolue de sa consommation. Pendant la période 1929-1959, les taux moyens de croissance, ainsi qu'ils ressortent des statistiques des Nations Unies, ont été : combustibles solides, 1,5 p. 100; combustibles liquides, 5,3 p. 100; gaz naturel, 6,9 p. 100; houille blanche, 5,9 p. 100.

Outre les sources d'énergie que l'on appelle habituellement classiques, il convient de citer celles que l'on peut appeler les « sources non commerciales ». On manque presque complètement des statistiques sur la consommation du bois de chauffage et des déchets de l'agriculture (fiente, paille, rafles de maïs, bagasse, etc.) et cependant, dans certaines régions, la fraction du total que donnent ces sources peut représenter une partie importante, voire dominante, du total. Malheureusement, les évaluations ou les tentatives en vue de juger approximativement des chiffres faites en l'absence de données statistiques sur la consommation de ces produits ont eu tendance à ne prendre en considération que la cuisine, en laissant de côté ceux qui ont trait au chauffage des locaux, avec une légère participation des emplois industriels, si bien qu'on aboutit à des chiffres minimes. « Il en résulte que les évaluations de la consommation d'énergie peuvent être, dans bien des cas, très au-dessous de la réalité, et ceci, notamment, dans les pays insuffisamment développés où la consommation totale est faible². »

² E. S. Mason, « Besoins en énergie et développement économique », *Actes de la Conférence internationale sur l'utilisation de l'énergie atomique à des fins pacifiques*, vol. 1 (publication des Nations Unies, n° de vente : 56.IX.1, vol. 1), p. 57 (note).

Tableau 6

Pourcentage de la consommation totale d'énergie des sources classiques, par source (monde moins les États-Unis). — Années spécialement choisies : de 1955 à 1959

Années	Combustibles solides	Combustibles liquides	Gaz naturel	Houille blanche
1959 . .	68,5	24,9	4,2	2,4
1958 . .	69,8	24,1	3,7	2,4
1957 . .	70,4	24,1	3,2	2,3
1956 . .	71,5	23,6	2,6	2,3
1955 . .	73,0	22,3	2,4	2,3

SOURCE. — Voir la note au bas du tableau 1.

Il est utile, néanmoins, d'accepter les quelques évaluations faites au sujet de la proportion de la consommation d'énergie totale du monde qui est couverte par le bois et les déchets agricoles comme ayant une validité raisonnable. Putnam a évalué que le bois représente 4 p. 100 de l'énergie fournie par les combustibles minéraux, la houille blanche et ce bois lui-même³. Ayres et Scarlott ont utilisé, pour le bois de chauffage, un chiffre de 7 p. 100 de toutes les sources et Thirring a évalué que le bois représentait entre 4 et 7 p. 100 de l'énergie totale utilisée dans le monde en 1955⁴. L'analyse faite par les Nations Unies pour la fourniture d'énergie aux nations non communistes du monde en 1952 donnait pour le bois de chauffage, un chiffre de 4 p. 100 du total de l'énergie dite « inanimée »⁵. Pour les besoins actuels de notre développement, on pourra s'en tenir pour le moment au chiffre des Nations Unies.

Putnam a conclu, à la suite d'un sondage de huit pays qui représentent les cinq sixièmes environ des ressources d'énergie classiques pour 1937, que l'apport des déchets agricoles correspondait à 20 p. 100 du total en provenance de ces sources mais cet auteur n'avait pas la moindre illusion quant à l'exactitude de son évaluation, laissant entendre que la valeur pourrait s'échelonner entre 10 et 40 p. 100⁶. Ayres et Scarlott ont utilisé un chiffre plus fort, évaluant l'apport d'énergie des déchets agricoles à « 3,5 fois environ » celle que donne le bois, soit 24,5 p. 100 au total⁷. L'analyse des Nations Unies en 1952, néanmoins, donne une valeur proche de la limite inférieure de la gamme de Putnam, soit 10 p. 100, valeur prise ici comme évaluation prudente.

Avec ces hypothèses de départ, la configuration actuelle de l'apport d'énergie du monde est donnée

³ P. C. Putnam, *Energy in the Future* (Énergie et avenir) [New York, van Nostrand, 1953], p. 172.

⁴ E. Ayres et C. A. Scarlott, *Energy Sources — The wealth of the world* (Les sources d'énergie, richesse du monde) [New York, McGraw-Hill, 1952], p. 232; H. Thirring, *Power Production* (Production de force motrice) [Londres, Harrap, 1956], p. 221.

⁵ Nations Unies, Département des affaires économiques et sociales, « Besoins du monde en énergie en 1975 et en l'an 2000 », *Actes de la Conférence internationale sur l'utilisation de l'énergie atomique à des fins pacifiques*, vol. 1, p. 3, *passim*.

⁶ Putnam, *op. cit.*, p. 444.

⁷ Ayres et Scarlott, *op. cit.*, p. 232.

Tableau 7

Configuration actuelle de l'apport d'énergie mondial de toutes les sources classiques

Sources	Pourcentage du total	
	Nations Unies 1952 ^a	Mémoire actuel 1959 ^b
Charbon et lignite	41,8	46
Combustibles liquides	32,0	26
Gaz	10,4	12
Déchets agricoles	8,5	10
Bois	5,5	4
Houille blanche	1,7	2

^a SOURCE. — « Besoins du monde en énergie en 1975 et en l'an 2000 », *op. cit.*, p. 20-21.

^b Origine : consommation mondiale totale, en 1959, de combustibles minéraux et de houille blanche : 3 966, 43 millions de tonnes d'équivalents de charbon (*World Energy Supplies, 1956-1959*). Si ceci représente 95 p. 100 du total, bois compris, ce total devient 4 175,19 millions. Si on admet que les déchets agricoles représentent 10 p. 100 du total global, ce total devient 4 639,10 millions de tonnes.

au tableau 7 et on la compare à une évaluation détaillée faite par les Nations Unies (les applications actuelles des sources nouvelles d'énergie peuvent être laissées de côté, dans le présent mémoire, car elle ne constitue pas plus d'une fraction de point de pourcentage du total). Bien que les pourcentages spécifiques, dans les deux évaluations, contiennent un élément d'erreur considérable, l'accord est assez complet pour justifier la conclusion que les proportions générales sont probablement correctes.

Ce régime d'ensemble dissimule une variété régionale marquée, ainsi que l'indique le tableau 8. Pour un grand nombre de pays peu développés, il est évident que les sources non commerciales sont prédominantes.

Les répercussions possibles de ces configurations des sources d'énergie résident autant dans les applications qu'elles reçoivent que dans leur importance relative par rapport à la configuration d'ensemble de l'apport d'énergie. Avant toutefois d'examiner la configuration par fonctions, quelques observations

sont indiquées en ce qui concerne les répercussions de la configuration des sources.

Compte tenu de la répartition de toutes les sources classiques d'énergie, qui présente un caractère aléatoire par rapport à la position des centres de consommation, il est impossible d'en faire usage sans transporter, soit la source elle-même, soit l'énergie qu'elle produit. Les frais de transport sont un élément important du prix de l'énergie livrée à pied d'œuvre et limitent les distances et les quantités en cause.

On donne, au tableau 9, une comparaison des frais de transport, en fonction du nombre d'unités contenues dans les sources en cause et d'une distance standard, pour l'énergie dite classique. On souligne une fois de plus que les valeurs sont extrêmement grossières car, non seulement le coût du transport est en changement continu, mais il y a une ample variation dans les frais de transport afférents au même produit par les mêmes moyens dans diverses parties du monde et les moyennes elles-mêmes peuvent varier considérablement (dimensions du bateau-citerne, diamètre du pipe-line, etc.). Le tableau 9, néanmoins, donne une mesure utile, à une échelle approchée, des coûts relatifs de certains articles obtenus de diverses façons.

Il est clair que le transport maritime est de loin le moins cher et que les économies de taille données par les grands vaisseaux océaniques sont très fortes. L'avantage initial du pétrole à cet égard est renforcé par la facilité de sa manutention. En tant que liquide, il se laisse transborder commodément et à peu de frais, ce qui lui confère un avantage supplémentaire qui ne figure pas au tableau 9. Rien de surprenant, donc, à ce que le pétrole soit le produit énergétique le plus « actif » du commerce mondial. Les échanges commerciaux mondiaux pour le pétrole brut seul (indépendamment de ce qu'en contiennent ses produits) représente un tiers de la production totale. Néanmoins, le transport du pétrole brut et de ses produits ne représente le plus économique des déplacements de l'énergie que pour le transport par navires-citernes en vrac. Le transport à l'intérieur des pays, par péniche, wagon ou camion-citerne est beaucoup

Tableau 8

Configuration de l'apport d'énergie de toutes les sources classiques par régions du globe, 1952^a

Régions	Pourcentage du total				
	Combustibles solides	Combustibles liquides	Gaz	Houille blanche	Sources non commerciales
Amérique du Nord	34,1	36,6	24,1	1,7	3,5
Antilles	3,3	53,2	7,4	1,1	35,0
Autres pays d'Amérique . . .	10,2	38,7	4,0	1,9	45,2
Europe occidentale	77,7	12,2	0,4	2,5	7,2
Asie	29,6	10,0	0,6	1,8	58,0
Océanie	57,5	28,3	—	1,6	12,6
Afrique	34,6	14,6	—	0,2	50,5

SOURCE. — « Besoins du monde en énergie en 1975 et en l'an 2000 », *op. cit.*, p. 29-31.

^a A l'exclusion des pays communistes.

Tableau 9

Frais de transport relatifs des formes classiques d'énergie^a
(Pétrole par grands navires-citernes océaniques = 100)

Long-courriers maritimes :	
Grands navires-citernes océaniques	100
Charbonniers (charbon)	225
Transports maritimes à courte distance :	
Péniches (pétrole)	240
Péniches (charbon)	690
Longs transports terrestres :	
Chemins de fer (charbon)	1 975
Pipe-lines (pétrole)	375
Pipe-lines (gaz)	640

SOURCES. — Basé sur l'ouvrage de J. Davis, *Les perspectives énergétiques du Canada* (Ottawa, Commission royale d'enquête sur les perspectives économiques du Canada, 1957); C. J. Dwyer, *Nuclear Energy and World Fuel Prices* (Énergie nucléaire et prix mondiaux du combustible) [Washington, National Planning Association, 1958], p. 20.

^a Coût par unité d'énergie contenue et par 100 milles.

plus coûteux, dans l'ordre indiqué. Le pétrole importé, en d'autres termes, n'est bon marché qu'aux ports d'entrée ⁸.

Le charbon est à la fois encombrant et lourd et, en tant que solide, sa manutention est coûteuse. Rien de surprenant, donc, à ce que le commerce mondial de ce charbon ne dépasse pas 8 p. 100 environ de la production globale de ce même produit, grâce à la solution consistant à se servir de pétrole. Même à l'intérieur des pays, s'il est indiqué d'avoir recours à des transports terrestres, ceci maintient les frais de transport à un niveau élevé. C'est dire qu'un pays d'une taille quelconque n'est pas nécessairement fortuné, en ce qui concerne les sources d'énergie, s'il a de bonnes sources de charbon. Pour un pays insuffisamment développé, les très grosses exigences de capitaux que représente un réseau de chemin de fer satisfaisant viennent encore diminuer la valeur du charbon indigène pour son développement.

Bien que la géographie de l'incidence du gaz naturel se soit opposée jusqu'à présent à la possibilité d'un commerce international de ce produit, le prix élevé de son transport par pipe-line, limité jusqu'à présent au transport terrestre, a fait beaucoup pour décourager ce genre de commerce. Le prix extrêmement élevé du transport de l'électricité, par ailleurs, représente indubitablement la raison dominante de la très petite proportion de la production totale du monde qui passe des frontières internationales (dont la majeure partie sont en Europe et en Amérique du Nord). Les derniers progrès de la technologie promettent une réduction des frais pour les deux

⁸ Ce sont entièrement les frais relatifs que l'on souligne ici. La combinaison d'une faible demande d'énergie par tête et d'installations portuaires peu satisfaisantes que l'on rencontre le plus souvent, dans les pays sous-développés, joue un rôle puissamment négatif. La plupart des produits du pétrole se déplacent par petits bateaux-citernes, avec des frais de transport plus élevés par rapport à la distance. De la sorte le pétrole peut être cher, même dans les ports. (Voir C. J. Dwyer, *op. cit.*, p. 28.)

formes d'énergie à l'avenir : la transmission de grosses masses d'électricité à des tensions exceptionnellement élevées et la transmission par pipe-line sous-marin ou le transport outre-mer à grande échelle de gaz naturel liquéfié par bateau-citerne. On ne voit pas encore, cependant, si ceci donnera lieu à des changements profonds dans la répartition des sources d'énergie. Il est probable que, pendant quelque temps, les nouvelles techniques de transport conféreront des avantages à l'électricité et au gaz, par rapport au pétrole, dans des circonstances très particulières seulement ⁹.

Pour les combustibles végétaux, le problème du transport est colossal. Leur gros volume, par rapport à leur teneur en énergie, rend leur transport sur toute distance appréciable économiquement prohibitif. Leur emploi est éminemment localisé.

Tout ceci indique que le pétrole et ses dérivés représentent le concurrent d'ordre classique le plus répandu, le plus « diffus » devant lequel se trouvent les sources nouvelles sur la scène mondiale. A cet égard, l'histoire des découvertes récentes donne à penser que le pétrole est d'une diffusion beaucoup plus grande qu'on ne le comprenait jusqu'à présent. Plus sa production se généralise et moins important deviendra son coût de transport, donc plus il sera généralisé comme concurrent.

CONSOMMATION D'ÉNERGIE PAR FONCTION

La fonction de l'emploi de l'énergie dans l'activité économique de l'homme se subdivise en deux grandes catégories : la fourniture de chaleur et celle de la force motrice. Ces deux types de fonction s'exercent dans les secteurs de consommation, l'industrie, l'agriculture, le foyer et le transport. Les deux types de fonction sont assurés dans les trois premières catégories. Le quatrième est constitué exclusivement par la consommation de force motrice.

Toute tentative visant à analyser la consommation d'énergie de par le monde se heurte au grave manque de données. On n'établit pas de statistiques sur cette base. Quelques groupes ont seulement tenté certaines analyses et divers chercheurs ont fait de même à titre personnel. Une telle source récente, pour l'ensemble du monde est le mémoire préparé par des spécialistes des Nations Unies sur les emplois mondiaux de l'énergie, présenté à la première Conférence internationale sur l'utilisation de l'énergie atomique à des fins pacifiques, tenue à Genève en 1955. La configuration fonctionnelle que donne le tableau 10 est dérivée des données présentées dans cette étude. Il serait souhaitable de donner la configuration pour les pays sous-développés du globe pris dans leur ensemble, ou tout au moins pour le monde moins les États-Unis et l'Europe

⁹ Dans le transport de la force électrique, par exemple, les avantages des très hautes tensions ne font leur apparition que lorsque l'on déplace de grandes quantités d'énergie. Pour les transports à très longue distance, il faut en outre que le coût de production soit assez bas pour que le prix de l'électricité livrée à pied d'œuvre soit acceptable.

Tableau 10

Évaluation de la consommation générale d'énergie mondiale en 1952 (Aspects)

Fonctions et zones	Pourcentage de l'utilisation totale
Chaleur	62
Industrie	33
Maisons	29
Force motrice	38
Industrie	16
Maisons	2
Transports	19
Agriculture	1

SOURCE. — D'après des données présentées par le Département des affaires économiques et sociales de l'ONU dont « Besoins du monde en énergie en 1975 et en l'an 2000 » (voir note 5).

Mode d'établissement du tableau 10

Consommation totale	27,6
Chaleur (tableau XIII)	17,2
Industrie (tableau VI)	9,2
Ménages (tableau IX)	8,0
Force motrice (résiduel)	10,4
Industrie (résiduel)	4,5
Transports	5,2
Applications ménagères	0,5
Agriculture	0,3

occidentale, et de montrer comment ils dominent les statistiques. Fort malheureusement, les données présentées dans le mémoire des Nations Unies ne donnent pas de subdivision par fonction et par pays.

Les tableaux 11 et 12 donnent une idée de l'influence des États-Unis et des autres pays très industrialisés sur les chiffres mondiaux. Le total de 53 p. 100 de la consommation totale d'énergie qui va à l'industrie européenne est un peu plus fort que le chiffre de 49 p. 100 pour le monde, mais, aux États-Unis, la proportion est plus voisine de 40 p. 100. La consommation sur le plan ménager, en Europe, est également proche de la proportion globale (un

Tableau 11

Configuration fonctionnelle de la consommation d'énergie aux États-Unis en 1955

Fonctions et types	Pourcentage du total
Chaleur	55,0
Chauffage des locaux	23,8
(dont, industriels)	(8,0)
Procédés industriels	24,1
Cuisine ménagère	4,0
Applications commerciales	3,0
(cuisine, procédés)	
Force motrice	45,0
Industrie	10,4
Emplois ménagers	4,6
Transports	23,3
Agriculture	1,9
Divers	4,8

SOURCE. — Dérivé de données du mémoire de Sam H. Schurr, Bruce C. Netschert, *et al.*, *op. cit.* (voir la note 1), deuxième partie et son appendice.

Tableau 12

Configuration de la consommation d'énergie par catégorie d'emploi dans les pays de l'OECE en 1953

Secteurs	Pourcentage du total
Industrie	53,7
Applications ménagères et diverses	31,0
Transports	14,3
Agriculture	1,0

SOURCE. — L. Armand, *Quelques aspects du problème européen de l'énergie; suggestions pour une action collective; rapport* (Paris, Organisation européenne de coopération économique, 1955), p. 54.

peu moins de 31 p. 100). Aux États-Unis, en revanche, elle est inférieure à 25 p. 100. Ce sont les transports qui donnent la plus grosse divergence : 19 p. 100 pour le monde, 14 p. 100 pour l'Europe et 23 p. 100 pour les États-Unis, chiffre qui indique la très grosse consommation par les voitures privées. Sur le plan de l'agriculture, la proportion des États-Unis est le double de celle du monde pris dans son ensemble, ce qui témoigne, sans aucun doute, du degré élevé de motorisation de l'agriculture aux États-Unis.

Compte tenu de cette situation statistique, on ne saurait faire davantage que reconnaître les différences régionales et traiter le monde comme un tout. Si on note le caractère *brut* des chiffres du tableau 10 (car le mémoire des Nations Unies a fait un ample usage des évaluations et des hypothèses pour remplir les nombreuses lacunes des statistiques) il ressort que l'emploi de l'énergie pour la production de chaleur représente des trois cinquièmes aux deux tiers de la consommation totale mondiale, la force motrice représentant des deux cinquièmes au tiers restant.

Pour la catégorie « chaleur », un peu plus de la moitié de cette consommation, soit environ un tiers de la consommation globale est constituée par la chaleur industrielle. Il serait utile de savoir quelle est la fraction de la chaleur ainsi consommée par l'industrie qui sert aux traitements qui font intervenir des températures élevées, et quelle est celle qui correspond au chauffage des locaux, à des températures relativement basses. On admet que 25 p. 100 de l'apport direct de chaleur à l'industrie, aux États-Unis, s'applique au chauffage des locaux¹⁰. En première approximation raisonnable, ceci peut s'étendre au monde pris dans son ensemble, car la majeure partie de l'industrie du globe est concentrée sous le même climat ou des climats analogues à celui dans lequel se trouve l'industrie des États-Unis. Ceci donne à penser que le chauffage des locaux industriels représenterait un maximum de 8 p. 100 de la consommation mondiale totale d'énergie.

Il est également regrettable que l'on ne dispose pas d'une répartition des applications de la chaleur

¹⁰ G. W. Rusler, "Nuclear or Solar Energy: Which is More Practical for Space Heating?" (Énergie nucléaire ou solaire : laquelle est la plus pratique pour le chauffage des locaux?) *Heating, Piping and Air Conditioning* (Chicago, Keeney Publ. Co.), vol. 31, n° 2 (février 1959), p. 109. Cette hypothèse est utilisée au tableau 11.

à divers procédés entre divers niveaux de température. Les températures mises en jeu par les procédés et traitement industriels sont de niveaux élevés, tels que ceux que l'on trouve pour les produits réfractaires, les céramiques, le verre et le ciment, en passant, par nombre de procédés métallurgiques et chimiques qui exigent des températures moindres, mais encore élevées, aux faibles valeurs nécessaires pour le chauffage de l'eau, les entreprises de conserves et les blanchisseries. On a évalué que le huitième de l'apport total d'énergie du globe sert à la production de fer et d'acier¹¹. Ceci constituerait plus du tiers de la chaleur industrielle totale utilisée comme l'indique le tableau 10.

Dans le cadre des quelque 30 p. 100 du total qui correspondent aux applications de la chaleur à des emplois ménagers, on peut admettre, à la lumière de la concentration des « maisons grosses consommatrices d'énergie » sous les latitudes moyennes ou élevées, que la majeure partie de l'énergie va au chauffage des locaux, le reste servant à la cuisine aux températures élevées.

Sur le plan « force motrice », il est peut-être surprenant de noter que les transports en consomment davantage que l'industrie, indice de l'importance de l'activité globale des transports quant à la consommation d'énergie. Il n'est jusqu'aux applications à l'agriculture qui ne puissent être combinées avec celles des transports, en raison de la force motrice que consomment les tracteurs. On doit également faire une distinction, en ce qui concerne la fonction « force motrice », entre l'énergie mécanique directe (emploi de l'énergie fournie par un moteur stationnaire à tout but autre que la production d'électricité) et la force électrique, laquelle est à cheval sur toutes les catégories du tableau 10. D'après le mémoire des Nations Unies, plus de 92 p. 100 de la force motrice « stationnaire » représentent de l'électricité¹². Ceci laisserait entendre que l'énergie mécanique directe représente seulement 1 p. 100 environ de l'énergie totale. En même temps, la fonction transport consomme presque toute son énergie sous une forme mécanique — moins de 5 p. 100 du total sont constitués par de l'électricité, conformément à la communication des Nations Unies.

Qu'est-ce qui se dégage de cette configuration fonctionnelle pour les nouvelles sources d'énergie? Sans entrer dans la question des frais, on peut signaler les avantages et les inconvénients des nouvelles sources suivant la fonction qu'on leur donne. Toute pensée d'une production de chaleur peut être éliminée d'emblée de la liste des applications possibles de l'énergie éolienne. Bien qu'il soit physiquement possible de convertir l'énergie du vent en électricité, laquelle à son tour pourrait être utilisée pour produire de la chaleur, les pertes combinées des deux conver-

sions rendraient le « chauffage par le vent » bien peu pratique, particulièrement en concurrence avec toute autre source dans laquelle l'énergie contenue est disponible dès l'abord sous forme de chaleur.

L'application de l'énergie géothermique à la fourniture de chaleur est limitée par ses caractéristiques, telles qu'elles ont été décrites dans l'introduction. Il est bien évident que la température la plus élevée de la vapeur naturelle constitue la limite thermique de son utilisation. Jusqu'à présent, la température maximum réalisée à la surface des puits foncés dans les champs géothermiques n'a pas dépassé 200 °C, bien que l'on ait signalé plus de 300 °C en fond de puits. Ceci tombe dans la gamme moyenne des températures nécessaires pour les procédés de transformation industriels et exclut toutes autres techniques faisant appel à des températures plus élevées. En revanche, les températures dont on peut ainsi disposer sont plus que suffisantes pour le chauffage des locaux, la limitation essentielle étant constituée par le caractère fortuit des manifestations d'énergie géothermique en des lieux où le climat exige le chauffage des locaux et où la densité de la population est suffisante pour rendre le chauffage urbain pratique.

Des trois nouvelles sources, l'énergie solaire est la seule qui soit douée des caractéristiques permettant de lui donner tout emploi voulu dans le cadre de son application en tant que chaleur, sur toute la gamme. Avec un collecteur à concentration en un foyer, on peut réaliser des températures de 3 000 °C, plus élevées que toutes celles que l'on rencontre dans le domaine des traitements et procédés industriels, sauf les plus avancés. D'autre part, les opérations pyrométallurgiques, pour leur majorité, dans lesquelles un minerai est réduit pour donner son métal, sont exclues en raison du double office que remplit le coke dans ces procédés, en tant que source de chaleur et agent de réduction. Pour les autres applications de la chaleur à des procédés industriels, la valeur pratique de l'énergie solaire est essentiellement affaire d'échelle. Ainsi qu'on l'a fait observer dans l'introduction, il n'y a pas d'économie de dimensions dans l'emploi de l'énergie solaire. Elle se trouve donc désavantagée en face des grosses exigences de la plupart des procédés industriels. En revanche, cette même caractéristique se transforme en avantage aux petites échelles, mais aux températures plus élevées, de la cuisine de famille. Ces rapports, cela va de soi, expliquent les applications thermiques de l'énergie solaire qui ont le plus retenu l'attention jusqu'à présent : les fours solaires de petites dimensions mais à très haute température, le chauffage solaire des maisons d'habitation et des petits établissements commerciaux et les cuisinières solaires.

Sur le plan de la force motrice, l'industrie des transports peut être éliminée en tant qu'application possible pour les trois nouvelles sources, sauf par l'entremise de l'électricité, ainsi qu'en témoigne la consommation de ce fluide en provenance de gîtes géothermiques par les chemins de fer italiens. (L'énergie éolienne, telle qu'elle est captée par des

¹¹ E. A. G. Robinson et G. H. Daniel, « Le monde a besoin d'une nouvelle source d'énergie », *Actes de la Conférence internationale sur l'utilisation de l'énergie atomique à des fins pacifiques*, vol. 1, p. 40.

¹² « Besoins du monde en énergie en 1975 et en l'an 2000 », *op. cit.*, p. 9.

Tableau 13

La production d'électricité en pourcentage de la consommation totale d'énergie

(Moyenne 1956-1959)

Régions	Consommation totale d'énergie (en millions de tonnes métriques d'équivalents-charbon)	Production d'électricité (milliards de kilowattheures)	Équivalents-charbon* de l'électricité (millions de tonnes métriques)	Électricité (pourcentage du total)
Monde	3 673	1 874,36	234,3	6,4
Amérique du Nord	1,440	826,06	103,3	7,2
Antilles	62	21,76	2,7	4,4
Reste des Amériques	54	34,98	4,4	8,1
Europe occidentale	772	465,10	58,1	7,5
Moyen-Orient	29	8,54	1,1	3,8
Extrême-Orient	169	110,27	13,8	8,2
Océanie	42	27,76	3,5	8,3
Afrique	55	30,44	3,8	6,9
Autres pays	1 049	349,46	43,7	4,2

* A 0,125 tonne métrique par 1 000 kilowattheures, comme la source de ces données.

SOURCE. — *World Energy Supplies, 1956-1959* (voir la note au bas du tableau 1). Régions telles qu'elles sont définies dans ces publications.

voiles, ne représente pas une « source nouvelle » et on peut la négliger. A ce même titre, le séchage solaire des produits agricoles que l'on étale sur le sol peut être laissé de côté en tant qu'application de cette source d'énergie par l'entremise de la chaleur.) Les transports modernes exigent une source portative ayant une grosse teneur spécifique en énergie. A vrai dire, tout usage direct d'énergie mécanique à grande échelle peut être considéré comme s'adaptant mal à une application de l'une quelconque des nouvelles sources. A petite échelle, le vent et l'énergie solaire peuvent être considérés comme susceptibles de recevoir des applications limitées dans les emplois stationnaires, par exemple pour le pompage servant à l'irrigation.

Un mode d'application commun à toutes les nouvelles sources est constitué par la production d'électricité. Le tableau 13 indique que cette production d'électricité est actuellement de 6 p. 100 en moyenne, de l'apport total d'énergie par les combustibles minéraux et l'énergie éolienne.

La part de l'électricité, dans le tableau d'ensemble de l'énergie à l'intérieur d'un pays donné, dépend d'éléments aussi divers que le climat (importance du chauffage des locaux) et le rôle de l'industrie du transport dans l'ensemble de l'activité économique, du pays donné, ainsi que du degré d'électrification de l'économie. Compte tenu de l'augmentation bien connue de la productivité et des revenus qu'assure l'électrification, on peut admettre en confiance que, dans les pays sous-développés du monde tout au moins, la place de l'électricité dans le tableau énergétique global, sera plus grande à l'avenir. C'est sur ce plan que les caractéristiques de l'énergie solaire et celles du vent sont avantageuses. On a observé que les avantages immédiats de l'électricité, dans

les pays sous-développés, s'obtiennent idéalement sur une petite échelle. La conversion de ces deux formes d'énergie en électricité est réalisable sur une gamme de puissances allant de quelques watts à quelques kilowatts. Pour autant que les sources classiques d'énergie se prêtent mal à ce genre d'application, cette forme de mise en œuvre des deux sources nouvelles constituerait probablement un supplément net à l'apport global d'énergie et à la production d'électricité en général, plutôt qu'un remplacement des sources classiques, à l'exception de la production d'électricité par un moteur à combustion interne.

POSITION D'AVENIR POUR L'OFFRE ET LA DEMANDE
EN CE QUI CONCERNE
LES SOURCES CLASSIQUES D'ÉNERGIE

Avec les grosses quantités d'énergie que consomme déjà le monde, ce qui met les ressources classiques à rude épreuve, et avec la certitude de les voir passer à des niveaux plus élevés encore à l'avenir, on comprendra que certaines inquiétudes se soient fait jour quant à la possibilité, pour les sources classiques, de faire face à la croissance continue de la demande. En simplifiant à l'extrême, on envisage l'épuisement physique des ressources classiques. Si la situation évoluait de la sorte, le monde devrait, à une date encore inconnue, s'orienter vers les nouvelles sources, et ce plutôt brusquement.

Mais cette éventualité est à exclure. La question se ramène en réalité à l'insuffisance relative, en ce sens que l'épuisement des ressources d'avenir, quand il se produira, se manifesterait ou se ferait sentir sous la forme d'une hausse des prix de l'énergie. L'énergie en provenance des sources de remplacement ou d'appoint, deviendrait alors relativement moins coûteuse et les occasions, pour ces sources, de supplanter les fournisseurs classiques, se présenteraient petit à petit. Il ne s'agit donc plus que du rythme de cette évolution et du moment où se produisent les faits significatifs.

Toutes prévisions quant aux besoins d'énergie mondiaux pour l'avenir sont difficiles à établir. Compte tenu du degré d'incertitude inséparable de tout travail, même très complet, il est inutile de mettre de nouvelles prévisions au point pour nos besoins actuels. On trouvera une source utile d'opinions autorisées sur la question dans un rapport préparé pour la commission mixte de l'énergie atomique du congrès des États-Unis. D'après les prévisions qui y sont présentées, la consommation mondiale totale d'énergie en provenance des sources classiques sera, en 1975, égale à 7 710 millions de tonnes métriques (en équivalents-charbon) et, en l'an 2000, 14 879 millions de ces mêmes unités¹³.

¹³ Données de base de la Commission mixte de l'énergie atomique du Congrès des États-Unis, *Review of the International Atomic Policies and Programs of the United States* (Revue des politiques et des programmes atomiques internationaux des États-Unis) [Washington, U. S. Government Printing Office, 1960], vol. 4, *passim*. Les facteurs de conversion appliqués à ces données sont tirés du bulletin statistique de l'ONU, *World Energy Supplies, 1956-1959* (voir la note au bas du tableau 1).

Il serait vain de s'attarder sur les mérites et les défauts de ces chiffres. Pour les besoins actuels, les prévisions n'ont pas besoin d'être davantage que des hypothèses de travail, avec lesquelles on pourra juger de la demande globale jusqu'à la fin du siècle en cours. Il est remarquable, cependant, que les taux de croissance sur lesquels reposent ces prévisions soient plus faibles, tant pour l'ensemble que pour chacune des sources, que pendant la période allant de la dernière guerre au moment actuel. Pour la consommation globale, les taux sous-entendus sont 4,4 p. 100 par an pour la période de 1960 à 1975 et 2,6 p. 100 de 1975 à l'an 2000, soit une moyenne de 3,3 p. 100 pour les 40 ans allant de 1960 à l'an 2000. La nouvelle réduction du taux de croissance au-delà de 1975 est évaluée pour chacune des sources d'énergie, à l'exception de la houille blanche, de même que pour le total¹⁴.

Ces taux de croissance, par ailleurs, sont du même ordre de grandeur que ceux des périodes passées d'une durée appréciable — 3,6 p. 100 de 1937 à 1959 et 2,9 p. 100 de 1929 à 1959 inclus (voir le tableau 2). Bien que ceci ne soit mentionné en aucun point du document publié par la Commission, la question est fort intéressante et importante. Les taux plus élevés qui sont pratiqués en ce moment sont-ils temporaires et l'indice d'une accélération récente n'est-il rien de plus que cela : un simple indice? Compte tenu des conclusions de Robinson et Daniel dans leur analyse des antécédents à très long terme de la consommation d'énergie et de ses rapports avec le développement économique¹⁵, les taux récents peuvent être considérés comme représentant une aberration temporaire et les prévisions

citées ci-dessus comme acceptables pour être raisonnables.

Mais la demande porte sur des formes spécifiques d'énergie. Il est concevable qu'une insuffisance aiguë (indiquée par une montée extraordinaire des prix) puisse apparaître pour l'une des sources d'énergie, bien que les ressources totales en énergie soient suffisantes (les rapports offre-demande régionaux doivent évidemment être laissés de côté ici).

La demande mondiale de combustibles fossiles prévue jusqu'à l'an 2000 est donnée au tableau 14, qui repose sur le rapport de la Commission citée du Congrès des États-Unis, dont il a été fait mention ci-dessus. En regard de ces exigences, on peut faire figurer les évaluations sur les réserves et les ressources que présentait également le rapport de la Commission. Le terme « réserves », comme il est pris ici, veut dire les stocks naturels, dont on connaît l'existence, de matériaux que l'on peut récupérer dans le cadre de la technologie actuelle et dans les conditions économiques actuelles. « Ressources » englobe également les stocks naturels dont la récupération peut ou ne peut pas être techniquement et économiquement réalisable actuellement et qui sont connus ou censés exister. Les ressources doivent donc s'entendre « en puissance », en ce sens que leur disponibilité est chose problématique pour l'avenir. Elles donnent toutefois une mesure de ce que l'on pense que le milieu offrira à la technologie de l'avenir pour son travail jusqu'à la fin du siècle. Les diverses évaluations que donne le rapport de la Commission sont groupées sur cette base au tableau 15.

On pourrait dire beaucoup sur la validité de ces chiffres mais, une fois de plus et pour les besoins du travail actuel, on les prendra tels qu'ils sont donnés. Quand on compare le tableau 14 et le tableau 15, il devient évident que la demande cumulative de charbon indiquée pour l'ensemble du

¹⁴ Pour des raisons signalées au rapport de la Commission, les prévisions relatives à la houille blanche sont considérées comme nettement moindres que ce que l'on peut effectivement attendre.

¹⁵ Robinson et Daniel, *op. cit.* (voir la note 11). Ils estiment que 2 ou 3 p. 100 sont typiques des prévisions à plus long terme.

Tableau 14

Demande mondiale prévue de combustibles fossiles de 1960 à l'an 2000

Charbon	122,29 × 10 ⁹ tonnes métriques
Pétrole	114,7 × 10 ⁹ tonnes métriques
Gaz	66,128 × 10 ¹² mètres cubes

Tableau 15

Réserves et ressources de combustibles fossiles (évaluations)

Combustibles	Réserves	Autres ressources possibles
Charbon et tourbe . . .	858 × 10 ⁹ tonnes métriques	1 864 × 10 ⁹ tonnes métriques
Hydrocarbures liquides (pétrole brut, liquides dérivés du gaz naturel)	52,8 × 10 ⁹ tonnes métriques	729 × 10 ⁹ tonnes métriques
Gaz naturel	18 × 10 ¹² mètres cubes	214 × 10 ¹² mètres cubes

globe au cours des 40 prochaines années pourra être satisfaite sans effort par prélèvement sur les réserves. La situation est différente pour le gaz et le pétrole, toutefois, car les réserves existantes sont bien plus exiguës que le total cumulatif de la demande prévue. Bien qu'une partie des ressources supplémentaires possibles soit constituée par du pétrole dont on connaît déjà l'existence mais qui n'est actuellement pas récupérable économiquement, leur majeure partie correspond à ce que l'on suppose exister, sans pour autant l'avoir encore trouvé. Si les évaluations sont exactes, les ressources en gaz et en pétrole de la croûte terrestre sont plus que suffisantes pour couvrir les besoins mondiaux pendant le reste du siècle, pourvu a) que les ressources supposées existent réellement et b) que les ressources qui existent puissent être trouvées et exploitées économiquement.

Si ces ressources s'avèrent insuffisantes, les besoins mondiaux d'hydrocarbures liquides et gazeux peuvent également être couverts par un apport venant d'autres sources. Le méthane, tout comme les produits du pétrole, peut se produire à partir des schistes bitumineux et des « sables goudronneux », roches qui contiennent une grosse proportion d'hydrocarbures. Les ressources mondiales de ce genre, telles qu'on les évalue dans le rapport de la Commission, sont :

Schiste bitumeux (teneur en pétrole).	267 × 10 ⁹ tonnes métriques
Sables goudronneux (teneur en hydrocarbure).	133 × 10 ⁹ tonnes métriques

Ces ressources ont l'avantage de ne pas être conditionnées par une découverte en vue de leur mise en œuvre. On sait qu'elles existent et le problème d'évaluation se ramène à une mesure. Cet avantage est compensé par le désavantage qu'elles ont actuellement de ne pas être économiques (des opérations à petite échelle sur le schiste bitumineux se font en plusieurs points du monde mais aucune d'elles n'est indiscutablement économique). Néanmoins, la possibilité technique de leur réalisation est déjà chose démontrée et on dispose d'indications suivant lesquelles l'emploi de ces ressources maintenant même n'entraînerait qu'une légère augmentation du coût de revient au point de production. Au surplus, on se rappellera les très grosses ressources en charbon, disponibles également comme sources d'hydrocarbures liquides et gazeux. Là encore, la possibilité technique de réalisation a été démontrée mais, dans le cas présent, l'augmentation des prix de revient actuellement indiquée est considérable.

La houille blanche, forme classique d'énergie restante, est renouvelable, si bien qu'on ne saurait mesurer la « demande » (c'est-à-dire la production) sous forme d'évaluations relatives aux ressources. C'est, au contraire, le degré d'utilisation des ressources que l'on peut mesurer en rapprochant la production d'énergie sous forme de houille blanche pour l'an 2000 (date limite d'évaluation), en fonction de la production annuelle possible. Dans le rapport de la Commission, la production d'énergie sous forme de houille blanche pour l'an 2000 est évaluée

à $1,2 \times 10^{12}$ kilowattheures, à l'exclusion des pays communistes, pour lesquels les données dont on dispose sont insuffisantes. La production possible annuelle d'énergie par la houille blanche pour le monde entier, telle qu'elle est évaluée dans le rapport de la Commission sur la même base, est évaluée à $10,2 \times 10^{12}$ kilowattheures, si bien que son débit, pour l'an 2000, ne serait que 15 p. 100 environ du maximum possible.

L'aspect du tableau énergétique du globe pour la fin de ce siècle, tel qu'il a été présenté ci-dessus, est profondément différent de ce qu'il était il y a seulement cinq ans. A cette époque, les réserves classiques (y compris les possibilités restant à découvrir telles qu'on les évaluait alors), étaient considérées comme si restreintes par rapport aux besoins d'avenir prévus, que l'on pouvait s'attendre que le monde ait à subir une importante hausse de prix de ces formes d'énergie en quelques décennies. Il semble maintenant que les ressources en énergie classique sont beaucoup plus fortes qu'on ne l'avait pensé jadis, tellement plus abondantes, à vrai dire, que les configurations actuelles par sources, ou un aspect du même ordre, pourraient se maintenir franchement jusqu'aux premières années du vingt et unième siècle et la possibilité de ne voir ceci se produire qu'à des prix sensiblement plus élevés est réduite dans une mesure correspondante.

Cette observation ne doit pas être interprétée avec trop de rigidité comme étant applicable à l'ensemble du globe. Il faut tenir compte de la question « transport » (voir ci-dessus). Les énormes ressources de l'Afrique en houille blanche, par exemple, ne sont pas disponibles pour faire face aux besoins d'électricité d'autres continents, voire même d'une bonne partie de l'Afrique elle-même, à cause des limitations graves qu'imposent les frais sur la distance à laquelle on peut transporter de grosses quantités d'électricité.

Il est donc logique, ainsi qu'on l'a récemment souligné¹⁶, de s'attendre à une augmentation du rôle du pétrole (et du gaz naturel, dans une moindre mesure) de par le monde entier, en tant que source d'énergie, tout au moins jusqu'à la fin du siècle en cours. Ce n'est pas par simple coïncidence que les évaluations en ce qui concerne l'énergie globale qui sont résumées ci-dessus envisagent la couverture de près de la moitié de la consommation mondiale d'énergie en provenance de sources classiques pour l'an 2000, contre moins d'un tiers pour 1960, par le pétrole, ou que le pétrole et le gaz pris ensemble représentent moins de la moitié du total pour 1960, contre près des trois quarts en l'an 2000. Le pétrole semble donc destiné à devenir un concurrent encore plus important pour les nouvelles sources d'énergie.

Il faut se rappeler que ce qui précède n'est entaché d'optimisme qu'en ce qui concerne la question des

¹⁶ J. L. Ivers et E. Symonds, *Energy for Economic Development* (L'énergie pour le développement économique), mémoire présenté au second Congrès Arabe sur le pétrole, Beyrouth, 19 octobre 1960.

prix, dans la mesure où la disponibilité et le progrès technologique se répercutent sur eux. Même sans augmentation de prix sur ce plan, il se peut que le prix des produits énergétiques soit plus élevé pour des raisons différentes, par exemple en raison des politiques nationales et de déséquilibres à court terme entre l'offre et la demande, ce qui fait apparaître des prix plus élevés sur les marchés.

En ce qui concerne la manière dont l'offre réagira à la demande à long terme, les précisions supposent des découvertes suffisantes. Que se passerait-il en leur absence? Comme première source complémentaire, on citera les ressources pétrolières actuellement connues mais non récupérables économiquement. Aux États-Unis, on ne récupère actuellement qu'un tiers environ du pétrole que recèlent les gîtes. On ne dispose pas de données pour le reste du monde mais on a tout lieu de croire que la récupération n'y est pas meilleure, si même elle arrive à la même proportion. Les événements actuels, aux États-Unis, indiquent que les niveaux actuels moyens de récupération peuvent être au moins doublés avec les nouvelles techniques en voie de mise en œuvre et, compte tenu du rythme du progrès de la technologie moderne, il est entièrement raisonnable de supposer l'utilisation de la totalité de ces ressources, non seulement aux États-Unis, mais bien dans le reste du monde, si des prix légèrement plus élevés font leur apparition, particulièrement sous l'impulsion de découvertes suffisantes de nouvelles réserves.

Le recours aux schistes bitumineux et aux sables goudronneux comme seconde source complémentaire pourrait fort bien s'accompagner d'une montée de prix, ainsi qu'on le signale ci-dessus. Il n'est pas encore possible de déclarer que ceci ne peut pas se produire mais, si les ressources disponibles, ainsi qu'on l'affirme, sont déjà à la limite de la rentabilité, on a de fortes raisons de penser que les ressources de la technologie interviendront pour s'opposer à ce que les prix augmentent de plus de 10 p. 100 par exemple, sous l'aiguillon que représenterait le besoin.

Tout ceci, néanmoins, est entièrement indépendant de l'avenir de l'énergie atomique. Bien que l'excès d'optimisme des premiers jours à ce sujet ait fait place à une sobre prudence, on semble s'accorder à estimer que l'énergie atomique sera produite commercialement sur une vaste échelle bien avant la fin du siècle. Dans la mesure où cette évolution se produira, les exigences de combustibles classiques — particulièrement de charbon mais, en nombre de lieux et dans une mesure significative, de pétrole et de gaz — seront réduites et les possibilités de manque de ressources et d'augmentations de frais concomitantes réduites d'autant.

Ces conclusions sont fort importantes pour les nouvelles sources d'énergie. Leurs protagonistes et les chercheurs ne doivent pas y voir de remplacements pour les sources classiques plus coûteuses et en voie d'épuisement pour un avenir prévisible. Si on en vient à faire un large appel aux nouvelles sources au cours de ces quelques prochaines décen-

nies, ce ne sera sans doute pas en raison d'une montée des frais afférents aux sources classiques. En d'autres termes et pour les quelques prochaines décennies tout au moins, il n'y aura pas d'occasion de progrès massif pour les sources nouvelles en ce sens que les marchés d'énergie du globe, ou même une appréciable proportion d'entre eux, s'orienteraient vers eux pour résoudre leurs problèmes. Pour que ceci se produise, il faudrait que ces sources nouvelles présentent d'indiscutables avantages de prix, et non pas simplement une égalité, et permettent des économies si attrayantes que les obstacles institutionnels auxquels se heurte leur emploi puissent être surmontés grâce à de puissants motifs économiques.

Ces obstacles revêtent des formes diverses. La récente mise en œuvre d'énergie géothermique en Californie, par exemple, ne s'est pas produite parce qu'elle est brusquement devenue économique. Les possibilités en avaient été connues de longue date, mais son exploitation faisait courir le risque de travailler dans l'inconnu au lieu d'employer une installation de remplacement classique pour la centrale à vapeur à combustible fossile.

Un autre obstacle du même ordre est constitué par l'apathie et l'ignorance. Ce manque de compréhension des possibilités économiques est peut-être particulièrement vrai dans le cas des applications à petite échelle. On dispose, au Japon, d'un chauffe-eau solaire simple qui s'amortit en économies de combustible en quatre mois environ et, cependant, on ne semble pas clairement apprécier ses possibilités en économies expectatives dans des pays et des régions ayant des prix de combustible encore plus hauts que ceux du Japon.

Même avec la compréhension, la commodité et les habitudes peuvent dominer les considérations économiques. Dans certaines régions du monde, on chauffe les maisons à l'électricité, bien que le chauffage au calorifère soit connu comme plus économique. Cette préférence est peut-être confirmée par le coût plus modique d'installation initiale du chauffage électrique, qui prend le pas, dans l'esprit du consommateur, sur la valeur actuelle attendue des économies de frais de combustible par rapport à l'électricité. Le consommateur libre de choisir pourrait fort bien ne jamais s'affranchir des obstacles traditionnels que représente l'indifférence à l'égard des avantages économiques. Ainsi qu'on l'a fait observer plus d'une fois, les habitudes et les coutumes peuvent représenter un obstacle particulièrement gênant au changement. Le passage de la cuisine à l'intérieur, à feu ouvert, à la cuisine solaire à l'extérieur n'a eu que peu de succès en pratique, partiellement en raison du coût de l'appareil employé sans aucun doute, mais il n'est jusqu'aux prix élevés du combustible ou l'avantage, comme en Inde, de se servir de la fiente des animaux comme engrais au lieu de la brûler, qui semble peser fort peu devant l'aversion à la cuisine au plein air.

Tout ceci indique qu'il est souhaitable, sinon nécessaire, de réaliser de grosses économies évidentes

en ayant recours aux nouvelles sources d'énergie si on doit les adopter, même à une modeste échelle, dans un avenir prévisible. Les occasions les plus attrayantes s'offrent pour les applications à petite échelle en vue de leur utilisation par des individus ou des familles. Il faut donc s'attacher à réaliser

le coût le plus modique possible de premier établissement. Ceci, plus le fait que l'énergie en provenance des nouvelles sources ne coûte rien elle-même, doit assurer les avantages de prix considérables qui sont nécessaires, donc l'encouragement qu'il faut pour surmonter les obstacles traditionnels.

NEW SOURCES OF ENERGY AND ENERGY DEVELOPMENT

M. S. Thacker, Professor

Director-General, Council of Scientific & Industrial Research

New Delhi

THE QUEST FOR MATERIAL WELFARE

The implicit assumption of classical economic doctrine that only a few could aspire to an abundance of the good things of life is no longer valid. Scientific and technological developments of the past few decades have made it possible for all the peoples of the world to aspire to new levels of material prosperity; the widespread political awakening in under-developed areas has made it imperative that the aspiration of the peoples of these areas to improved standards of living must be met. By wise use of the world's material resources, with the aid of new technology, adequate levels of physical well-being can be ensured for all.

WORLD POPULATION TRENDS

A significant feature of the present world situation, meriting serious notice, is the rapid growth of population. Between 1850 and 1900, the population of the world was growing at the rate of about 0.7 per cent per year. During the next half-century, this figure increased to about 0.9 per cent. (1) Between 1950 and 1958, population rose from 2,493 millions to 2,852 millions: an annual increase of 1.7 per cent. (2) Assuming this rate of increase, the trend of population growth is indicated in table 1.

There is reason to believe that the rate of increase may be even higher. The annual death rate of 20 to 30 per thousand in the under-developed regions — which comprise more than two-thirds of the world — could be reduced substantially by the application of the latest knowledge in the fields of medicine and public health. The estimates of world population in table 1 may therefore well be exceeded, unless the birth rate also comes down.¹ Under-developed regions have generally a high birth rate and at the same time the greatest need for economic development.

¹ For example, assuming a rate of growth of 2 per cent per annum from 1970 onwards, world population will rise to 4,255 millions in 1980, 5,187 millions in 1990 and 6,323 millions in 2000.

ENERGY AS THE KEY TO MATERIAL PROGRESS

If the entire population of the world is to attain standards of living comparable with those of the advanced nations, production of goods and services has to be stepped up many times. Knowledge of the laws of nature, and technology based on that knowledge, have determined man's ability to control his environment and to improve his material well-being. Knowledge and, with it, science and technology continue to grow rapidly. Limitations in resources of established raw materials and forms of energy are being overcome by the application of new knowledge. The prodigal manner in which resources of raw materials are being depleted may lead to several critical shortages, some of which can be made good by the discovery of new reserves. Manufacture of substitutes and exploitation of leaner resources, while providing relief, will make increasing demands on energy.

THE GROWTH OF ENERGY USE

Until comparatively recent times man depended on himself and on domesticated animals for power. With the harnessing of the energy of the wind and flowing water, two new prime movers became available. The watermill, probably invented about the beginning of the Christian era, came into extensive use in Europe with the decline of slavery in the Middle Ages. In addition to grinding corn, it was used for pumping water, crushing ores, smelting and working of metals, sawing wood, and a variety of other purposes.

The windmill was first used in the Middle East, India and China. It probably entered Europe in the wake of Islam and soon came into widespread use, first for grinding corn and pumping water and, later, for several manufacturing purposes. The windmill and the watermill raised production to a much higher level.

The next significant advance came in the eighteenth century with the development of the steam

Table 1

Year	1961	1970	1980	1990	2000
Population (millions) . . .	3,000	3,491	4,132	4,891	5,789

Table 2

Power output of various prime movers

	Horsepower
Man	0.04 to 0.08
Horse	0.4 to 0.6
Water wheels	Average of 5; seldom more than 10
Windmills	2 to 15

SOURCE: *A History of Technology* (Oxford University Press), vol. 4, chap. 5.

engine, which made power available where it was required and ushered in the industrial revolution. By the end of the eighteenth century, improved steam engines were used in mines, metal plants, textile factories and breweries. By the first half of the nineteenth century, the steam engine had established itself as a superior and more powerful prime mover. Power outputs of 100 hp or more became common. The steam engine was harnessed for transport on sea and land.

The discovery of electromagnetic induction by Faraday in 1831 laid the foundation for the immense electrical industry of today. The water turbine made possible the generation of hydroelectricity.

The nineteenth century also brought two other prime movers: the internal combustion engine and the steam turbine; and the twentieth century has given us the gas turbine.

PRESENT SOURCES OF ENERGY AND THEIR AVAILABILITY

All our existing and potential energy supplies are derived from three primary sources: the sun, the

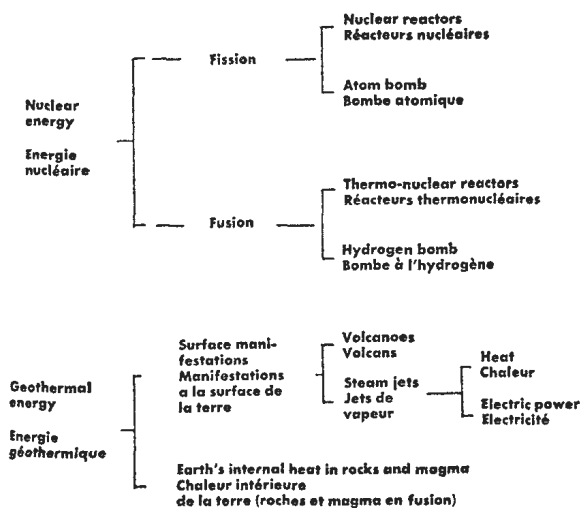


Figure 1 a

Classification of energy sources
Classification des sources d'énergie

earth and the atomic nucleus. All three sources are inexhaustible and capable of meeting any foreseeable needs of mankind, but satisfactory techniques of utilization have still to be worked out. The manifestations of the various forms of energy are shown in figures 1 a and 1 b, with some indications of their present and possible future use as energy sources.²

Wood and farm wastes were the only fuels available until the early centuries of the Christian era, when coal came into use. No accurate statistics are available about the use of farm wastes as fuel, but Putnam has estimated that these may have contributed 10 to 20 per cent of the total world energy in 1950 (4) and that about 380 million tons of coal equivalent annually³ is the maximum that can be expected from this source. (5) Methane gas could be produced from farm wastes without impairing their manurial value; in many countries efforts are being made to build small power plants for utilization of this gas by village communities.

Wood was the major source of the world's energy until 1880, when the lead was taken by coal. In 1950, about 150 million tons of coal equivalent of wood was used as fuel, amounting to about 4 per cent of the total energy consumption. It has been estimated that the world's forests may be made to provide wood equivalent to 2,000 million tons of coal a year. After allowing for the requirements for construction, paper manufacture and other essential uses, a maximum of about 500 million tons of coal

² A somewhat different classification is given elsewhere by the present writer. (3)

³ To facilitate comparison, quantities of all fuels are expressed in metric tons of coal equivalent on the basis of the heat obtained by burning in a bomb calorimeter.

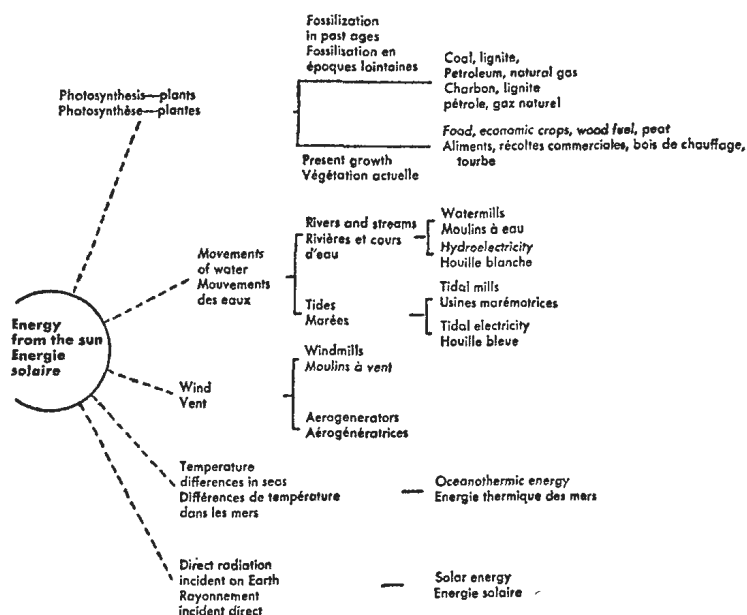


Figure 1 b

Classification of energy sources
Classification des sources d'énergie

equivalent of wood may be available annually for use as fuel.

With the industrial revolution coal came into its own as a cheap and versatile fuel. The need for transportation of manufactured goods led to the extension of railways and steamer services. The route mileage of railways in the world rose from 25,000 miles in 1850 to 600,000 in 1900. (6) In this enormous expansion, coal played a prominent part. In the last quarter of the century, generation of electricity brought further demands for coal. World production rose from 100 million tons in 1850 to 1,000 million tons at the turn of the century. (6)

Peat is a primitive form of coal, but it grows and may be regarded as a renewable energy source. As found in peat bogs, it is associated with 90 to 95 per cent of water, which is difficult to remove. Present production of peat, chiefly in the USSR, Ireland and Germany, is negligible, but, according to Putnam, peat bogs could be managed on a sustained-yield basis and made to contribute about 500 million tons of coal equivalent annually. (5)

The world's fuel supplies were augmented in the latter half of the nineteenth century by large-scale exploitation of petroleum. Since the sinking of the first oil well in Pennsylvania in 1859, petroleum has been found in many countries and production gradually increased. Until the end of the century, the main demand was for kerosene, lubricants and fuel oil; petrol was wasted. Utilization of petrol had to await the development of the internal combustion engine and its extensive use in automobiles and aircraft in the twentieth century. Today, the petroleum industry has grown to gigantic proportions and produces several fuels for different purposes as well as a large variety of "petrochemicals". World production of petroleum rose from 20 million tons in 1900 to 500 million tons in 1950, and has reached about 1,000 million tons at the present time.

Another fuel increasingly exploited in recent years is natural gas, (7) which is usually found associated with petroleum. Together, the fossil fuels, coal, petroleum and natural gas, account for the greater part of the world's present consumption of energy. These were formed in the remote past by natural processes which took millions of years and represent a wasting asset; once the existing reserves are used up, these fuels will have gone for ever.

In 1958, hydroelectricity contributed the energy equivalent of 75 million tons of coal to the world consumption of 3,699 million tons of coal equivalent.⁴ The world potential of hydroelectric power, harnessed and unharnessed, is about one billion kilowatts, (8) but many undeveloped resources are situated in inaccessible spots, remote from centres of heavy demand, and cannot easily be harnessed or econo-

⁴ The production of natural gas in million tons of coal equivalent was 76 in 1929; 104 in 1937; 225 in 1949, 365 in 1954 and 507 in 1958. The total includes only coal, lignite, petroleum, natural gas and hydroelectricity; on account of the lack of reliable data, wood and farm wastes are not included. (7)

Table 3

Contribution of energy from recurrent sources
(Million tons of coal equivalent)

Year	1960	2000
Farm wastes	684 ^a	380
Wood	150 ^a	500
Peat	13.3 ^a	500
Hydroelectricity	92.75 ^b	328.5
TOTAL, from recurrent sources	940	1,708.5
TOTAL, energy consumption from all sources (rough estimate)	5,000	20,000
Percentage contribution from recurrent sources	18.8	8.5

^a Estimates by Putnam (op. cit., pp. 172-173), for the year 1950. Present values are not likely to be much different.

^b Annual output from present installed capacity of 121 million kilowatts, assuming 70 per cent load factor.

mically utilized. The present installed capacity in the world is 121 million kilowatts. (9) While it may be expected that there will be considerable development of new hydroelectric sites in the next few decades, it is unlikely that the total installed capacity will exceed 300 million kilowatts by the end of the present century. By then, the total energy consumption will have risen so much that hydroelectricity will form only a small fraction of the total.⁵

Farm wastes, wood, peat and hydroelectric power are recurrent, but limited energy resources. Their present estimated annual contribution to the world's total consumption and the maximum amounts that can reasonably be expected from these sources at the close of the century are indicated in table 3.

Coal (including all grades of coal and lignite), petroleum and natural gas are the non-replenishable fossil fuels exploited at present.⁶ In addition, certain parts of the world have deposits of oil shales and bituminous tar sands which contain hydrocarbons

Table 4

World resources of fossil fuels

	Billion tons coal equivalent
Coal	4,400
Petroleum	150
Natural gas and methane in coal measures	135
Oil shale	45
TOTAL	4,730

SOURCE: Albert Parker, "The fuel and power industries and national prosperity", in *Journal of the Royal Society of Arts*, April 1960, (London), pp. 316-353.

⁵ At 100 per cent load factor, 300 million kilowatts capacity will yield energy corresponding to 328.5 million tons coal equivalent annually; world energy consumption in the year 2000 will probably exceed 20 billion tons of coal equivalent.

⁶ Peat is usually listed among fossil fuels, but, following Putnam, it has been considered a recurrent source in this paper.

that could be extracted and used as fuel.⁷ Table 4 summarizes the resources of fossil fuels.

HOW MUCH ENERGY DO WE NEED?

Having briefly reviewed the available sources of energy, we come to the question "How much energy do we need?" The broad correlation between per capita income and energy consumption is well known and is illustrated in table 5 with data for a few selected countries for the year 1956.

Most of the under-developed countries in Asia, Africa and Latin America have a very low per capita energy consumption. Their development necessarily involves greatly enhanced demands for energy, but it is not easy to decide on any precise figure of energy consumption to be aimed at. Without entering into a detailed analysis, it may be assumed that the average for western Europe — about 2.5 tons per capita — is the minimum essential for an adequate standard of living.⁸

In 1958, five countries with less than a fifth of the world population between them accounted for two-thirds of the aggregate energy consumption, leaving only a third for the other four-fifths (table 6).

If the per capita consumption of energy of the world — minus the five countries mentioned — could be raised at once from 0.53 to 2.5 tons, the world average would go up to 2.9 tons from its present value of 1.3 tons of coal equivalent per annum; and the annual world energy demand would reach 8,267 million tons. It is obvious that an increase of this order can only take place over a period of time. Meanwhile, demand for energy in the major consuming countries will also rise a great deal. It may be assumed that the per capita energy demand for the world as a whole will rise to about

Table 5

Country	Per capita annual income in pounds sterling	Per capita energy consumption in tons of coal equivalent per annum ^a
United States	730	8.6
United Kingdom	320	5.0
Germany (Federal Republic)	226	3.6
Netherlands	218	2.5
Italy	136	1.1
Japan	82	1.1
India	18	0.1

SOURCE: See table 4.

^a Energy from non-commercial sources, such as wood, peat, dung and others is not included and may add up to 0.2 to 0.3 tons of coal equivalent for some countries.

⁷ The Bureau of Mines of the United States of America has demonstrated that oil can be extracted from oil shale without too high a cost; however, all attempts to obtain fuel from tar sands have, so far, ended in failure. (10)

⁸ The energy consumption in 1958 for western Europe as a whole, as well as for a number of individual countries, was around this figure. For Denmark it was 2.5; France 2.4; Netherlands 2.4; Norway 2.4; Sweden 3.0; USSR 2.9; and Poland 2.8. (7)

Table 6

	Energy consumption in million tons of coal equivalent ^a	Population in millions ^b
World	3,699	2,852
United States	1,332	174.8
USSR	599	208.8
United Kingdom	245	51.9
Germany (Federal Republic)	183	52.2
France	108	44.6
Total, for these five countries	2,467	532.3
Share of the five countries in world total	66.7 per cent	18.7 per cent
TOTAL, for rest of the world	1,232	2,319.7
Share of world total	33.3 per cent	81.3 per cent
Average per capita energy consumption for the five specified countries	4.63 tons per annum	
Average per capita energy consumption for rest of the world	0.53 tons per annum	

SOURCES:

^a World Energy Supplies, 1955-1958; (7)

^b Statistical Yearbook 1959. (2)

4 tons of coal equivalent per annum by the end of the present century. With a population of at least 5 billion, world energy consumption will then have reached the staggering total of 20 billion tons of coal equivalent per annum. High as it seems, this can be attained if the present rate of growth of energy consumption — about 4 per cent annually — is sustained until the end of the century.

The probable reserves of coal in the world are estimated at 4,400 billion tons (table 4) and should suffice for 2,200 years at the present rate of consumption of 2 billion tons per annum; even if consumption were to rise to ten times the present figure, there would seem to be enough coal to last for more than two centuries.

A closer look at the problem shows that the real position is not so favourable. In the first place, not all the coal in the ground can be brought to the surface. Further, the possible output of usable coal is reduced by inevitable mining losses. Mining costs will also increase as living standards rise, since mining is a labour-intensive industry. Another complicating factor to be considered is the uneven regional distribution of coal deposits (table 7). Almost all the coal is in the Northern Hemisphere. Three countries, the United States, China and the Soviet Union, account for nearly five-sixths of all the coal in the world: the United States has one-third and the other two have one-fourth each. While these countries will have ample supplies of coal for many

Table 7
World reserves of coal and lignite (billion tons)^a

	Bituminous coals and anthracites		Brown coals and lignite	
	Probable	Proved	Probable	Proved
United States	1,303	431	420	—
USSR	998	296	202	13
China	1,011	—	1	—
Germany (Federal Republic)	224	67	—	62
United Kingdom	171	128	—	—
Poland	80	15	18	—
Canada	63	42	24	12
South Africa	68	37	—	—
India	62	4	—	0.5
Australia	17	6	41	7
Japan	10	5	0.3	0.1
Belgium	6	3	—	—
Netherlands	3	3	—	—
Italy	0.6	0.5	0.5	0.3
WORLD TOTAL	4,017	1,038	707	95

SOURCE: See table 4.

^a The estimates given need revision in some cases, but this does not affect the discussion in any way.

centuries, severe local shortages may occur in the rest of the world within the next few decades.

At the end of 1959, the proved reserves of petroleum in the world were estimated to be about 51,000 million tons of coal equivalent. World production of petroleum in 1958 was 1,205 million tons of coal equivalent.⁹ On account of the versatility and convenience of liquid fuels, the demand for petroleum is increasing and may be expected to rise annually by about 10 per cent. At this rate, the proved reserves would be used up by 1975. Even if the anticipated probable reserves of 150 billion tons were realized, they may be exhausted well before the end of the century. Like those of coal, the deposits of petroleum are confined to certain regions, mostly in the Northern Hemisphere. The accumulation of petroleum in only a few areas may result in local shortages long before the ultimate exhaustion of reserves.

Table 8
Distribution of world petroleum reserves^a

	Percentage
Middle East	62
United States	13
USSR	10
South and Central America	7
Rest of world	8

^a Calculated from figures supplied by the Bureau of Petroleum Information, New Delhi.

^a Calculated from figures supplied by the Bureau of Petroleum Information, New Delhi.

The United States is at present the principal producer and consumer of natural gas. While the ultimate reserves of natural gas may be of the same order as those of petroleum, they may probably be exhausted earlier. Deposits of oil shales and tar sands are unlikely to be exploited in the immediate future since these are mostly confined to the United States, the Soviet Union and Canada, all three of which have ample resources of other fuels.

The position in regard to the wasting assets of fossil fuels may now be summed up. Coal is, at present, the major energy resource and will continue to supply a large part of the world's requirements for a considerable time to come. Petroleum and natural gas may become scarce throughout the world before the end of the present century. Most countries suffer from either lack or shortage of these fuels. The rapidly growing energy needs of the world call for the exploitation of new forms of energy. In some areas these may function as new major sources of energy and in others they may serve as valuable supplements to conventional supplies. In developing countries, there are many special problems which necessitate the exploitation of new energy sources.

POSSIBLE IMPROVEMENTS IN ENERGY UTILIZATION

Before entering into a discussion of the new sources of energy, it may be of interest to consider some of the ways in which conventional resources could be utilized in a more effective manner.

The recent development of the reversible pump-turbine, which will operate with a drop as small as 12 feet, may lead to the economic exploitation of many hydroelectric sites now regarded as unfeasible. A Polish scheme envisages the generation of a total of more than 1 million kilowatts from 9 stations along the course of the lower Vistula from Warsaw to the sea. (11)

A way of employing hydroelectric stations more effectively is to use the extra output during off-peak hours to pump water and store it for generating electricity during periods of peak demand.

Recent work in several countries has indicated the possibility of inhibiting evaporation of water from reservoirs and lakes by spreading thin layers of certain substances such as cetyl alcohol on the surface. Some success has also been reported in inducing artificial precipitation at desired locations.

In any heat engine, there is an upper limit to the efficiency of conversion of heat into electricity or power, owing to thermodynamic factors. The maximum possible efficiency is 40 to 45 per cent, but actual efficiencies achieved in practice are usually much lower. Efforts are directed to reducing the gap between actual and possible efficiencies.

As much as 70 to 80 per cent of the energy input of the steam engine appears as low-grade heat and is rejected from the condenser in the form of warm water. By dispensing with the condenser and using

the back-pressure turbine, the residual heat can be recovered and used for various purposes.

It has long been the dream of technologists to get over the hurdle of the Carnot cycle and effect direct conversion of chemical energy into electricity in an electrochemical cell. Various fuel cells have been tried, and electrical energy with a net efficiency ranging from 50 to 80 per cent has been obtained, depending on temperature, pressure, the fuel used and other factors. The day may not be far off when automobiles will run on fuel cells. A fuel-cell-operated tractor has been developed, using hydrogen-oxygen or propane-oxygen cells to generate 15 kilowatts of electricity. (12) A novel fuel cell announced recently uses as fuel a mercury amalgam of sodium, oxygen and water; the prototype will develop 75 kilowatts and will be about 15 times lighter than the standard batteries now used. (13)

The hydrogen-oxygen cell is reversible and can be used as an accumulator for the storage of electricity. Power stations are now fully utilized only for about half the time, and the surplus capacity can be used to electrolyse water and produce hydrogen and oxygen which could be employed for the generation of electricity when required.

Much work has been done in recent years on various other methods of direct energy conversion, especially for the power needs of space vehicles.¹⁰ The development of the silicon solar battery is well known. The possibilities of using thermionic, thermoelectric and magnetohydrodynamic methods (14) for conversion of heat into electricity have been demonstrated experimentally, but none of these methods has reached the stage of application for large-scale power generation.

The economic transfer of large blocks of power to distant centres of use is accomplished by transmission at very high voltages. In AC transmission, there is a practical limit to the line voltage above which corona effects lead to excessive loss of energy and interference with neighbouring communication systems. The alternative is DC transmission which has certain drawbacks but at the same time offers substantial advantages. Several DC transmission schemes are already in operation or envisaged for the near future. The Soviet Union proposes to make Siberian water power available to its European centres of industry and it may be that hydroelectricity from Africa will be transmitted by one-million-volt DC lines to be fed into the grid systems of western Europe. (15)

The low load factor at which most generating stations are being operated is a serious problem. Staggering of supplies to consumers and spreading the load by means of local grids help to improve load factors, but imaginative solutions must be looked for. A recent step in this direction is the linking of the electricity systems of England and France by DC cable across the English Channel. If political

and other obstacles could be overcome, such links might multiply and finally merge in a giant network of interconnected supergrids embracing vast areas of the world.

The heat pump is a mechanism which draws energy from its surroundings and converts it into useful heat. Water (from wells, lakes, rivers or the sea) and waste heat from industrial processes are suitable sources, but the soil, atmosphere or solar radiation can also be tapped. Hundreds of heat pumps are in use in the United States and Great Britain for heating buildings, for supplying hot water and for supplying process heat in factories. Double-purpose heat pumps can be used for heating in winter and cooling in summer. Heat pumps are costly to install, but, apart from the saving in fuel, they have the special advantage of freedom from smoke and objectionable smells. Their use is specially profitable wherever electricity is cheap and fuel dear. The output of heat may be many times the electricity consumed during operation.¹¹

Since coal is the world's major fuel, its conservation and efficient use are of much interest. Recent years have witnessed increased mechanization of mining and transport of coal, thus rendering possible exploitation of deposits formerly regarded as unworkable. By locating large power stations at the pit-head, profitable use is made of inferior coals, the better grades are conserved and, at the same time, the strain on the transport system is mitigated. Advances have been made in the beneficiation of low-grade coals by washing, screening and blending. Pulverized coal has been developed as a power station fuel. Improvements have been made in domestic and industrial combustion equipment with a view to increasing efficiency and minimizing atmospheric pollution. Lastly, underground gasification of coal may lead to better utilization of coal resources besides dispensing with the need to mine coal.

Transport accounts for about a quarter of the world's energy consumption, and significant economies in this sector would be of great value. Steam traction has a very low efficiency, and its replacement by Diesel or electric traction would result in better service as well as saving of fuel. Railways in the United States are now run almost entirely on Diesel-electric power and British Railways is gradually changing to Diesel power.

Substantial savings in energy could be effected if the location of industrial centres were planned at the national level, taking into account the distances over which fuel, raw materials and manufactured articles have to be transported. This might also be done at the international level, if goodwill and understanding could be ensured amongst nations.

Mechanization and automation are energy-intensive. However, they lead to more than a propor-

¹⁰ These methods are also of importance in connexion with the efficient utilization of solar and nuclear energy.

¹¹ In the heat pump installation in the Royal Festival Hall in London, a total heat output of 2,700 kilowatts can be obtained with an engine consuming 525 kilowatts. (16)

tionate increase of production of goods and result in lesser expenditure of energy per unit of product.

Thus, several economies in energy utilization are possible by the use of existing knowledge and foreseeable developments. But the mounting demands of energy cannot be fully met unless new sources of energy, which may become either major suppliers or valuable supplements, are harnessed.

NEW SOURCES OF ENERGY

The important new sources are nuclear, tidal, oceanothermic, geothermal and solar energy, and wind power. Several excellent reviews dealing with one or more of these sources are available. (17, 18, 19 and 20) I shall therefore refer only to some of the significant recent developments.

I shall deal with nuclear energy briefly in passing. While both fission and fusion are demonstrably good sources of energy, it has so far been possible to obtain useful power only from fission. There are several reactors of various types in operation or under construction in the United Kingdom, the United States, the Soviet Union, and other countries.

Cost is still a major consideration in the production of nuclear energy for industrial purposes, but sooner or later it may compete with conventional sources of energy. While most forms of energy, apart from hydroelectricity, tend to rise in cost in the long run, nuclear energy will gradually become cheaper. Sir John Cockroft estimates that in Great Britain nuclear power will break even with power from coal by about 1970.

It is estimated that world resources of uranium and thorium could give 23 times as much energy as the total reserves of all the fossil fuels. (21) Nuclear fission energy is potentially capable of meeting the needs of the world for thousands of years. In the meantime, fusion processes may become an alternative source of energy. Physicists are now busy studying the behaviour of hot plasmas, and if the problems of plasma physics can be successfully solved, fusion energy may become a reality and provide humanity's needs for ever. Plasma physics is also expected to lead to new methods of converting heat into electricity.

The design, construction and operation of nuclear reactors require a high level of science and technology. The units have also to be of large size on account of technological and economic considerations. For these reasons, this form of energy will remain outside the reach of many countries of the world for some time to come, and the special energy needs of the dispersed rural communities of the vast underdeveloped areas must be met in other ways.

If conventional energy sources are adequate for present needs, and if fission and fusion energy may be expected to solve the energy problem of the world in a startling fashion for the future, one might well ask "What then is the problem?" When dealing with the supply of energy in the world as a

whole, if we have in mind the technologically advanced countries, which are well provided for, we will have a difficult case to make out for energy resources such as solar energy and wind power. But, in discussing this problem, we have to take into account the needs of the less fortunate countries, which constitute over two-thirds of the world.

Broadly speaking, there exist two, perhaps three, groups of countries. In the first group come the technologically advanced countries such as the United States, the Soviet Union, the United Kingdom, and some of the other States of western Europe, which have not only the technology, but also the manpower and money to build huge power plants by which abundant supplies of cheap power could be made available and which are also capable of investing large sums of money for transportation of fuel. The fast-developing countries, such as India and China, constitute a separate group, while the third group comprises the vast areas of underdeveloped States in Africa and Asia.

It is interesting to note that most of the underdeveloped countries fall within the tropical belt between the 30 degree latitudes, and most of the highly developed countries are situated outside this belt. It is also worth noting that many of the technologically advanced countries owe their present position to the plentiful availability of fossil fuels. Outside West Asia, oil reserves of the underdeveloped countries are meagre. Their coal resources are not too great. Transportation of fuel entails more problems. Nuclear energy may provide a solution in the case of some of these countries. However, nuclear energy involves high initial outlay and is economic only when produced in very large quantities in the neighbourhood of centres of heavy consumption.

Whereas most of the fossil fuel deposits may be located outside the 30-degree belt, the most favourable sites for the utilization of wind power and solar radiation are within this belt. For a given area, this belt receives from solar rays, on an average, two to three times the energy incident on regions outside it. There are some areas in the belt where over 2,000 kilowatt-hours of energy is received per square metre of surface annually. Yet another important distinction between these groups of countries is the disparity in population distribution. Large central power stations operating on nuclear or thermal power are well suited to large urban and industrial centres, which are characteristic of the developed countries, but will not be adequate to meet the special needs of dispersed rural communities in underdeveloped areas. It is in dealing with the latter that solar energy and wind power come to the forefront as significant sources of energy.

Before proceeding further in regard to solar and wind energy, some account will be given of the developments in the utilization of tidal, oceanothermic, and geothermal energies. A detailed review of the theoretical and technical aspects of tidal power, with a list of possible sites and their characteristics

is available. (19) Tides contain large amounts of energy, but it is intermittent and too diffuse to be extracted easily. Small tidal mills have been operated since early times but fell into disuse with the rise of the steam engine. It is only large-scale tidal plants that have a chance of being economic, but only a few sites in the world are suitable for installation of such plants.

Apart from large-scale schemes, there appears to be good scope for small tidal installations of one to ten megawatts on the coasts of countries lacking in power sources. The power from such installations can be fed into a grid, if one is available, or used for intermittent operations. Several projects have been proposed during the last three or four decades for harnessing tidal energy to obtain electric power, but only one — the Rance project — has reached the stage of actual development. The scheme is now expected to produce 250 to 600 million kilowatt-hours per year instead of 800 million as originally planned. (22) The unique feature of the scheme is the use of special bulb generators with reversible turbines. Energy is obtained from the rising as well as the ebbing tide. Since this will be the first tidal power plant, the experience gained in its working will be of value in initiating further schemes.

Oceanothermic energy or thermal energy of the seas is obtained by exploitation of the considerable temperature differences that often exist between the surface and the deeper layers of the ocean. A simple application of this energy would be to connect bodies of warm water with a neighbouring expanse of cold water to warm up the climate or melt ice. Alternatively, mechanical or electrical energy may be produced by using the vapour emanating from the warm source to turn the blades of a turbine. As a result of theoretical and practical investigations over the past 30 years, it has been shown that the production of power from oceanothermic energy is technically feasible. The most favourable conditions for the location of stations occur within the isotherms of 25°; this corresponds roughly to the tropics.

Though no actual commercial plant producing oceanothermic power is in operation yet, there is a fully worked-out plan for a land-based station at Abidjan in West Africa; tentative plans for a floating station and one on an artificial island have also been worked out. In addition to supplying power, these stations could be designed to produce fresh water and salt. Further, the vast amounts of sea water handled in such stations may facilitate the landing of plankton and fish. The use of solar, atomic, or geothermic energy has been suggested to increase the temperature of the warm source in oceanothermic plants. (19)

The internal heat of the earth manifests itself in certain localities in the form of volcanoes or jets of steam issuing from the ground. (19, 20) The steam can be used for process heat in factories or domestic heating or for the generation of electricity. The first geothermic power plant was built in Italy at the Larderello field. (20) During the last three years, three more power plants have been built. The geo-

thermic station at Wairakei in New Zealand started operating in November 1958 and will ultimately have a capacity of 250,000 kilowatts. (23) The Soviet Union has installed a geothermic power plant on the Kamchatka Peninsula; the steam is also used for heating houses near by. (20) An American geothermic power plant is now operating in Big Sulphur Creek Canyon, California; the present capacity is 12,000 kilowatts. (24)

Geothermic plants utilizing natural steam jets will ultimately make a significant, though small, contribution to the world's power resources. In the long run, however, a major contribution may well come from the heat of the rocks in the earth's crust. One might envisage using the atom bomb to blast deep holes inside the earth's crust. Water could be made to enter these holes and come up in the form of steam.

The amount of solar radiation which falls on the land surface of the earth is several thousand times our energy needs. Unlike fossil and nuclear fuels, the supply of solar energy is recurring, plentiful and free. The intrinsic drawbacks of solar energy are low intensity, changing direction and intermittent nature. Consequently, its utilization poses difficult problems which are being investigated by workers in many countries. The quantity of energy available is so large that the idea of harnessing solar energy to supply the energy needs of vast sections of the human race is attractive; it is worth-while making all possible efforts towards this end.

Both collection and conversion of solar energy into useful forms present many problems. Solar energy could be converted into usable forms either by thermal conversion or by photonic conversion. While thermal conversion is generally wasteful, techniques of photonic conversion are still undeveloped. Considerable work has been carried out in many countries for using solar energy as a source of heat. The heat collected could be used directly for various purposes or converted into mechanical or electrical power by a heat engine or by thermoelectric or thermionic devices. Again, the conversion of the heat collected into utilizable power is inefficient. Many groups of workers are dealing with these problems at various research centres and many an application of solar energy has been devised and is in use for such purposes as cooking, water heating, refrigeration, distillation, melting of refractory materials and running small power units. Such applications hold out considerable promise in areas where other types of power are not available. In small agricultural communities and in habitations remotely situated, solar energy will be a valuable source of energy for agriculture and for cottage and small-scale industries. In the humid tropical regions, the utilization of solar energy for the purposes of dehumidification and operation of cooling systems in factories and homes will add to the comfort of workers and raise productivity. Using solar energy, water in highly saline tracts may be distilled or purified by freezing. The development of small

power units operating on solar energy would provide much relief in large areas of under-developed countries.

The simplest way of collecting solar energy is by using a box or tank covered by glass which allows the sun's rays to enter but prevents the radiation inside from escaping. This method will give temperatures up to 150°C, and can be used for heating water and for other purposes.

Temperatures up to a few thousand degrees can be obtained by concentrating the sun's rays on suitable collectors. The flat plate collector is made of glass or special plastic, insulated on the side away from the sun. The heat absorbed is transferred to water or air. The focusing collector uses mirrors to concentrate the radiation on to a small area of a dark surface. Special selective surfaces of low emissivity have been developed recently for improving the efficiency of collection. Several new materials, such as anodized aluminium, fluorinated hydrocarbon plastic and vacuum aluminized plastic, have reduced the cost of collectors. Focussing collectors usually need to be continuously oriented towards the sun to obtain high efficiency. Some recent collectors use cylindrical parabolic mirrors mounted on east-west axes and requiring only periodical adjustment towards the sun.

The "solar pond" is a novel type of collector which has recently been developed in France and Israel. It is an artificial pond, one or two metres deep, with a blackened bottom which absorbs solar radiation and heats the water. Normally, the heated water would rise to the top by convection and the heat would be dissipated. This is prevented by increasing the density of the water at the bottom of the pond by dissolving salts, nearly pure water being kept at the top. Temperatures of 60 to 90 degrees centigrade have been obtained at the bottom of the pond in this way. It is expected that solar ponds can be used to produce energy at a cost comparable to that of power from thermal stations. However, the possibility of large central power stations working on solar energy is remote.

A new way of harnessing solar energy is planned in Egypt and Spain. (11) In the Egyptian scheme, water from the Mediterranean will be taken in pipes over a distance of 43 miles, to a depression which is 440 feet below sea level at its lowest point. During its passage, the sea water will generate 600,000 kilowatts in a power station and then disappear by evaporation in the depression. The scheme will also provide valuable salts and water for irrigation as by-products. The Spanish plan in the western Sahara envisages the production of about 30,000 million units of electricity per year, as well as large amounts of salt, chlorine, bromine, sodium and magnesium.

Solar thermoelectric generators of one horsepower have been developed in the Soviet Union. Another Soviet Union achievement is a solar refrigerator that produces nearly 800 pounds of ice daily. Soviet Union scientists are planning a solar power station in Armenia in which 5 acres of mobile mirrors focused

on a solar boiler will generate 25 million kilowatt-hours annually. (25)

New developments in physics, particularly in solid state physics, are expected to play an important role in the utilization of solar energy. Photochemical processes, if reversible, may provide a solution to the problem of storage of solar energy. Research in semi-conductor physics has brought out many new materials which promise high conversion efficiencies of solar energy by thermionic methods. The silicon battery is a means of direct conversion of solar energy into electricity. The conversion efficiency of solar cells is now about 15 per cent and the cost has decreased appreciably though they are still too expensive for any ordinary application. The high cost is caused by the pure materials required. While the silicon cell is a photo-voltaic device, a thermoelectric solar battery has recently been developed in France. (26)

These applications show the extraordinary versatility of solar energy. Two major break-throughs are required before solar energy can begin to make a significant contribution to our energy supplies. One is a satisfactory method of storing it, and the other is a cheap and efficient means of converting it into electricity.

Like solar energy, wind power is recurrent, inexhaustible and free. Though its harnessing does not present any insurmountable problems, wind-power has one serious drawback : unpredictability. Consequently, a continuous firm supply of power cannot be depended upon. Research work is under way in many countries on problems concerning the economics of wind power for different uses, alone or in combination with other sources of power, especially for remote areas, on the design of wind-driven electric generators, and on the performance of different types of windmills.

Aerogenerators were developed at the end of the nineteenth century, and a number of types, covering a wide range of capacities, have been designed since then. The biggest aerogenerator built so far is the Smith-Putnam machine, which had a capacity of 1,250 kilowatts and operated successfully for some time in Vermont (United States).

Most existing aerogenerators are too complicated and uneconomic. A new 100 kilowatt windmill of simple design has been developed by R. Smith, Ltd. (27) It is light, robust and cheap, and generates electricity at 3 mills per unit. The Smith machine may possibly be the beginning of a new chapter in the windmill's history. The Istra research station is understood to be working on a network of twelve aerogenerators operating in parallel with a Diesel plant in support, to supply electricity to a remotely situated community. The current, transformed to AC, can be used for running machinery, raising water and grinding grain.

A Soviet scheme provides for several thousands of windmills in the steppes to ensure a reliable water supply for animals, each machine furnishing

enough water for a thousand head of sheep. The seven-year plan calls for the installation of 65,000 wind-powered water pumping units.

Wind power will find applications in special situations where ordinary sources of power are not available. There are a large number of sites all over the world where wind power could be developed. It will form a useful addition to our energy resources but is unlikely to supply a major share at any time. It is a source of power well suited for programmes of rural community development in under-developed countries in Africa, Asia and elsewhere and calls for

systematic and organized work on a large scale in these areas.

The lines on which basic scientific research and development towards greater application of solar energy and wind power are proceeding have been broadly described. There are encouraging signs that techniques and devices, sun- and wind-operated, will soon become available for special uses. It is the theme of this paper that these two forms of energy have much to contribute especially in the growth of the less developed and under-developed countries. So far, much of the research on and application of

Table 9

Population and energy resources of selected Asian countries

	1958 population (in millions)	Reserves in millions of metric tons			Natural gas	Hydro-electric potential (in millions of kilowatts)
		Coal	Lignite	Petroleum		
Afghanistan	13	80	—	Nil	Nil	2.5
Burma	20.3	Poor	—	About 6 ^b	—	Considerable
Ceylon	9.4	Nil	Nil	Nil	Nil	1.5 at arithmetical mean flow ^a
China (People's Republic).	669	1,011,000 ^a (Total) [*]	600 (total) ^a	102 ^{**}	—	90 at Q 95 ^d
India	438	43,284 (proved) 124,974 (total) ^a	212.4 (proved) 2,077 (total) ^a	About 75 ^c	—	40 ^{***}
Indonesia	87.3	Large	—	1,225 ^{**}	—	Considerable
Iran	19.7	100	—	6,000	—	5
Iraq	6.6	—	—	4,000	2 billion cu. ft. per year	0.3
Japan	91.8	5,699 (proved); 19,059 (total) ^a	237 (proved) 1,733 (total) ^a	About 4 ^a	—	13.4 at Q 95 ^a
Korea (Republic of) . . .	22.5	625 (poor quality)	—	—	—	0.64
Pakistan	85.6	163 (total) ^a	8 (total) ^a	About 3 ^c	About 5,000 billion cu. ft.	3.8 at Q 95 ^a
Philippines	24	63 (scattered over several islands)	—	—	—	2.25
Thailand	21.5	—	14 (proved) 35 (total) ^a	Poor	—	Appreciable
Viet-Nam (Republic of) . .	12.8	3	—	—	—	1.5

^{*} Total reserves include proved and probable reserves.

^{**} "Proved" reserves at the end of 1959, according to figures given by the Bureau of Petroleum Information, New Delhi. The total (proved and probable) reserves of China are believed to be much greater. See S. Adler, *The Chinese Economy* (London, Routledge and Kegan Paul, 1959), pp. 5-6.

^{***} Utilizable hydropotential at 60 per cent load factor. See M. Hayath and K. L. Vij, "Assessment of India's hydroelectric resources" in *Power Engineer*, (Simla), vol. 5, No. 7.

OTHER SOURCES: The population figure for India is a provisional estimate according to the census of March, 1961. The other population figures are quoted from

Statistical Yearbook 1959 (2). The figures for energy resources are quoted from *International Atomic Energy Bulletin*, 1959 and 1960 (Vienna), except where specified otherwise by the following references:

^a *Statistical Year-Book of the World Power Conference*, No. 9 (London, 1960);

^b *Mineral Resources Development Series*, No. 10 (United Nations publication, Sales No.: 59.11.F.3);

^c United Kingdom, Central Office of Information, *Economic Development in the Commonwealth* (London, 1960);

^d Teng Tsai-Shou, "Water and Power Resources in China", in *Power Engineer* (Simla), vol. 5, No. 7.

solar energy and wind power have largely taken place in the highly developed nations. They have already gathered some expertise which they could immediately make available to their less fortunate sister nations. Many among the new nations which are fast developing have scientists and engineers who could join in the endeavour and develop new techniques and new applications suitable to local conditions and requirements.

I might refer here to a paper which Dr. E. W. Golding and myself presented at the UNESCO Symposium on Wind and Solar Energy held in New Delhi in 1954. (28) In this paper, the various basic energy needs of a small rural community in a tropical environment were assessed and a scheme was suggested for meeting these needs by the integrated use of solar energy, wind power and energy from vegetable waste.

Some of the emergent countries in Africa, Asia and Latin America are already experiencing difficulties in regard to their energy supplies. Their programmes of rapid industrialization, coupled with the growth of population, are making increasing demands on their resources. The energy situation in some of the Asian countries is given in tables 9 and 10. The per capita energy consumption of 210 kilogrammes coal equivalent for Asia stands no comparison with the West European average of 2,389 kilogrammes and the United States average of 7,640 kilogrammes. A few of the countries have ample reserves of one or more forms of energy resource. China and Indonesia, for instance, have good reserves of fossil fuels as well as hydroelectric potential. Iran and

Iraq have vast deposits of petroleum. Most of the other countries have some unharnessed hydroelectric potential but their fossil fuel resources are inadequate for economic development in the long run. Japan, the most industrialized nation in Asia, has to import increasing quantities of fuel. India has large coal reserves, although not all of superior grade, and considerable hydroelectric potential, but not much oil. India, fortunately, has ample supplies of nuclear minerals. The fuel resources in most of these countries are being exploited to an increasing extent. These efforts need to be supplemented.

In India, a preliminary survey of wind velocities has been carried out, and suitable regions favourable for utilization of wind power have been located. It is proposed shortly to install 200 windmills at selected localities on an experimental basis. These mills will be made according to a design developed in India and will be used essentially for pumping water. Investigations are also being carried out for the development of a suitable design for small-scale electricity generation. There is also a project in view for the utilization of solar energy for the purpose of dehumidification of factories.

Many of the under-developed countries were once flourishing centres of civilization when some of the present highly developed nations were far behind. The occurrence of fossil fuel supplies made it possible for these latter countries to develop and forge ahead of the old civilizations which, for various reasons, became static. It would be wrong in the context of developments in science and technology to think in terms of individual nations. Statesmen, economic planners and scientists should deal with problems of the world on the basis of the human race as one entity. Economic aid and technical assistance to under-developed countries should not be conceived and undertaken in a spirit of competition amongst the developed states or as a part of their defence strategy or even as a technique to influence the market for their products. A master plan, boldly conceived, should be prepared with purely altruistic considerations. The developmental programmes in the under-developed nations should be approached by the relatively more advanced States not with a sense of superiority or patronage, but in a spirit of partnership in the noble enterprise of advancement of the human community as a whole. If the scientists, technologists and engineers gathered here to review and explore new sources of energy approach their discussions in this spirit of joint endeavour and add their mite in the preparation of such a master plan, they will have made a unique contribution towards international co-operation and understanding. Scientists, with their discipline in objective inquiry, are best placed to think and act on these lines. It is through their efforts that the people of the world hope for a fuller and richer life.

Table 10

Annual per capita energy consumption in selected Asian countries

(Data refer to 1958, except in a few cases where they are given for 1957 or 1959)

	Total energy in kilograms of coal equivalent ^a	Electricity in kwh ^b
Afghanistan	8	6
Burma	48	16.7
Ceylon	88	25
China (Peoples' Republic) .	326	41.1 ^a
India	137	38.6 ^a
Indonesia	116	12.1
Iran	202	35
Iraq	289	100
Japan	869	840
Korea (Republic of) . . .	195	69
Pakistan	60	11.1 ^a
Philippines	144	72
Thailand	56	17.8
Viet-Nam	56	24

SOURCES:

^a Statistical Yearbook 1959 (2);

^b International Atomic Energy Bulletin, 1959 and 1960 (Vienna), with three exceptions as indicated.

[Note. A list of bibliographical references appears on pages 143-144, after the French translation of this paper.]

LES SOURCES NOUVELLES D'ÉNERGIE DANS LE CADRE DU DÉVELOPPEMENT ÉNERGÉTIQUE

(Traduction du mémoire précédent)

M. S. Thacker, Professeur

Directeur général, Council of Scientific & Industrial Research

New Delhi

LA CONQUÊTE DU BIEN-ÊTRE MATÉRIEL

Les doctrines économiques classiques postulent implicitement que ceux qui peuvent aspirer à posséder en abondance les bonnes choses de la vie, sont fort peu nombreux. Ce postulat a cessé d'être valide. Les réalisations scientifiques et technologiques de ces quelques dernières décennies permettent à tous les peuples du monde de vouloir s'acheminer vers une ère nouvelle de prospérité matérielle. Le grand réveil politique qui se fait jour dans les régions peu développées du globe impose la satisfaction du désir qu'ont leurs habitants de connaître de meilleures conditions de vie. Un judicieux emploi des ressources matérielles du globe, complété par la mise en œuvre des nouvelles technologies, permettra de garantir l'établissement de niveaux de bien-être physique satisfaisants pour tout le monde.

TENDANCES DE LA POPULATION MONDIALE

Une caractéristique importante de la situation mondiale actuelle, qui mérite de retenir toute notre attention, réside dans l'accroissement rapide de la population du globe. Entre 1850 et 1900, le nombre d'habitants de notre planète augmentait au rythme de 0,7 p. 100 par an environ. Au cours du demi-siècle suivant, ce taux de croissance s'établissait à 0,9 p. 100 environ (1). Entre 1950 et 1958, la population mondiale passait de 2 493 à 2 852 millions d'habitants, soit une augmentation annuelle de 1,7 p. 100 (2). Si on admet ce taux de croissance, on peut établir une tendance telle que celle qui ressort du tableau 1.

Il y a lieu de croire que le rythme de cet accroissement peut encore augmenter. Le taux annuel de la mortalité, qui s'établit à 20 ou 30 p. 1 000 pour les régions peu développées — lesquelles représentent plus des deux tiers du globe — pourrait être réduit

de façon appréciable par une judicieuse application des dernières acquisitions faites dans les domaines de la médecine et de l'hygiène publique. Il est donc possible que les prévisions du tableau 1 soient sensiblement dépassées, à moins que le taux de natalité, lui aussi ne vienne à baisser¹. Cette natalité est habituellement forte dans les pays peu développés, lesquels ont en même temps davantage besoin de développement économique que tous les autres.

LE SECRET DU PROGRÈS MATÉRIEL : L'ÉNERGIE

Si tous les habitants du globe doivent connaître des niveaux de vie comparables à ceux dont bénéficient actuellement les nations dites avancées, il faudra que la production des biens et des services soit multipliée par un facteur important. La connaissance des lois naturelles, avec la technologie qui en découle, ont conditionné la possibilité, pour l'homme, d'agir à son gré sur le milieu qui l'entoure et d'améliorer son bien-être matériel. Les connaissances humaines et, avec elles, la science et la technologie, continuent à se développer rapidement. Les limitations applicables aux ressources en matières premières et en énergie sont surmontées par l'application de ces nouvelles connaissances. La prodigalité avec laquelle l'humanité épuise les sources de matières premières dont elle dispose pourra provoquer de graves insuffisances, dont certaines seront éventuellement compensées par la découverte de nouvelles réserves. La fabrication de succédanés et la mise en œuvre de certaines ressources moins riches constitueront des palliatifs mais elles s'accompagneront de nouvelles exigences en fait d'énergie.

¹ C'est ainsi, par exemple, que si on pose l'hypothèse d'un taux d'accroissement de 2 p. 100 par an à partir de 1970, le monde comptera 4 255 millions d'habitants en 1980, 5 187 millions en 1990 et 6 323 millions en l'an 2000.

Tableau 1

Années	1961	1970	1980	1990	2000
Nombre d'habitants (en millions)	3 000	3 491	4 132	4 891	5 789

DÉVELOPPEMENT DE LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE

Jusqu'à une date relativement récente, l'homme s'en remettait, pour la force motrice dont il avait besoin, à son propre travail et à celui des animaux domestiques. Deux nouvelles sources d'énergie firent leur apparition avec la mise en œuvre de l'énergie du vent et de celle de l'eau courante. Le moulin à eau, probablement inventé au début de l'ère chrétienne, a commencé à recevoir nombre d'applications en Europe avec le déclin de l'esclavage observé au moyen-âge. On ne s'en servait pas seulement pour moudre le blé, mais bien aussi pour pomper de l'eau, broyer les minerais, participer à l'extraction et au travail des métaux, scier du bois et exécuter nombre d'autres tâches.

Le moulin à vent trouva ses premières applications au Moyen-Orient, en Inde et en Chine. Il pénétra probablement en Europe dans le sillage de l'Islam et reçut bientôt nombre d'applications, servant tout d'abord à moudre le blé et à pomper l'eau, puis intervenant par la suite dans plusieurs procédés industriels. Le moulin à vent et le moulin à eau ont beaucoup relevé le niveau de la production.

Tableau 2

Puissance débitée par diverses sources de force motrice
Horse-power

Homme	de 0,04 à 0,08
Cheval	de 0,4 à 0,6
Moulins à eau	5 en moyenne, rarement plus de 10
Moulins à vent	de 2 à 15

SOURCE. — *A History of Technology* (Oxford University Press), vol. 4, chap. 5.

Le progrès important suivant fut réalisé au XVIII^e siècle, par la mise au point du moteur à vapeur, lequel amena la force motrice à pied d'œuvre et marqua le début de la révolution industrielle. A la fin de ce même siècle, on utilisait des machines à vapeur perfectionnées dans les mines, les installations métallurgiques, les fabriques de produits textiles et les brasseries. Avec la première moitié du XIX^e siècle la machine à vapeur avait fait ses preuves comme source de force motrice supérieure aux autres et plus puissante qu'elles. Les machines de 100 HP ou davantage se multiplièrent. La machine à vapeur fut adaptée aux besoins des transports maritimes et terrestres.

La découverte de l'induction électromagnétique par Faraday, en 1831, venait alors jeter les bases de la gigantesque industrie électrique que nous connaissons de nos jours. La turbine à eau permettait ensuite la production d'électricité au moyen de la houille blanche.

Le XIX^e siècle apportait également deux autres sources de force motrice : le moteur à combustion interne et la turbine à vapeur. Le XX^e siècle nous a donné la turbine à gaz.

SOURCES ACTUELLES DE FORCE MOTRICE
ET DISPONIBILITÉS ÉNERGÉTIQUES

Toutes nos réserves immédiates d'énergie, qu'elles soient actuellement en existence ou en puissance, découlent de trois sources primitives d'énergie : le soleil, la terre et le noyau atomique. Ces dernières sont toutes inépuisables et capables de faire face à tous les besoins de l'humanité qu'il nous soit possible de prévoir, mais il reste à mettre au point des techniques satisfaisantes pour leur mise en œuvre. Les manifestations des diverses formes d'énergie se voient aux figures 1a et 1b, avec quelques indications sur leurs applications actuelles ou à venir comme sources d'énergie.²

Les bois et les déchets des exploitations agricoles étaient encore les seuls combustibles dont on disposait aux premiers siècles de l'ère chrétienne, époque à laquelle commença l'utilisation du charbon. On ne dispose pas de statistiques exactes sur l'emploi des déchets fermiers comme combustibles, mais Putnam a calculé que leur apport représentait de 10 à 20 p. 100 de l'énergie totale du monde en 1950 (4), et que 380 millions de tonnes (mesurées en équivalents-charbon)³ étaient le maximum annuel à attendre de cette source (5). On pourrait produire du méthane à partir des déchets agricoles sans porter préjudice à leur valeur en tant qu'engrais. On s'efforce dans nombre de pays, de construire de petites

³ Pour faciliter les comparaisons, les quantités de tous les combustibles, quels qu'ils soient, sont exprimées en tonnes métriques d'équivalents-charbon sur la base de la chaleur obtenue quand on les brûle dans une bombe calorimétrique.

tricité fit apparaître de nouvelles demandes de charbon. La production mondiale de houille passa de 100 millions de tonnes, en 1850, à 1 000 millions de tonnes à la fin du siècle (6).

La tourbe est une forme primitive de la houille mais elle est en formation constante et peut être considérée comme source renouvelable d'énergie. Telle qu'on la trouve dans les tourbières, elle s'accompagne de 90 à 95 p. 100 d'eau dont l'élimination est difficile. La production actuelle de tourbe, particulièrement en URSS, en Irlande et en Allemagne est négligeable, mais, d'après Putnam, les tourbières pourraient être mises en œuvre de manière à produire de façon soutenue et à fournir environ 500 millions de tonnes d'équivalents-charbon annuellement (5).

Les ressources mondiales en combustibles augmentèrent au cours de la deuxième moitié du siècle dernier avec la mise en œuvre du pétrole sur une grande échelle. Depuis le fonçage du premier puits en Pennsylvanie (États-Unis), en 1859, on en découvrit dans nombre de pays et la production augmenta progressivement. Jusqu'à la fin du XIX^e siècle, la demande portait essentiellement sur le pétrole, les lubrifiants et le mazout : l'essence était gâchée. Son utilisation devait attendre la mise au point du moteur à combustion interne et l'utilisation généralisée de ce dernier par les automobiles et les avions du XX^e siècle. Aujourd'hui, l'industrie du pétrole a pris des proportions gigantesques et produit plusieurs combustibles destinés à diverses fins, ainsi qu'une ample variété de composés chimiques. La production mondiale de pétrole est passée de 20 millions de tonnes en 1900, à 500 millions de tonnes en 1950 et atteint actuellement environ 1 000 millions de tonnes.

Un autre combustible de plus en plus généralement exploité au cours de ces dernières années est le gaz naturel (7) qui accompagne le plus souvent le pétrole. Pris ensemble, les combustibles fossiles : charbon, pétrole et gaz naturel, couvrent la majeure partie de la consommation actuelle d'énergie du globe. Ils ont été formés, en des temps extrêmement reculés, par des processus naturels durant des millions d'années. Ce sont des ressources qui se consomment car, une fois que les réserves existantes auront été totalement utilisées, ces combustibles auront disparu à tout jamais.

En 1958, l'apport de la houille blanche a été équivalent, mesuré en énergie, à 75 millions de tonnes de charbon, pour une consommation mondiale de 3 699 millions de tonnes d'équivalents-charbon⁴. Les réserves mondiales de houille blanche aménagée et non aménagée sont de l'ordre du milliard de kilowatts (8) mais nombre de sources à mettre en œuvre se trouvent en des lieux inaccessibles, loin des grands centres de consommation et ne peuvent

⁴ La production de gaz naturel, en millions de tonnes d'équivalents-charbon, a été de 76 en 1929; 104 en 1937; 225 en 1949; 365 en 1954; et 504 en 1958. Le total ne comporte que la houille, le pétrole, le gaz naturel et la houille blanche. En raison du manque de données dignes de confiance, on ne mentionne ni le bois ni les déchets des exploitations agricoles (7).

Tableau 3

Apport d'énergie en provenance des sources renouvelables
(en millions de tonnes d'équivalents-charbon)

Sources	Années	
	1960	2000
Déchets fermiers	684 ^a	380
Bois	150 ^a	500
Tourbe	13,3 ^a	500
Houille blanche	92,75 ^b	328,5
TOTAL, en provenance des sources renouvelables	940	1 708,5
TOTAL, en provenance de toutes les sources (évaluation grossière)	5 000	20 000
Apport des sources renouvelables (en pourcentage du total)	18,8	8,5

^a Évaluation de Putnam (*op. cit.*, p. 172 et 173) pour 1950. Les valeurs actuelles ne sont probablement guère différentes.

^b Débit annuel de la capacité actuellement aménagée de 121 millions de kilowatts avec un facteur de charge de 70 p. 100.

pas être facilement aménagées ou exploitées d'une manière économique. La capacité, actuellement aménagée dans le monde, est de 121 millions de kilowatts (9). Bien que l'on puisse s'attendre à la mise en service de nombre de centrales hydrauliques au cours des quelques prochaines décennies, il est peu probable que la puissance installée totale dépasse 300 millions de kilowatts d'ici la fin du siècle actuel. A cette date, la consommation totale d'énergie aura tellement augmenté que la houille blanche ne représentera plus qu'une petite fraction du total⁵.

Les déchets fermiers, le bois, la tourbe et la houille blanche sont des ressources énergétiques renouvelables mais limitées. Le tableau 3 indique la fraction annuelle évaluée de la part de la consommation totale du globe qu'ils représentent et les quantités maxima qui peuvent raisonnablement être attendues de ces sources à la fin du siècle.

Le charbon (y compris toutes les qualités de charbon et de lignite), le pétrole et le gaz naturel sont les combustibles fossiles non renouvelables que l'on exploite actuellement⁶. Au surplus, on trouve, dans certaines régions du monde, des dépôts de chistes bitumineux et de sables goudronneux qui contiennent des hydrocarbures que l'on pourrait extraire et utiliser comme combustibles⁷. On donne

⁵ Avec un facteur de charge de 100 p. 100, une telle puissance installée débiterait annuellement l'équivalent énergétique de 328,5 millions de tonnes de charbon. En l'an 2000, la consommation mondiale d'énergie dépassera probablement l'équivalent énergétique de 20 milliards de tonnes de charbon par an.

⁶ La tourbe est considérée actuellement comme combustible fossile mais, avec Putnam, nous la traitons dans le présent mémoire comme source d'énergie renouvelable.

⁷ Le Bureau des mines des États-Unis a démontré qu'on peut extraire du pétrole des schistes bitumineux sans que les frais soient exorbitants. Toutes les tentatives faites pour récupérer le combustible des sables goudronneux, en revanche, ont échoué.

Tableau 4

Ressources mondiales en combustibles fossiles

	Milliards de tonnes d'équivalents- charbon
Charbon	4 400
Pétrole	150
Gaz naturel et méthane que contiennent les mines de charbon	135
Schistes bitumineux	45
TOTAL	4 730

SOURCE. — Albert Parker, "The fuel and power industries and national prosperity" (Industries des combustibles et de l'énergie et prospérité nationale), *Journal of the Royal Society of Arts*, April 1960 (Londres), p. 316-353.

au tableau 4 un résumé de la liste des ressources mondiales en combustibles fossiles.

COMBIEN NOUS FAUT-IL D'ÉNERGIE?

Après cette courte revue des sources d'énergie disponible on aboutit à la question : « Combien nous faut-il d'énergie? » La corrélation générale entre le revenu par habitant et la consommation d'énergie est bien connue et illustrée au tableau 5, avec des données applicables à quelques pays spécialement choisis, pour l'année 1956.

La grande majorité des pays peu développés d'Asie, d'Afrique et d'Amérique latine ont une très faible consommation d'énergie par habitant. Leur mise en œuvre comportera nécessairement une très grosse augmentation de la demande d'énergie mais ce n'est pas chose facile que de juger de l'objectif à viser comme consommation d'énergie. Sans entrer dans une analyse détaillée, on peut admettre que la moyenne, pour l'Europe occidentale — soit environ 2,5 tonnes par habitant — représente le minimum indispensable au maintien d'un niveau de vie suffisant⁸.

Tableau 5

Pays	Revenu annuel par habitant en livres sterling	Consommation d'éner- gie par habitant, en tonnes d'équivalents- charbon par an ^a
États-Unis	730	8,6
Royaume-Uni	320	5,0
Allemagne (République fédérale)	226	3,6
Pays-Bas	218	2,5
Italie	136	1,1
Japon	82	1,1
Inde	18	0,1

SOURCE. — Voir le tableau 4.

^a L'énergie en provenance de sources non commerciales : bois, tourbe, fiente, etc., n'est pas comprise et peut se monter à une valeur de 0,2 à 0,3 tonne d'équivalents-charbon pour certains pays.

⁸ La consommation d'énergie pour l'Europe occidentale prise dans son ensemble en 1958, ainsi que pour un certain nombre de pays pris individuellement, s'établissait aux alentours de ce chiffre : Europe occidentale, 2,4; Danemark, 2,5; France, 2,4; Pays-Bas, 2,4; Norvège, 2,4; Suède, 3,0; URSS 2,9; et Pologne, 2,8 (7).

En 1958, cinq pays dont la population totale représentait moins du cinquième du total mondial, avaient consommé les deux tiers de l'énergie totale absorbée, ne laissant ainsi qu'un tiers aux quatre autres cinquièmes (tableau 6).

Si la consommation d'énergie moyenne par habitant pour le monde — moins les cinq pays mentionnés plus haut — pouvait être portée immédiatement de 0,53 à 2,5 tonnes, la moyenne mondiale passerait de sa valeur actuelle de 1,3 tonne d'équivalents-charbon par an à 2,9 tonnes, et la demande énergétique annuelle du globe atteindrait 8 267 millions de tonnes. Il est évident qu'une augmentation d'un tel ordre ne peut se développer que sur une période de temps appréciable. Entre temps, la demande d'énergie des principaux pays consommateurs augmentera également de façon sensible. On peut admettre que la demande mondiale d'énergie par habitant, pour le monde pris dans son ensemble, passera à environ 4 tonnes d'équivalents-charbon par an vers la fin du siècle actuel. Avec une population de 5 milliards d'habitants au moins, la consommation mondiale d'énergie atteindra alors le chiffre colossal de 20 milliards de tonnes d'équivalents-charbon par an. Pour énorme que ce chiffre puisse paraître, il pourra être réalisé si le taux d'accroissement actuel de la consommation d'énergie —

Tableau 6

	Consommation d'éner- gie en millions de tonnes d'équivalents- charbon ^a	Nombre d'habitants, en millions ^b
Monde	3 699	2 852
États-Unis	1 332	174,8
URSS	599	208,8
Royaume-Uni	245	51,9
Allemagne (République fédérale)	183	52,2
France	108	44,6
TOTAL, pour les cinq pays	2 467	532,3
Part du total mondial qui revient aux cinq pays	66,7 p. 100	18,7 p. 100
TOTAL, pour le reste du monde	1 232	2 319,7
Part du total mondial . .	39,3 p. 100	81,3 p. 100

Consommation moyenne d'éner-
gie par habitant, pour les cinq
pays spécifiés.

4,63 tonnes par an

Consommation moyenne d'éner-
gie par habitant pour le reste
du monde

0,53 tonne par an

SOURCES.

^a *World Energy Supplies, 1955-1958* [seulement en anglais] (7);

^b *Annuaire statistique 1959* (2).

soit 4 p. 100 par an environ — se maintient jusqu'à la fin du siècle.

Les réserves mondiales probables de houille sont évaluées à 4 400 milliards de tonnes (tableau 4) et doivent suffire pour 2 200 années d'exploitation au rythme actuel de la consommation, soit 2 milliards de tonnes par an. Même si la consommation devait monter à 10 fois ce chiffre actuel, il semblerait y avoir assez de charbon pour plus de deux siècles. Si on examine le problème de plus près, on voit que la situation réelle n'est pas aussi bonne. En premier lieu, il n'est pas possible d'amener à la surface tout le charbon que recèle le sous-sol. En second lieu, la production théoriquement possible de charbon utilisable est réduite par les pertes d'extraction inévitables. Les frais d'extraction augmenteront également avec le relèvement du niveau de vie, car la main-d'œuvre représente une grosse fraction du prix de revient des produits du sous-sol. Un autre élément qui vient compliquer la situation réside dans l'inégalité de la répartition des gisements de charbon (tableau 7). La presque totalité de la houille se trouve dans l'hémisphère septentrional. Trois pays, les États-Unis, la Chine et l'URSS, possèdent près des cinq sixièmes des réserves mondiales de houille. Les États-Unis en ont le tiers et les deux autres un quart chacun. Bien que ces pays doivent disposer d'une abondance de charbon pendant nombre de siècles, de graves insuffisances locales pourront se manifester dans le reste du monde au cours des quelques prochaines décennies.

À la fin de 1959, on évaluait les réserves mondiales démontrées de pétrole à environ 51 milliards de tonnes d'équivalents-charbon. La production mon-

Tableau 8

Répartition des réserves mondiales de pétrole ^a

	Pourcentage
Moyen-Orient	62
États-Unis	13
URSS	10
Amérique du Sud et Amérique centrale	7
Reste du monde	8

^a Calculé à partir de chiffres fournis par le Bureau des renseignements de l'industrie pétrolière, New Delhi.

diale de pétrole en 1958, s'établissait à 1 205 millions de tonnes d'équivalents-charbon ⁹. Compte tenu des nombreuses applications et de la commodité d'emploi des combustibles liquides, la demande de pétrole augmente et on peut s'attendre qu'elle s'accroisse annuellement de 10 p. 100 environ. À ce taux, les réserves démontrées seraient épuisées en 1975. Même si les réserves probables attendues de 150 milliards de tonnes sont mises en exploitation, elles pourraient être épuisées bien avant la fin du siècle. Comme les dépôts de charbon, les gisements de pétrole sont limités à certaines régions, principalement à l'hémisphère nord. L'accumulation du pétrole dans quelques régions seulement peut faire apparaître des disettes localisées bien avant l'épuisement final des réserves.

Les États-Unis sont actuellement à la fois le principal producteur et le plus gros consommateur de gaz naturel. Bien que les réserves totales de ce gaz naturel puissent, en fin de compte, être du même ordre que celles de pétrole, leur épuisement se produira probablement plus tôt. Il est douteux que les dépôts de schistes bitumineux et de sables goudronneux soient mis en exploitation dans un avenir immédiat, car ils sont essentiellement limités aux États-Unis, à l'URSS et au Canada, trois pays qui ont une abondance d'autres combustibles.

On peut maintenant résumer la situation en ce qui concerne les réserves de combustibles fossiles qui sont en voie d'épuisement. Le charbon est actuellement la principale source d'énergie et continuera à couvrir une grosse fraction des besoins du monde pendant nombre d'années à venir. Le pétrole et le gaz naturel peuvent se faire rares de par le monde entier avant la fin du siècle en cours. La plupart des pays souffrent d'un manque ou d'une insuffisance de ces combustibles. Les exigences énergétiques du globe, qui augmentent rapidement, exigent l'exploitation de nouvelles formes d'énergie. Dans certaines régions, elles peuvent jouer le rôle de nouvelles sources importantes et, dans d'autres, elles peuvent constituer de précieux appoints aux sources classiques. Dans les pays en développement, nombre de problèmes spéciaux se présentent et ils exigent l'exploitation de nouvelles sources d'énergie.

Tableau 7

Réserves mondiales de charbon et de lignite (en gigatonnes) ^a

	Charbons gras et anthracites		Houilles brunes et lignites	
	Probables	Démontrées	Probables	Démontrées
États-Unis	1 303	431	420	—
URSS	998	296	202	13
Chine	1 011	—	1	—
Allemagne occidentale	224	67	—	62
Royaume-Uni	171	128	—	—
Pologne	80	15	18	—
Canada	63	42	24	12
Afrique du Sud	68	37	—	—
Inde	62	4	—	0,5
Australie	17	6	41	7
Japon	10	5	0,3	0,1
Belgique	6	3	—	—
Pays-Bas	3	3	—	—
Italie	0,6	0,5	0,5	0,3
TOTAL DU MONDE	4 017	1 038	707	95

SOURCE. — Voir le tableau 4.

^a Les évaluations données ci-dessus doivent parfois être révisées, mais ceci n'aura pas de répercussions possibles sur la présente revue.

⁹ Calculé à partir de chiffres fournis par le Bureau des renseignements de l'industrie pétrolière, New Delhi.

PERFECTIONNEMENTS POSSIBLES DANS L'UTILISATION DE L'ÉNERGIE

Avant de passer en revue les nouvelles sources d'énergie, il sera peut-être utile d'examiner la manière dont les ressources classiques pourraient être utilisées d'une façon plus efficace.

La récente mise au point d'un groupe turbo-pompe réversible, capable de fonctionner avec une hauteur de chute ne dépassant pas 12 pieds (3,6 m) mènera peut-être à l'exploitation économique de nombre d'emplacements possibles d'usines hydro-électriques actuellement considérés comme inutilisables. Un plan polonais envisage la production d'un total de plus d'un million de kilowatts par neuf centrales à construire sur le cours inférieur de la Vistule, entre Varsovie et la mer (11).

Un moyen d'augmenter le rendement d'exploitation des centrales hydro-électriques consiste à faire usage de l'excédent de courant produit pendant les heures où la consommation n'est pas à son maximum pour pomper l'eau et la mettre en réserve afin de produire de l'électricité à fournir quand la demande est effectivement à son maximum.

Les travaux récemment menés dans plusieurs pays ont mis en lumière la possibilité de retarder l'évaporation de l'eau des réservoirs et des lacs en recouvrant leur surface de minces pellicules de substances telles que l'alcool cétylique. On a signalé également quelque succès dans le domaine de la production artificielle de pluie en certains lieux.

Pour tout moteur thermique, il existe une limite supérieure au rendement de la conversion de la chaleur en électricité ou en force motrice qui est imposée par des considérations thermodynamiques. Le rendement théorique maximum possible est de 40 à 45 p. 100 mais les rendements effectivement réalisés dans la pratique sont beaucoup plus faibles. On s'efforce de réduire la différence entre les rendements réels et possibles.

Une très forte proportion de l'énergie fournie à l'admission de la machine à vapeur (elle peut atteindre de 70 à 80 p. 100), se manifeste sous la forme d'une chaleur à basse température, qui est rejetée par le condenseur sous forme d'eau chaude. En se passant de ce condenseur et en faisant usage d'une turbine à contre-pression, on peut récupérer cette chaleur résiduelle et lui donner certaines applications.

Il y a longtemps que les technologistes rêvent de surmonter l'obstacle que constitue le cycle de Carnot et de réaliser la conversion directe de l'énergie chimique en électricité au moyen d'une cellule électrochimique convenable. On a mis diverses cellules de ce genre à l'essai et elles ont fourni de l'énergie électrique avec un rendement net allant de 50 à 80 p. 100 suivant la température, la pression, le combustible employé et quelques autres éléments. Le jour n'est peut-être pas loin où des automobiles utiliseront de semblables cellules. On a réalisé un tracteur à cellule combustible qui utilise des cellules à hydrogène-oxygène ou au propane-oxygène pour fournir 15 kilowatts d'électricité (12). Une cellule

d'une conception nouvelle et récemment annoncée fait usage, comme combustible, d'un amalgame comportant mercure, sodium, oxygène et eau. Le prototype débitera 75 kilowatts et sera environ 15 fois plus léger que les batteries standard actuellement en service (13).

La cellule à hydrogène-oxygène est réversible et peut s'employer comme accumulateur pour mettre de l'électricité en réserve. Les centrales ne sont actuellement utilisées à leur pleine capacité que pendant la moitié du temps disponible et l'excédent de capacité peut être utilisé à l'électrolyse de l'eau pour produire de l'hydrogène et de l'oxygène susceptibles d'être utilisés à fournir à leur tour de l'électricité quand il en faudra.

On a exécuté beaucoup de travaux, au cours de ces quelques dernières années, sur diverses autres méthodes de conversion directe de l'énergie, particulièrement pour subvenir aux besoins de force motrice des véhicules interplanétaires¹⁰. La réalisation de la cellule solaire au silicium est bien connue. Les possibilités d'emploi des méthodes thermo-ioniques, thermo-électriques et magnétohydrodynamiques (14) pour la conversion de la chaleur en électricité ont été démontrées expérimentalement mais aucune d'elles n'en est encore à se prêter à la production d'énergie à grande échelle.

Le transport économique de grosses quantités de force motrice à des centres d'utilisation éloignés s'effectue grâce à la transmission du courant électrique sous des tensions extrêmement élevées. Dans le cas du courant alternatif, il y a une limite pratique à la tension de ligne au-delà de laquelle la formation de gânes lumineuses autour des câbles aboutit à une perte d'énergie excessive et à la création de parasites qui nuisent au bon fonctionnement des systèmes de télécommunications avoisinants. L'autre solution est la transmission en courant continu, qui présente certains inconvénients, tout en offrant quelques précieux avantages. Plusieurs programmes de transmission en courant continu sont déjà en œuvre ou envisagés pour le proche avenir. L'URSS se propose de mettre la houille blanche sibérienne à la disposition de ses centres industriels européens et il se peut que l'électricité que produit la houille blanche d'Afrique soit transmise sous un million de volts (en courant continu) aux réseaux d'Europe occidentale (15).

Le faible facteur de charge avec lequel on exploite la majorité des centrales pose un sérieux problème. La fourniture du courant aux consommateurs en conformité avec un horaire échelonné et la répartition de la charge par les réseaux régionaux contribuent à l'amélioration de ce facteur de charge mais on en est encore à attendre des solutions témoignant d'une véritable imagination. Un pas récemment fait dans cette voie est constitué par la liaison entre les réseaux de distribution d'électricité de la Grande-Bretagne

¹⁰ Ces méthodes ont également leur importance en ce qui concerne l'exploitation de l'énergie solaire et de l'énergie nucléaire dans de bonnes conditions de rendement.

et de la France en courant continu par un câble qui traverse la Manche. S'il s'avérait possible de surmonter certains obstacles politiques et autres, les liaisons de ce genre pourraient se multiplier et aboutir, en fin de compte, à une intégration en un réseau colossal de super-réseaux reliés les uns aux autres et couvrant de vastes régions du globe.

La pompe à chaleur est un dispositif qui emprunte de l'énergie à son milieu pour la convertir en chaleur utilisable. L'eau (en provenance de puits, de lacs, de rivières ou de la mer) et l'excédent de chaleur des processus industriels sont des sources convenables d'énergie pour ces machines, mais le rayonnement du sol, celui de l'atmosphère ou celui du soleil peuvent également être mis en œuvre. Des centaines de pompes à chaleur fonctionnent actuellement aux États-Unis et en Grande-Bretagne où elles servent au chauffage de locaux, à la fourniture d'eau chaude et à celle de la chaleur qu'exigent divers procédés industriels. On peut utiliser des pompes à chaleur à double effet pour assurer le chauffage pendant l'hiver et la climatisation en été. Les pompes à chaleur sont d'une installation coûteuse mais, indépendamment des économies de combustible qu'elles autorisent, elles présentent l'avantage spécial de ne produire ni fumée ni odeurs désagréables. Leur utilisation est particulièrement avantageuse là où l'électricité coûte peu et où le combustible est cher. La chaleur fournie peut représenter un multiple entier de la quantité d'électricité consommée pendant la période de fonctionnement¹¹.

Le charbon étant le principal combustible du globe, sa conservation et son utilisation dans les meilleures conditions possibles de rendement doivent retenir l'attention. On a observé, au cours de ces quelques dernières années, une motorisation croissante des opérations minières et du transport du charbon, permettant l'exploitation de gisements considérés jadis comme inutilisables. En installant de grosses centrales électriques au carreau de la mine, on tire un bon parti des qualités inférieures de charbon, on économise les meilleures et, en même temps, on réduit la charge imposée aux réseaux de transport. On a réalisé des progrès dans le traitement des charbons pauvres par le lavage, le criblage et les mélanges. On a mis au point, pour les centrales électriques, un combustible constitué par le charbon pulvérisé. On a réalisé des perfectionnements dans le matériel industriel et ménager qui sert à la combustion dans le but d'augmenter le rendement et de réduire dans toute la mesure du possible la souillure de l'atmosphère. Finalement, la gaséification du charbon dans le sous-sol même viendra peut-être améliorer le taux d'utilisation des ressources mondiales de charbon tout en éliminant le besoin d'extraire cette houille des mines.

Les moyens de transport absorbent environ le quart de l'énergie que consomme le monde et toute

économie appréciable dans ce domaine présenterait une grosse valeur. Le rendement de la traction à vapeur est extrêmement faible et le remplacement des locomotives classiques par des machines diesel ou électriques assurerait une amélioration du service en même temps que des économies de combustible. Les chemins de fer des États-Unis utilisent maintenant presque exclusivement la traction diesel-électrique et les réseaux britanniques font l'objet d'une conversion progressive au diesel.

On pourrait réaliser des économies d'énergie appréciables par un planning à l'échelle nationale de l'implantation des centres industriels, en tenant compte des distances sur lesquelles il faut transporter les combustibles, les matières premières et les produits finis. On pourrait faire de même à l'échelle internationale, si on pouvait réaliser une ère de bonne volonté et de compréhension mutuelle entre les nations.

La motorisation et l'automatisation consomment beaucoup d'énergie. Elles se traduisent cependant par une augmentation de la production qui est plus que proportionnelle à cet appoint d'énergie et elles permettent donc de réduire la consommation spécifique de cette force motrice.

On peut donc réaliser plusieurs économies sur le plan de l'utilisation de l'énergie en faisant appel aux connaissances existantes et aux réalisations prévisibles. Les demandes croissantes d'énergie ne pourront toutefois pas être totalement satisfaites à moins que de nouvelles sources de force motrice, qui peuvent devenir d'importants fournisseurs de cette énergie ou constituer un bon appoint, ne soient mises en œuvre.

NOUVELLES SOURCES D'ÉNERGIE

Les nouvelles sources importantes sont les énergies nucléaire, marémotrice, océanothermique, géothermique et solaire, ainsi que celle du vent. On trouvera plusieurs excellentes revues sur l'une ou plusieurs de ces sources (17, 18, 19 et 20). On se bornera donc, dans ce mémoire, à signaler quelques-unes des réalisations récentes les plus significatives.

On dira brièvement un mot de l'énergie nucléaire, en passant. Bien qu'il soit possible de démontrer que la fission et la fusion atomique sont l'une et l'autre de bonnes sources d'énergie, ce n'est jusqu'à présent que de la fission qu'on a pu tirer de l'énergie utile. On trouvera plusieurs réacteurs de divers types en fonctionnement ou en construction en Grande-Bretagne, aux États-Unis, en URSS et dans d'autres pays.

Le prix de revient joue encore un rôle important dans la production de l'énergie nucléaire à des fins industrielles mais, tôt ou tard, elle pourra faire concurrence aux sources classiques. Alors que la plupart des formes d'énergie — sauf la houille blanche — vont en renchérissant, l'énergie nucléaire deviendra peu à peu plus économique. Sir John Cockcroft estime que le prix de revient de l'énergie

¹¹ L'installation de pompe à chaleur du Royal Festival Hall à Londres peut réaliser un débit de chaleur total de 2 700 kilowatts avec un moteur qui absorbe 525 kilowatts (16).

nucléaire, en Grande-Bretagne, sera comparable à celui du charbon aux alentours de 1970.

On estime que les ressources mondiales d'uranium et de thorium pourraient fournir 23 fois plus d'énergie que les réserves globales de combustibles fossiles (21). L'énergie que fournit la fission nucléaire est capable, en puissance, de faire face aux exigences mondiales pendant des milliers d'années. Entre temps, il est possible que la fusion en vienne à remplacer les autres procédés de génération d'énergie. Les physiciens étudient activement le comportement des plasmas chauds et, si les problèmes que soulève la physique de ces plasmas peuvent être résolus dans de bonnes conditions, l'énergie produite par la fusion peut devenir une réalité et faire face à tout jamais aux besoins de l'humanité. On s'attend également à ce que la physique des plasmas mène à de nouvelles méthodes de conversion de la chaleur en électricité.

La réalisation, la construction et l'exploitation des réacteurs nucléaires exigent des connaissances scientifiques et technologiques étendues. Il faut, en outre, que les centrales soient importantes, en raison de considérations technologiques et économiques. Pour tous ces motifs, cette source d'énergie restera au-delà de la portée de nombre de pays du monde pendant quelques années à venir et les besoins spéciaux de force motrice des vastes régions sous-développées devront être satisfaits par d'autres moyens.

Mais, si les sources classiques d'énergie suffisent à faire face aux besoins actuels et si on peut s'attendre à voir la fission et la fusion nucléaires résoudre un jour le problème mondial de l'énergie de surprenante façon, on peut bien se poser la question : « Quel est donc le problème ? » Quand il s'agit de la fourniture d'énergie du monde pris dans son ensemble, si on songe aux pays technologiquement bien développés, dont les besoins sont largement couverts, il devient difficile de plaider vigoureusement en faveur des ressources énergétiques telles que le soleil et la force du vent. En passant ce problème en revue, il faudra tenir compte des besoins des pays moins fortunés qui représentent plus des deux tiers du globe.

Généralement parlant, on peut distinguer deux et peut-être trois groupes de pays. Dans le premier, on trouvera les pays technologiquement développés tels que les États-Unis, l'URSS, le Royaume-Uni et quelques-uns des États d'Europe occidentale qui possèdent non seulement les connaissances technologiques mais aussi la main-d'œuvre et les fonds nécessaires pour construire d'énormes centrales au moyen desquelles d'abondantes quantités d'énergie peuvent être fournies à prix modique, et qui sont également capables d'investir de grosses sommes d'argent pour le transport du combustible. Les pays en développement rapide, tels que l'Inde et la Chine, constituent un groupe séparé, tandis que, dans le troisième, on trouve les amples étendues occupées par les États sous-développés d'Asie et d'Afrique.

Il est intéressant d'observer que la majorité des pays sous-développés se trouvent dans la zone tropicale, entre les trentièmes parallèles et que la

plupart des pays très développés se trouvent à l'extérieur de cette zone. Il est également à noter que nombre des pays technologiquement avancés doivent leur position actuelle à l'abondance de combustibles fossiles dont ils disposent. En dehors de l'Asie occidentale, les réserves de pétrole des pays sous-développés sont maigres. Leurs ressources en charbon ne sont pas importantes. Le transport du combustible soulève d'autres problèmes. L'énergie nucléaire peut apporter une solution à certains de ces pays. La mise en œuvre de l'énergie nucléaire impose toutefois de lourds investissements au départ et elle n'est économique que lorsque sa production est très intense et assurée par des centrales proches.

S'il est vrai que la majorité des gisements de combustibles fossiles se trouvent en dehors de la zone comprise entre les trentièmes parallèles, les emplacements les plus favorables pour l'utilisation de l'énergie éolienne et du rayonnement solaire sont situés à l'intérieur de cette zone. À surface égale, le soleil lui fournit, en moyenne, deux ou trois fois plus d'énergie qu'aux régions qui se trouvent en dehors d'elle. En quelques points de cette zone, plus de 2 000 kilowattheures d'énergie solaire sont reçus annuellement par mètre carré de surface. Cependant, une autre distinction importante, entre ces groupes de pays, est constituée par la manière inégale dont leur population se répartit. Les grosses centrales utilisant de l'énergie nucléaire ou thermique se prêtent bien aux besoins des grands centres urbains et industriels caractéristiques des pays développés, mais elles ne seront pas suffisantes pour faire face aux besoins spéciaux des communautés rurales dispersées dans les régions sous-développées. C'est pour ces dernières que l'énergie solaire et l'énergie éolienne viennent en tête des sources importantes.

Avant de poursuivre tout examen de l'énergie solaire et de l'énergie éolienne, on passera en revue les progrès réalisés dans les domaines d'utilisation des énergies marémotrice, océanothermique et géothermique. On a rédigé des études détaillées sur les aspects théoriques et techniques de l'énergie marémotrice ou houille bleue et dressé une liste des sites possibles des centrales, avec leurs caractéristiques (19). Les marées recèlent de grosses quantités d'énergie mais celle-ci se présente d'une manière intermittente et trop diffuse pour être facile à extraire. On exploite de petites centrales marémotrices depuis longtemps mais elles sont tombées en désuétude avec l'essor de la machine à vapeur. Seules les grandes usines marémotrices peuvent être économiques mais il n'y a, de par le monde, que quelques emplacements qui se prêtent à l'installation de semblables centrales.

Si toutefois on laisse de côté les plans à grande échelle, il semble que l'installation de petites centrales marémotrices de 1 à 10 kilowatts, sur les côtes des pays qui manquent de sources d'énergie, puisse présenter de l'intérêt. La force motrice qu'elles fournissent peut, le cas échéant, être envoyée à un réseau de distribution d'électricité ou utilisée de façon intermittente. On a proposé plusieurs projets, au cours des trois ou quatre dernières décennies,

visant à utiliser la houille bleue pour produire de l'électricité, mais un seul — le projet de la Rance — en est arrivé au stade du véritable développement. On s'attend actuellement à ce qu'il débite entre 250 et 600 millions de kilowattheures par an au lieu des 800 millions envisagés au début (22). Le caractère tout particulier du projet réside dans l'emploi de générateurs de vapeur de forme spéciale avec turbines réversibles. L'énergie est fournie par les deux mouvements des marées, tant par le flux, que par le jusant. Pour autant qu'il est question de la première centrale marémotrice, l'expérience acquise avec son exploitation présentera de la valeur pour le lancement d'autres plans.

On utilise l'énergie océanothermique ou énergie thermique des mers en exploitant les fortes différences de température qui se présentent souvent entre la surface des océans et leurs couches profondément situées. Une application simple de cette énergie serait constituée par l'établissement d'une liaison entre les masses d'eau chaude et une étendue avoisinante d'eau froide pour réchauffer un climat ou faire fondre les glaces. D'une manière analogue, on peut produire de l'énergie mécanique ou électrique en se servant de la vapeur que donne la source chaude pour faire tourner les aubes d'une turbine. A la suite de recherches théoriques et pratiques menées au cours de ces 30 dernières années, on a démontré que la production de force motrice à partir de l'énergie océanothermique est chose techniquement réalisable. Les conditions les plus favorables à l'implantation des centrales se rencontrent entre les isothermes de 25°, ce qui correspond, en gros, aux tropiques.

Bien qu'il n'existe pas encore, au sens propre du mot, de centrale commerciale productrice d'énergie océanothermique, on a mis au point un plan complet pour l'établissement d'une centrale terrestre à Abidjan, en Afrique occidentale. On a également mis sur pied des plans préliminaires de centrale flottante et d'île artificielle. Ces centrales pourraient être conçues, indépendamment de leur rôle dans la fourniture d'énergie, pour produire de l'eau douce et du sel. Au surplus, les vastes quantités d'eau de mer que peuvent traiter de semblables centrales faciliteront peut-être la récupération du plancton et du poisson. L'emploi d'énergie solaire, atomique ou géothermique, a été proposé pour relever la température de la source chaude qu'emploient les centrales océanothermiques (19).

La chaleur intérieure de la terre se manifeste en certains lieux (19, 20) sous forme de volcans ou de vapeurs qui jaillissent du sol. La vapeur peut être utilisée pour fournir la chaleur nécessaire au traitement de certains produits dans des usines ou au chauffage des locaux, ou encore pour la production d'électricité. La première centrale géothermique a été construite en Italie, au champ de Larderello (20). Au cours de ces trois dernières années, on a établi trois usines de plus. La centrale géothermique de Wairakei, en Nouvelle-Zélande, a commencé à fonctionner en novembre 1958 et elle aura une capa-

cité définitive de 250 000 kilowatts (23). L'URSS a installé une centrale géothermique dans le Kamtchatka, où la vapeur naturelle sert également à chauffer les maisons du voisinage (20). Une centrale géothermique américaine fonctionne maintenant à Big Sulphur Creek Canyon, Californie. Sa capacité actuelle est de 12 000 kilowatts (24).

Les installations géothermiques qui font usage de jets de vapeur naturelle en viendront à représenter, en fin de compte, un apport significatif, mais modique, aux ressources mondiales d'énergie. Il est possible toutefois, à la longue, qu'un appoint considérable vienne de la chaleur des roches qui constituent la croûte terrestre. On pourrait y pratiquer des trous profonds au moyen d'explosifs nucléaires. On ferait entrer de l'eau dans ces trous et elle ressortirait sous forme de vapeur.

La quantité de rayonnement solaire fournie à la surface des continents représente plusieurs milliers de fois nos besoins d'énergie. A la différence des combustibles fossiles et nucléaires, l'apport d'énergie solaire se renouvelle sans cesse, il est abondant et gratuit. Les défauts intrinsèques de l'énergie solaire résident dans sa faible intensité, le changement de sa direction et son caractère intermittent. En conséquence, son utilisation soulève de difficiles problèmes, sur lesquels se penchent les chercheurs de nombre de pays. La quantité d'énergie disponible est si grande que l'idée de mettre cette énergie solaire en œuvre pour fournir la force motrice à de grosses fractions de la population du globe est attrayante. On ferait un travail fructueux en ne négligeant aucun effort dans ce sens.

La récupération et la conversion de l'énergie solaire pour lui donner des formes commodément utilisables soulève nombre de problèmes. Ceci pourrait se réaliser, soit par une transformation thermique, soit par la conversion photonique. La conversion thermique s'effectue avec un bien faible rendement mais les techniques de la transformation photonique ne sont pas encore développées. On a fait beaucoup de travaux, dans nombre de pays, en vue de la mise en œuvre de l'énergie solaire comme source de chaleur. L'énergie ainsi récupérée pourrait être utilisée directement à diverses fins ou convertie en force motrice mécanique ou électrique par une machine thermique ou des dispositifs thermo-électriques ou thermo-ïoniques. Là encore, la conversion de la chaleur récupérée en énergie utilisable s'effectue avec un faible rendement. Nombre de groupes de chercheurs se penchent sur ces questions en divers centres de recherches et nombre d'applications de l'énergie solaire ont été mises au point et sont en vogue pour des fins telles que la cuisine, le chauffage de l'eau, la réfrigération, la distillation, la fusion des matériaux réfractaires et l'exploitation de petits moteurs. Ces applications sont prometteuses dans les régions où il n'y a pas d'autres formes d'énergie. Dans les petites communautés agricoles et les habitations situées loin des centres, le soleil représentera une source utile d'énergie pour l'agriculture et l'industrie à l'échelle de la chaumière ou, tout au moins,

à très petite échelle. Dans les régions tropicales humides, l'utilisation de l'énergie solaire aux fins de la déshumidification de l'air et de l'exploitation de systèmes de réfrigération à l'usine et à la maison ajoutera au confort des travailleurs et améliorera leur productivité. En se servant d'énergie solaire, on peut distiller l'eau dans les régions où elle est riche en sel, ou encore la purifier par la congélation. L'établissement de petites centrales utilisant l'énergie solaire représenterait un important palliatif aux difficultés qu'éprouvent de grandes régions des pays sous-développés.

Le moyen le plus simple de récupérer l'énergie solaire consiste à faire usage d'une boîte ou réservoir couvert de verre, qui laisse pénétrer les rayons du soleil mais s'oppose à ce que le rayonnement de l'intérieur s'échappe. Cette technique permet de réaliser des températures allant jusqu'à 150 °C et peut être utilisée au chauffage de l'eau ou à d'autres applications.

On peut obtenir des températures allant jusqu'à quelques milliers de degrés en concentrant les rayons du soleil sur des collecteurs appropriés. Le collecteur à plaque plate est faite de verre ou d'une composition plastique spéciale isolée du côté qui ne reçoit pas le soleil. La chaleur ainsi absorbée est transmise à une masse d'eau ou d'air. Le collecteur à concentration utilise des miroirs pour assurer cette concentration de rayonnement sur une petite étendue d'une surface foncée. On a récemment mis au point des surfaces sélectives spéciales à faible émissivité pour augmenter le rendement de cette récupération. Plusieurs matériaux nouveaux, tels que l'aluminium soumis au traitement anodique, les composés plastiques aux hydrocarbures fluorés et les composés plastiques revêtus d'aluminium sous vide sont venus réduire le prix des collecteurs. Ceux qui servent à la concentration doivent habituellement être pointés sur le soleil de façon continue pour réaliser un gros rendement. Certains collecteurs de modèle récent font usage de miroirs cylindriques à section parabolique, montés sur des axes est-ouest et n'ayant besoin d'être orientés vers le soleil que de temps à autre.

La pièce d'eau solaire est un type de collecteur d'un genre inédit, récemment mis au point en France et en Israël. Il s'agit d'une mare artificielle d'un ou deux mètres de profondeur, dont le fond est noirci, laquelle absorbe le rayonnement solaire et chauffe l'eau. Normalement, l'eau ainsi chauffée monterait à la surface en raison de la convection et la chaleur serait dissipée. On pallie à cet inconvénient en augmentant la densité de l'eau au fond du système en y dissolvant des sels et en gardant en surface une eau presque pure. On a réalisé des températures de 60 à 90 °C au fond de la mare avec cette technique. On s'attend à ce que les pièces d'eau solaires puissent être utilisées pour produire de l'énergie à un prix comparable à celui de la force motrice que fournissent les centrales thermiques. La possibilité de réaliser de grosses centrales utilisant l'énergie solaire reste cependant assez lointaine.

L'Égypte et l'Espagne se proposent de mettre en œuvre une nouvelle méthode d'utilisation de l'énergie solaire (11). Dans le cadre du plan égyptien, l'eau sera amenée de la Méditerranée par des pipelines, sur une distance de 69 kilomètres, à une dépression dont le fond est à 134 mètres au-dessous du niveau de la mer. A son passage, cette eau produira 600 000 kilowatts d'énergie dans une centrale et disparaîtra ensuite dans la dépression par le jeu de l'évaporation. L'installation fournira également des sels d'une certaine valeur et de l'eau pour l'irrigation, à titre de sous-produits. Le plan espagnol, pour l'ouest du Sahara, envisage la production de quelque 30 000 millions d'unités d'électricité par an, ainsi que de grandes quantités de sel, de chlore, de brome, de sodium et de magnésium.

On a mis au point, en URSS, des générateurs thermo-électriques d'un horsepower. Une autre réalisation soviétique est celle d'un réfrigérateur qui produit environ 363 kilogrammes de glace par jour. Les chercheurs soviétiques envisagent la construction d'une centrale solaire en Arménie pour laquelle des miroirs mobiles d'une surface de 2 hectares, concentrés sur un bouilleur solaire, produiront annuellement 25 millions de kilowattheures (25).

Les nouvelles acquisitions faites dans le domaine de la physique, particulièrement celui de la physique des solides, doivent jouer un rôle important dans l'utilisation de l'énergie solaire. Les processus photochimiques, s'ils sont réversibles, offriront peut-être une solution au problème que soulève l'accumulation ou la mise en réserve de l'énergie solaire. Les recherches menées sur le plan de la physique des semi-conducteurs ont donné lieu à la création de nombre de matériaux nouveaux qui promettent de réaliser de gros rendements de conversion de l'énergie solaire par des méthodes thermo-ioniques. La cellule au silicium est un dispositif permettant la conversion directe de l'énergie solaire en électricité. Le rendement de conversion des cellules solaires est actuellement de l'ordre de 15 p. 100 et le prix en a diminué de façon sensible, bien qu'elles soient encore trop chères pour toute application ordinaire. Ce prix élevé s'explique par la pureté qui doit être exigée des matériaux. La cellule au silicium est un dispositif photovoltaïque mais on a mis au point récemment, en France, une batterie solaire thermo-électrique (26).

Ces applications démontrent la multiplicité extraordinaire des emplois possibles de l'énergie solaire. Il faudra réaliser deux progrès importants avant qu'elle puisse commencer à faire un apport important à nos ressources énergétiques. L'une est une méthode d'accumulation satisfaisante et l'autre un moyen économique de sa conversion en électricité avec un bon rendement.

Comme l'énergie solaire, l'énergie éolienne se renouvelle, elle est inépuisable et enfin, gratuite. Bien que sa mise en œuvre ne présente aucun problème insurmontable, l'énergie éolienne offre un gros inconvénient : il est impossible d'en prévoir l'importance ou le comportement. Il est donc impossible de compter, avec elle, sur un apport continu

et sûr de force motrice. Des travaux de recherches sont en cours dans nombre de pays, sur les problèmes ayant trait à l'économie de l'énergie éolienne dans diverses applications, seule ou en combinaison avec d'autres sources de force motrice, particulièrement pour les régions inaccessibles, ainsi que sur la réalisation des génératrices électriques à moteur éolien et sur le rendement des divers modèles d'aéromoteurs.

Les génératrices entraînées par une éolienne ont été mises au point à la fin du XIX^e siècle et nombre

de types de ces machines, s'étendant sur une ample gamme de capacités, ont été réalisés depuis lors. Le plus gros aéromoteur construit jusqu'à présent est la machine Smith-Putnam, avec une puissance de 1 250 kilowatts qui opéra avec succès pendant quelque temps dans l'État du Vermont, aux États-Unis.

La majorité des génératrices à moteur éolien sont trop compliquées et anti-économiques. La compagnie R. Smith, Ltd. a mis au point un nouvel aéromoteur de 100 kilowatts qui est d'une conception simple (27).

Tableau 9

Population et ressources énergétiques de certains pays asiatiques spécialement choisis

	Population en 1958 (millions d'habitants)	Réserves en millions de tonnes métriques				Potentiel hydro-électrique (millions de kilowatts)
		Charbon	Lignite	Pétrole	Gaz naturel	
Afghanistan	13	80	—	Néant	Néant	2,5
Birmanie	20,3	Faibles	—	Environ 6 ^b	—	Considérable
Ceylan	9,4	Néant	Néant	Néant	Néant	1,5 au débit calculé par sa moyenne arithmétique ^a
Chine (République populaire)	669	1 011 000 ^a (Total *)	600 (total) ^a	102**	—	90 à Q 95 ^d
Inde	438	43 284 (démontrées) 124 974 (total) ^a	212,4 (démontrées) 2 077 (total) ^a	Environ 75 ^c	—	40***
Indonésie	87,3	Considérables	—	1 225**	—	Considérable
Iran	19,7	100	—	6 000	—	5
Irak	6,6	—	—	4 000	2 milliards de pieds cubes par an	0,3
Japon	91,8	5 699 (démontrées) 19 059 (total) ^a	237 (démontrées) 1 733 (total) ^a	Environ 4 ^a	—	13,4 à Q 95 ^a
Corée (République de) . .	22,5	625 de mauvaise qualité	—	—	—	0,64
Pakistan	85,6	163 (total) ^a	8 (total) ^a	Environ 3 ^c	Environ 5 000 milliards de pieds cubes	3,8 à Q 95 ^a
Philippines	24,0	63 (dispersées dans plusieurs des îles)	—	—	—	2,25
Thaïlande	21,5	—	14 (démontrées) 35 (total) ^a	Faibles	—	Appréciable
Viet-Nam (République du) .	12,8	3	—	—	—	1,5

* Les réserves totales comportent celles qui sont démontrées et celles qui sont probables.

** Réserves « démontrées » à la fin de 1959, d'après les chiffres donnés par le Bureau des renseignements sur le pétrole, New Delhi. Les réserves totales (démontrées et probables) de la Chine seraient beaucoup plus fortes; voir S. Adler, *The Chinese Economy* (Londres, Routledge and Kegan Paul, 1959), p. 5 et 6.

*** Potentiel hydro-électrique au facteur de charge de 60 p. 100. Voir M. Hyatt et K. L. Vij, « Assessment of India's hydroelectric resources » (Évaluation des ressources de l'Inde en houille blanche). *Power Engineer* (Simla), vol. 5, n° 7.

AUTRES SOURCES. — Le chiffre pour la population de l'Inde est une estimation provisoire, fondée sur le recensement de mars 1961. Les autres chiffres de population

sont tirés de l'*Annuaire statistique 1959* (2). Les chiffres des ressources énergétiques sont tirés du *Bulletin international de l'énergie atomique 1959 et 1960* (Vienne), sauf comme indiqué ci-dessous :

^a *Statistical Year-Book of the World Power Conference* (Londres, n° 9 (1960);

^b *Mineral Resources Development Series*, n° 10. (Publication des Nations Unies, n° de vente : 59.II.F.3) [en anglais seulement];

^c Royaume-Uni, Central Office of Information, *Economic Development in the Commonwealth* (Londres, 1960);

^d Teng Tsai-Shou, « Water and Power Resources in China » (Ressources hydrauliques et énergétiques de la Chine), *Power Engineer*, loc. cit.

Il est léger, robuste, d'un prix modique et produit de l'électricité à raison de trois millièmes de dollar par unité. Il se peut que la machine Smith ouvre un nouveau chapitre dans l'histoire des éoliennes. On croit savoir que le centre de recherches d'Istra travaille à un réseau de douze aéromoteurs fonctionnant en parallèle, renforcés par une centrale diesel, destinés à fournir de l'électricité à une communauté difficilement accessible. Le courant, transformé en alternatif, peut servir à faire fonctionner des machines, à élever de l'eau et à moudre du grain.

Un plan soviétique prévoit la construction de plusieurs milliers d'éoliennes dans les steppes, pour assurer la fourniture certaine de l'eau au bétail, chaque machine débitant assez d'eau pour mille têtes de moutons. Le plan septennal prévoit l'installation de 65 000 groupes de pompage à énergie éolienne.

L'énergie éolienne trouvera ses applications dans des situations spéciales, où les sources ordinaires d'énergie ne sont pas disponibles. Il existe un grand nombre d'emplacements de par le monde entier, qui se prêtent au développement de l'énergie éolienne. Ceci constituera un appoint utile à nos ressources énergétiques, sans probablement jamais arriver à représenter une importante fraction de celles-ci. C'est une source d'énergie qui est bien adaptée aux programmes de mise en œuvre des communautés rurales dans les pays sous-développés d'Asie, d'Afrique et d'ailleurs. Il faudra un travail systématique, organisé sur une grande échelle dans les régions en cause, pour réaliser de tels objectifs.

On a donné une description d'ensemble de l'orientation des recherches scientifiques et des travaux pratiques en vue de la mise au point de réalisations permettant une plus ample application de l'énergie solaire et des aéromoteurs. On relève des signes encourageants qui donnent à penser que les techniques en question et les dispositifs actionnés par le soleil et le vent pourront bientôt être mis à la disposition de l'humanité pour certaines applications spéciales. On soutient, dans le présent mémoire, le point de vue suivant lequel ces deux formes d'énergie promettent beaucoup, plus particulièrement pour la mise en œuvre des pays peu développés ou sous-développés. Jusqu'à présent, beaucoup des recherches et des applications ayant trait aux énergies solaire et éolienne ont été faites dans les pays déjà très développés. Ces derniers se sont acquis une certaine maîtrise qui pourrait être mise immédiatement à la disposition des nations sœurs moins fortunées. Nombreuses, parmi les nouvelles nations en voie de développement rapide, sont celles dont les chercheurs et les ingénieurs pourraient se joindre à l'effort d'ensemble pour mettre au point de nouvelles techniques et de nouvelles applications bien adaptées aux conditions et aux besoins locaux.

Qu'il me soit permis de faire allusion ici à un mémoire que nous avons présenté, le Dr. E. W. Golding et moi, au colloque de l'UNESCO sur l'énergie éolienne et solaire, tenu à New Delhi en 1954 (28). On y évaluait les besoins énergétiques essentiels

d'une petite communauté rurale en milieu tropical et on proposait un plan conçu pour faire face à ces besoins par l'utilisation intégrée de l'énergie solaire, de celle du vent et de l'énergie fournie par les déchets végétaux.

Certains des nouveaux pays d'Asie, d'Afrique et d'Amérique latine éprouvent déjà quelques difficultés en ce qui concerne leur fourniture d'énergie. Leurs programmes d'industrialisation rapide, accompagnés d'un accroissement de la population, soumettent leurs ressources à des exigences de plus en plus fortes. Le bilan énergétique, dans certains des pays asiatiques, est donné aux tableaux 9 et 10. La consommation d'énergie, qui est de 210 kilogrammes d'équivalents-charbon par habitant pour l'Asie, ne peut pas soutenir la comparaison avec la moyenne d'Europe occidentale, qui est de 2 389 kilogrammes et celle de 7 640 kilogrammes qui correspond à celle États-Unis. Quelques-uns des pays en cause ont d'amples réserves d'une ou plusieurs formes de ressources énergétiques. La Chine et l'Indonésie, par exemple, ont de bonnes réserves de combustibles fossiles, ainsi que de houille blanche. L'Iran et l'Irak ont de vastes gisements de pétrole. La plupart des autres pays ont un certain potentiel hydro-électrique qui n'est pas aménagé mais leurs ressources en combustibles fossiles sont insuffisantes à leur développement économique à long terme. Le Japon, nation la plus industrialisée d'Asie, doit importer des quantités croissantes de combustible. L'Inde possède de grosses réserves de charbon, bien qu'elles ne soient pas toutes d'une qualité supérieure, mais peu de pétrole. Fort heureusement, elle a d'amples ressources de minéraux nucléaires. Les ressources

Tableau 10

Consommation annuelle d'énergie par habitant dans certains pays asiatiques spécialement choisis

(Les données portent sur l'année 1958, à part quelques cas spéciaux pour lesquelles on les soumet pour 1957 ou 1959)

	<i>Énergie totale (kg d'équivalents- charbon) ^a</i>	<i>Électricité (kilowattheures) ^b</i>
Afghanistan	8	6
Birmanie	48	16,7
Ceylan	88	25
Chine (République populaire)	326	41,1 ^a
Inde	137	38,6 ^a
Indonésie	116	12,1
Iran	202	35
Irak	289	100
Japon	869	840
Corée (République de) . .	195	69
Pakistan	60	11,1 ^a
Philippines	144	72
Thaïlande	56	17,8
Viet Nam	56	24

SOURCES :

^a *Annuaire statistique 1959* (2);

^b *Bulletin international de l'énergie atomique* (Vienne), 1959, sauf les 3 exceptions indiquées.

en combustible, dans la plupart de ces pays, font l'objet d'une exploitation de plus en plus intense. Il faut compléter ces efforts.

En Inde, on a procédé à une étude préliminaire des vitesses du vent et on a déterminé les régions qui se prêtent à l'utilisation de l'énergie éolienne. On se propose d'installer avant peu 200 moulins à vent en des emplacements expérimentalement choisis. Ils seront construits en conformité avec une technique mise au point en Inde, qui sert essentiellement au pompage de l'eau. On procède également à des recherches visant à la mise au point d'un modèle de dispositif approprié pour la production d'électricité à petite échelle. On envisage également l'utilisation de l'énergie solaire pour le conditionnement de l'air (par assèchement) des usines.

Nombre des pays sous-développés furent jadis des centres de civilisation florissants à une époque où certaines des nations très développées d'aujourd'hui étaient fort en retard. La répartition des combustibles fossiles a permis à ces dernières de prendre les devants sur les anciennes civilisations devenues statiques pour diverses raisons. Il serait erroné, dans le contexte des réalisations actuelles de la science et de la technologie, de considérer les nations isolément. Les hommes d'état, les spécialistes du planning économique et les savants doivent s'inté-

resser aux problèmes mondiaux en voyant, dans la race humaine, une seule et même entité aux multiples aspects. L'aide économique et l'appui technique aux pays sous-développés ne doit pas être envisagée et entreprise dans un esprit de concurrence entre les États développés ou dans le cadre d'une stratégie d'ensemble de la défense nationale, voire même comme technique visant à agir sur les marchés que trouvent leurs produits. Il faut préparer un maître plan conçu avec audace, dans un esprit entièrement altruiste. Les programmes de mise en œuvre des pays sous-développés doivent être abordés par les pays relativement plus avancés, non pas dans un esprit de supériorité ou de condescendance, mais bien dans un esprit de collaboration à la noble entreprise qu'est le progrès de l'ensemble de la communauté humaine. Si les savants, les technologues et les ingénieurs s'engagent dans leurs entretiens dans un esprit de collaboration et s'ils donnent leur obole en contribuant à la préparation d'un semblable maître plan, ils feront un apport inestimable à la grande cause de la coopération et de la compréhension internationales. Les scientifiques, rompus aux disciplines des recherches objectives, sont tout indiqués pour penser et agir dans ce sens. C'est à leurs efforts que les peuples du monde s'en remettent quand ils espèrent connaître un jour une vie mieux remplie et plus riche.

REFERENCES

- (1) H. Brown, J. Bonner and J. Weir. The next hundred years; man's natural and technological resources; a discussion prepared for leaders of American industry. New York, Viking Press, 1957. 193 pp. (p. 43).
- (2) United Nations. Department of Economic and Social Affairs. Statistical yearbook 1959. United Nations publication, Sales No. : 59.XVII.1. 624 pp.
- (3) M. S. Thacker. Energy production and utilization. Rajahmundry (Madras), Andhra University Press, 1959 (p. 5).
- (4) P. C. Putnam. Energy in the future. New York, Van Nostrand, 1953. 556 pp. (p. 325).
- (5) *Ibid.* (p. 173).
- (6) H. Hartley. Energy in the service of man. The scientist and you. Edinburgh, Blackie, 1959 (p. 198).
- (7) United Nations. Department of Economic and Social Affairs. World energy supplies 1955-1958. United Nations publication, Sales No. : 59.XVII.7. 122 pp.
- (8) P. Putnam, *op. cit.* (p. 175). (This is probably an underestimate.)
- (9) Anonymous. The progress of science; new means of harnessing natural resources. Discovery (Norwich, United Kingdom), January 1961 (p. 2).
- (10) M. R. Huberty and W. L. Flock (editors). Natural resources. New York, McGraw-Hill, 1959. 556 pp. (pp. 430-432).
- (11) Ref. (9), *loc. cit.*
- (12) R. H. G. Watson. Fuel cells. Industrial Chemist (London), January 1961 (p. 3).
- (13) Anonymous. Development in fuel cells. Chemical Age (London), 28 January 1961 (p. 180).
- (14) Bourne. Direct conversion of energy. British Commonwealth Scientific Office (Washington), Report No. 1212, January 1961.
- (15) J. H. M. Sykes. Electricity reaches out. Discovery, April 1959 (pp. 152-158).
- (16) H. Thirring. Power production; the practical application of world energy. London, Harrap, 1956. 399 pp. (p. 127).
- (17) United Nations. Proceedings of the International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy; vol. 1; the world's requirements for energy; the role of nuclear power. United Nations publication, Sales No. : 56.IX.1, Vol. 1. 479 pp.
- (18) United Nations. Proceedings of the Second International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy; vol. 1; progress in atomic energy. United Nations publication, Sales No. : 58.IX.2, Vol. 1. 525 pp.
- (19) United Nations. Department of Economic and Social Affairs. New sources of energy and economic development. United Nations publication, Sales No. : 57.II.B.1. 150 pp.
- (20) United Nations. Economic and Social Council. Official Records, 27th session, 1959. Annexes. Agenda item 5(c) : Economic development of under-developed countries; sources of energy. Recent developments relating to new sources of energy and recommendations regarding the agenda for an international conference. Report of the Secretary-General. 6 March 1959. pp. 45-53 (E/3218).
- (21) M. R. Huberty and W. L. Flock, *op. cit.* (10) (p. 492).

- (22) Devaux. The tidal power plant in Brittany. News from France. Nov.-Dec., 1960. New Delhi, Embassy of France.
- (23) Anonymous. The progress of science : New Zealand's geothermal power station in operation. Discovery, April 1959 (p. 140).
- (24) Anonymous. Science in overseas industry. New Scientist (London), 23 February 1961 (p. 480).
- (25) Anonymous. The sun at work (Phoenix, Arizona), September 1959 (p. 1).
- (26) Anonymous. News from France, Nov.-Dec. 1960. New Delhi, Embassy of France.
- (27) Anonymous. The progress of science; power from the winds. Discovery, June 1960 (pp. 232-233).
- (28) E. W. Golding and M. S. Thacker. The utilization of wind, solar radiation and other local energy resources for the development of a community in an arid or semi-arid area. Arid zone research. Wind and solar energy; proceedings of the New Delhi symposium [1954]. UNESCO, 1956, Ref. No. : NS.55.III.7.AFS. 304 pp.

Part Two

Agenda item II.D

COMBINED USE OF VARIOUS ENERGY SOURCES AND ENERGY STORAGE PROBLEMS

Deuxième partie

Point II.D de l'ordre du jour

EMPLOI COMBINÉ DE DIVERSES SOURCES D'ÉNERGIE; PROBLÈMES D'EMMAGASINAGE DE L'ÉNERGIE

1. COMBINED USE OF VARIOUS ENERGY SOURCES

EMPLOI COMBINÉ DE DIVERSES SOURCES D'ÉNERGIE

Rapporteur

Edward W. GOLDING, O.B.E.

The Electrical Research Association, London

2. ENERGY STORAGE PROBLEMS

PROBLÈMES D'EMMAGASINAGE DE L'ÉNERGIE

Rapporteur

Farrington DANIELS, Professor Emeritus

University of Wisconsin, Madison, Wisconsin

Professeur honoraire de l'Université du Wisconsin, Madison (Wisconsin)

COMBINED USE OF VARIOUS ENERGY SOURCES

Rapporteur's statement

Note: Since the paper presented by the Rapporteur was the only one on this subject, there was no need for a general report. Mr. Golding's remarks in introducing the subject, however, contained a brief review of the difficulties involved and suggestions for possible solutions to the problems arising. They are accordingly reproduced below in summary form.

Mr. Golding said that because of the high cost of bringing energy into remote areas, whether by transmission of electricity or transport of oil fuel, it might be more economic in some cases to use local energy resources. Since those resources — wind, solar radiation and organic wastes — had characteristics which were complementary, they should be used in combination to give power supplies to communities. Wind and sun were random, but vegetable wastes constituted a form of storage and could be used to provide for priority loads when power supplies from wind and sun were not available.

Professor Thacker and he had given a paper on that theme to the UNESCO Symposium on Solar Energy and Wind Power at New Delhi in 1954,¹ and the idea had been generally accepted as sound. It was essential, however, that a scheme or schemes should be put in hand to test operation under practical conditions. The necessary equipment could

now be provided, but the practical feasibility of the schemes could not be tested in laboratories. Questions of social habits and customs were involved when random loads were envisaged, as he had described in his own paper (GEN/5).

In spite of wide agreement on the soundness of the idea, it had been impossible to obtain financial support to establish a test scheme, and he suggested that one might be considered for some of the research centres (one for each 50 million people) which had been proposed at the Conference.

A year or two before he had asked Sir Harold Hartley why it should be difficult to obtain the necessary financial support. The answer had been, in essence, that the commercial interest in such schemes would be slight. Admitting that that was true, at least at the outset, Mr. Golding remarked that the scheme concerned could be of considerable benefit to humanity and wondered whether in view of that fact it would be possible to get United Nations support for such projects.

¹ E. W. Golding and M. S. Thacker, "The Utilization of Wind, Solar Radiation and Other Local Energy Resources for the Development of a Community in an Arid or Semi-Arid Area", *Arid Zone Research; Wind and Solar Energy, Proceedings of the New Delhi Symposium*, UNESCO, Paris, 1956, pp. 119-126.

EMPLOI COMBINÉ DE DIVERSES SOURCES D'ÉNERGIE

Exposé du rapporteur

Note. — Comme le mémoire présenté par le rapporteur est le seul qui ait été présenté sur la question, il n'y a pas lieu de faire un rapport général. En introduisant le sujet, cependant, M. Golding a exposé brièvement les difficultés qui se posent et suggéré des solutions que l'on pourrait apporter éventuellement aux problèmes en cause.

M. Golding a dit qu'en raison du coût élevé de la fourniture d'énergie aux régions écartées, soit par les lignes de transport d'électricité, soit par le transport routier de mazout, il serait parfois plus économique d'exploiter les ressources locales d'énergie. Comme ces ressources — énergie éolienne, énergie solaire et énergie provenant des déchets de matières organiques — ont des caractéristiques complémentaires, il faudrait les employer conjointement pour fournir de l'énergie aux collectivités. L'énergie éolienne et l'énergie solaire sont très variables, mais les déchets de végétaux constituent une forme d'emmagasinage et peuvent servir à satisfaire les demandes prioritaires lorsqu'il n'est pas possible de compter sur l'énergie éolienne ou l'énergie solaire.

Le professeur Thacker et M. Golding ont présenté un mémoire à ce sujet au Colloque sur l'énergie solaire et éolienne organisé par l'UNESCO à New Delhi en 1954¹ et l'idée a, d'une manière générale, été jugée bonne. Cependant, il est indispensable d'élaborer un ou plusieurs projets pour mettre cette idée à l'épreuve. On peut actuellement se procurer le

matériel nécessaire, mais il n'est pas possible de déterminer par des expériences de laboratoire si ces projets sont réalisables. Comme M. Golding l'a expliqué dans son mémoire (GEN/5), des questions d'habitudes sociales et de coutumes se posent lorsqu'on envisage des sources d'énergie de débit variable.

Bien que l'on ait été généralement d'accord pour reconnaître que l'idée était satisfaisante, il a été impossible d'obtenir l'appui financier permettant de la mettre à l'épreuve et M. Golding a suggéré que certains des centres de recherches proposés à la Conférence (un centre pour 50 millions de personnes) se chargent de le faire.

Un an ou deux auparavant, M. Golding avait demandé à sir Harold Hartley pourquoi il serait difficile d'obtenir l'appui financier nécessaire. Sir Harold lui avait répondu en substance que les projets envisagés ne présentaient qu'un faible intérêt du point de vue commercial. M. Golding a fait observer que, même si cette objection était justifiée, au moins au début, l'humanité pourrait tirer un avantage considérable du projet proposé et il s'est demandé si, dans ces conditions, il serait possible d'obtenir l'appui des Nations Unies.

¹ E. W. Golding et M. S. Thacker, « L'utilisation de l'énergie éolienne, du rayonnement solaire et des autres sources locales d'énergie pour le développement des collectivités de régions arides ou semi-arides » (en anglais, avec un résumé en français), *Recherches sur la zone aride; énergie solaire et éolienne, Actes du colloque de New Delhi*, UNESCO, Paris, 1956, p. 119-126.

POWER FROM LOCAL ENERGY RESOURCES

E. W. Golding, O.B.E.

The Electrical Research Association
London

INTRODUCTION

The theme of this paper is that power is often badly needed in areas remote from conventional means of supplying energy—e.g., electric power networks or oil fuels, and that the most economical method of providing this power may be through the use of such energy resources as are to be found close to the sites concerned. Further, such local resources have obvious limitations due to their individual characteristics, so that the fullest and most economical service to the potential users of the power could result from a combined exploitation.

The problem to be considered is rather different from those dealt with in other items on the Conference agenda, because it is assumed at the outset that the power production is undertaken at a locality where conventional methods are likely to be very expensive.

Geothermal energy, large-scale wind power installations and perhaps, eventually, solar power from large stations, are to be used to feed power into electricity supply networks. Again, solar water heaters, refrigerators, cookers and furnaces may be made sufficiently economic to compete with conventional power available at the place where they are used.

The two main questions to be faced in considering the provision of power for a remotely situated community are the following :

(a) Are the costs of transporting energy from distant main sources sufficiently high to enable small power plants, run from local resources, to be competitive?

(b) Is it possible to install, at the remote site, a power system which can provide an acceptable and economic service in spite of the irregularity of the supply of energy on which it must depend?

THE PROBLEM OF ECONOMIC TRANSPORT OF ENERGY

For the present purpose it is sufficient to consider the two most obvious forms of energy which might be transported to remote areas—namely, electrical energy and oil fuel, though natural gas might be a third form in some cases.

(a) *Electrical transmission*

Where a large bulk supply of energy is to be transported, the economic problem can be solved.

Thus, electrical power outputs of several hundred megawatts are being transmitted from large hydro-electric stations over distances up to 1,000 miles, or even more, to supply important "load centres" where there are concentrations of population and of energy-consuming industries. But many areas in the developing countries are at present thinly populated although their potentialities for agriculture are considerable. "Subsistence farming" is common, and the development to improve this low standard of living calls for steps to be taken, at governmental level, in several directions. An energy supply is one of the more important requirements.

Even with such development, however, it is unlikely that any major concentrations of population will arise for many years to come. A bulk supply of electrical energy is not, therefore, a solution to the problem, because the distribution of the energy in a thinly populated area will be prohibitive in cost. High capital charges for a long electrical transmission system can be borne only by a large bulk of transmitted energy. To transmit a small amount of energy over the same distance is uneconomic because almost the same annual charges have to be spread over a much smaller total of energy units.

The costs, per kilowatt-hour of energy transmitted, for small power demands and long distances, are given in the following table.

Table 1
Costs of electrical transmission

Maximum demand of the load in kilowatts	Transmission distance in miles	Approximate cost of transmission in pence per kilowatt-hour
500	100	5.0
	150	7.5
	200	9.5
1,000	100	2.5
	150	4.0
	200	5.5
2,000	100	1.4
	150	2.2
	200	2.9

SOURCES : E. W. Golding, "The combination of local energy resources to provide power supplies in under-developed areas." *The Electrical Research Association* (London), technical report C/T 118 (1956).

Although these figures were calculated some five years ago,¹ they can still be considered as of the right order of magnitude. They show that, even though the energy was entirely free at the sending end, the cost, when the energy was delivered over a distance of 200 miles, could be as much as 9.5 pence per kilowatt-hour. Obviously, for small power demands, or greater distances, these costs would be even higher.

(b) Diesel generation

Instead of transmitting power, in electrical form, from a distant generating station, there is the alternative of establishing Diesel-driven generating stations within the area itself. The transport needed is then that for the Diesel fuel.

Capital costs of Diesel-electric sets vary, particularly as regards installation, but a representative figure for a plant of several hundred kilowatts in capacity would be £50 per kilowatt. To cover the annual capital charges, and the operating costs, including maintenance, which may be costly in a remote area, a figure of 20 per cent of the capital cost is reasonable.

Fuel consumption may be 0.7 to 0.8 pint per kilowatt-hour, but the cost of the fuel is governed largely by transport charges. Although, at the nearest railhead, the fuel cost may be only about 15 pence per gallon, road transport over several hundred miles may double, or even treble, this cost. An average cost may thus be 30 pence per gallon, which gives a fuel component of threepence per kilowatt-hour. At 30 per cent annual load factor, the fixed costs amount to about one penny per kilowatt-hour, making a total of fourpence. This is at the generating station in the area to be supplied. Distribution in a thinly populated area may account for a further cost of up to twopence per kilowatt-hour, giving a total cost, at the consumer's premises, of sixpence per kilowatt-hour.

In a recent article in *The Indian Railway Engineer* (July 1960), R. Kirloskar and G. N. Paraki have calculated in detail the installation and operating costs for a number of diesel-electric stations ranging in capacity from 25 to 250 kilowatts. For an annual load factor of 30 per cent, the final costs per kilowatt-hour (not including distribution) are shown in the following table.

Table 2
Costs of diesel generation

Installed capacity of station (kilowatts)	Cost per kilowatt-hour (pence)
50	8.8
100	6.12
200	5.04

¹ Around 1956.

The same authors state that the average cost of transmitting electric power to an Indian village is about £5,000. For a village population of say 5,000 people the average power demand might be 100 kilowatts. This amounts to 20 watts per head and, at 30 per cent annual load factor, corresponds to an annual consumption of 50 kilowatt-hours per head, which is probably all that the Indian villagers could afford to buy. (The present national income per head in India is about £24, or \$67, and analysis of the annual consumption of electrical energy for regions in which the annual income is low shows that this consumption is usually about one kilowatt-hour per dollar of income. Actually, the present average annual consumption of electrical energy per head for the whole of India is 36 kilowatt-hours; but, of course, this average is calculated from the figures for total population and total consumption, including the industrial load.)

To summarize the position regarding the importation of energy, for the generation of electricity, to a remote area, if the maximum demand is not greater than, say, 500 kilowatts, the energy cost to the consumer is likely to be at least 5 to 6 pence per kilowatt-hour.

THE POTENTIALITIES OF LOCAL RESOURCES

In considering the exploitation of local energy resources in general, it is necessary to take into account both their possible nature and the purposes which they might usefully fulfil. The resources will vary according to the geographical location of the area considered. Thus, in the temperate zones there may be adequate rainfall and supplies of water, not only eliminating the need for water pumping for irrigation, but giving the possibility of hydro-electric power generation. There may also be ample supplies of wood for fuel.

In the hotter and drier areas, both water and wood fuel may be scarce, so that power from these sources is out of the question, while water pumping, for irrigation, will become a very important requirement. Refrigeration may then be more important than heating, although in desert areas heating is often needed at night.

When water power is available, its exploitation is merely a question of installing a conventional hydro-plant of appropriate size, following an assessment of its economy. But water cannot be transported cheaply, so that the site of the power station is fixed within narrow limits, which, in turn, limits the area of power supply.

Supplies of wood fuel or, in sugar-growing areas, of bagasse, can also be used in conventional steam power plants, and the same applies to other organic wastes. The main point is then the cost of collecting and handling the material.

When such energy resources are not present in sufficient quantity for them to be relied upon as the sole source, we are forced to consider the more widespread, and more generally available, sources—wind

Table 3
Specific output of wind power plant

Rated wind speed of machine (miles per hour)	Annual average of wind speed (miles per hour)						
	8	10	12	14	16	18	20
	(output in kilowatt-hours per annum per kilowatt)						
20	1,300	1,740	2,500	3,300	4,000	4,800	5,500
25	—	1,000	1,500	2,200	3,000	3,600	4,220

power or solar energy, either unaided or in combination with, perhaps, small quantities of organic waste material.

To assess the potentialities of these resources, it is necessary to consider both their characteristics as power producers, and the costs of installing and operating the equipment needed to exploit them.

(a) Wind power

The relevant characteristics of wind power are as follows:

(i) Regularity of the annual average wind speed from year to year: over a long period of years this average does not usually vary by more than ± 10 per cent;

(ii) Unreliability of usable wind speed at any particular time, except that, in some tropical or semi-tropical areas and on some small islands, the diurnal variations of wind speed are predictable with some certainty;

(iii) Variation of the monthly average wind speed in a fairly regular pattern throughout each year.

The cost of energy produced from the wind varies according to the following formula,

$$\text{Cost, in pence per kilowatt-hour,} = \frac{2.4 \text{ pC}}{T}$$

where

p = the percentage rate of the annual charges for interest, depreciation and maintenance;

C = the capital cost of the wind power plant in pounds sterling per kilowatt; and

T = the specific energy output in kilowatt-hours per annum per kilowatt.

Although the present stage of development is not sufficiently advanced for the figure to be stated with certainty, for a plant of medium capacity, in the range 10 to 50 kilowatts, the cost C is likely to be about £150 per kilowatt. This is for a machine designed for a site of only moderate windiness, its rated wind speed being, therefore, 20 or 25 miles per hour. The percentage p, for the annual charges, will be 10 to 12 per cent, while the specific output T will vary with the average wind speed at the site according to the figures in table 3.

Energy costs are therefore likely to range from 0.6 to 3.6 pence per kilowatt-hour, according to the rated wind speed of the wind power plant and the

average wind speed at the site. These costs are, however, for random energy; they do not include any component for energy storage. With a wind power plant of any appreciable capacity it would not usually be economic to store more than a small fraction of the generated energy, to provide essential services in calm weather. Because of the high cost, and heavy depreciation, for an electric battery, the energy supplied through such storage is likely to cost twice as much as random energy—unstored. Thus, if one tenth of the total energy were rendered available, on demand, by battery storage the over-all cost of the energy would be increased by 10 per cent.

(b) Solar energy

The availability of solar energy varies, of course, considerably from one region to another. It is probably reasonable to assume an average availability of 3 to 3.5 kilowatt-hours per square metre per day in the zones between 60° and 40° latitude and 6 kilowatt-hours per square metre per day between 40°N and 40°S. The cost of the energy actually harnessed must then depend on the efficiency of the collector used and upon its capital cost per unit area. As with wind power, the operating costs are almost entirely the fixed charges for interest, depreciation and maintenance.

So much research and development work on both flat-plate and concentrating types of solar collectors has been done during the last few years that reports at this Conference will doubtless give reduced costs for them. The figures given in table 4 should therefore be accepted as probably on the high side.

Table 4
Costs applying to solar-operated equipment

Type of collector	Purpose	Cost equivalent in pence per kilowatt-hour
Flat-plate	Water heating	1 to 2
	Distillation of saline water . .	Approx. 3
	Space heating and air-conditioning	Approx. 2
Flat plate or concentrating	Motive power	4 to 6
Concentrating	Cooking	0.1 to 1
	Steam raising	Less than 1

These figures show that, for the purposes mentioned in table 4, solar equipment, like wind power plant, can probably compete successfully with conventional methods of providing energy in a remote district.

(c) *Vegetable matter*

Organic waste materials are often available, in small quantities, even in dry areas where vegetative cover is certainly an important factor in preventing soil erosion and in encouraging the growth of herbage for animal fodder. It may be used either as a fuel to be burnt for steam raising or (if in suitable form) as a raw material for the production of methane through a fermentation process, the gas then being used either directly for heating or cooking or, perhaps, as fuel for an engine.

Costs of energy production by such means are obviously difficult to state precisely but they will probably be about one to three pence per kilowatt-hour for heating or cooking by wood (the cost depending on the ease with which the material can be collected for use) and two to four pence per kilowatt-hour for motive power using a small engine adapted to the use of the fuel concerned.

THE USE OF LOCAL ENERGY RESOURCES IN COMBINATION

To avoid costly storage of energy the technique to be adopted in combining local energy resources for power purposes is to plan both the installation of power-producing equipment, and the loads to be supplied by it, in such a way that most of the services required by a remote community can be met by random power.

For such planning one must adopt an attitude of mind entirely different from that of the electricity supply engineer in an urban, or thickly populated, area where there is a continuous and dependable supply of electrical energy, the only development needed being that of encouraging its economic use for as many purposes as possible. In a remote district there is (it is assumed) no possibility of such a dependable power supply being provided at an economic cost. If, therefore, any amelioration of living conditions is to be brought about at all, through power supplies, these must be accepted as containing some element of uncertainty of availability, the degree of which depends upon the effectiveness with which the planning of the installation is done. The argument for a power supply from local resources is that, by such means, communities can receive a valuable service, even though not of 100 per cent reliability, whereas, otherwise, they would have nothing. Too much importance can be attached to the continuous availability of power supplies. This is well enough in towns and even in rural areas of industrialized countries, but to aim at its provision in a remote area will often mean that the costs are prohibitive. Even where such supplies are now provided by conventional means, supply breakdowns may be frequent and limitations of the

daily hours of service from small stations are common: full continuity of supply is not achieved.

So far as the author is aware, no scheme for the combined use of unconventional power plants operated by wind, solar energy or organic wastes has ever been tried. The suggestions which follow are, therefore, those which would appear to offer prospects of success; they are not based on experience.

Two methods can be envisaged: (a) the establishment of a "power station" at a central point within a community settlement, the means of power distribution being electrical from an electric generator, or generators, driven by windmills, solar engines or small heat engines; (b) separate power plants each being used for purposes for which it is best suited without any connecting link between them.

Method (a)

With method (a) the advantage would be that the form of the power—electrical—could be used in conventional ways for any of the normal domestic or agricultural purposes: the unconventional side of the scheme would be confined to the operation of the power station where either the windmill (when there was sufficient wind), or the solar engine (when there was sufficient sunshine), or the heat engine run directly or indirectly from organic wastes, would drive the electric generator. If wind and sunshine occurred at the same time, it would almost certainly be necessary to use two generators, one being driven by each power source and coupled electrically. The main function of the heat engine would be to act as a stand-by for its energy supply—organic wastes—is storable.

One alternative possibility would be to drive the generator by a steam engine, the steam being raised either by a solar steam raiser or by burning the waste material.

Considerable thought would have to be given to the arrangements for making use of these alternative drives for the generator. Although some of the controls could be automatic, it is very likely that a power station attendant would be needed to change over from one form of drive to another according to changing climatic conditions (of wind and sun).

Method (b)

Instead of establishing a central power station from which all the power for the community would be obtained, power plants of suitable type and size could be installed at the most convenient points. Water-pumping windmills, in the village, could give a domestic water supply, while others, located nearer to the agricultural land, provided water for irrigation. Water storage would be needed particularly for domestic supplies; for irrigation this might not be necessary—the irrigation water could be allowed to flow whenever there was sufficient wind to provide power for the pump. Again, a wind-electric plant of appropriate capacity, but not larger than that for which battery storage could be

used economically, could give electric light for both public illumination and for individual houses.

Alternatively, a larger wind-electric plant could be installed, only part of its output being stored, the remainder being used, as random power, for any domestic or agricultural purposes having no special timing demands.

Solar equipment could be used for water heating, either on an individual or a communal basis, for water distillation, for space heating and air conditioning or to operate a refrigerated store-room.

Loads requiring only heat should be supplied from solar energy and those involving motive power from wind power.

Again, a small heat engine, run on waste material, could act as stand-by to ensure that essential loads could be met at any time.

The advantage of a scheme of this kind would be that there would be much more diversity in equipment and more chance of operation automatically without the difficulties of running different kinds of power plant in parallel. On the other hand, there might be difficulties in arranging that power services were afforded to all the inhabitants in a scattered community.

Whichever scheme were adopted, the probable loads, their magnitudes and timing requirements, would have to be considered. As an example, some data are given in table 5 for a community of 20

Table 5

Load	Approximate annual demand for energy (kilowatt-hours)	Probable maximum Power demand (kilowatts)	Timing requirements of the load	Form of power supply or order of priority
<i>Domestic</i>				
Water supply	1,500	1 to 2	Day or night	Wind 1 Solar pump 2
Lighting and small power	7,000	4 to 5	Lighting — night Small power — day	Wind 1 Heat engine 2
Cooking	8,000	10 to 20	Day — precise times	Solar 1 Wind or organic wastes 2
Refrigeration, space heating and air conditioning	30,000	10 to 20	Refrigeration — day Space heating — night	Solar 1 Wind 2
Water heating	30,000	10 to 15	Day or night	Solar 1 Wind 2
Water distillation	5,000	2 to 4	Day or night	Solar
TOTAL	81,500			
<i>Agricultural</i>				
Irrigation	25,000	15 to 20	Day or night	Wind 1 Heat engine 2
Field cultivation	5,000 to 20,000	5 to 10	Day	Wind
Food preparation, threshing, grinding and stationary power	10,000	10	Day	Wind
Crop conservation	5,000	5	Day or night	Wind and solar
Washing and sterilizing	3,000	5 to 10	Day	Wind
Poultry keeping	5,000 to 10,000	5	Mostly day	Wind
Dairy work, fish farming, specialized crop treatment, and other requirements . . .	5,000	2 to 5	Mostly day	Solar or wind
TOTAL	58,000 to 78,000			

SOURCES :

UNESCO, *Arid Zone research; Guide book to research data for arid zone development* (Paris, 1957; Unesco ref. NS. 56.III.9A), 191 pp.

E. W. Golding and P. G. Finn-Kelgley, "The economic possibilities of local energy resources to supply power for agriculture in under-developed areas", *World Power Conference, Sectional Meeting, Beograd, (1957), Transactions*, vol. 2 (1958).

E. W. Golding, "Power for the small user", *New Commonwealth* (London) vol. 37, No. 2 (1959), pp. 103-107.

E. W. Golding, "The combination of local sources of energy for isolated communities", *Journal for Solar Energy Science and Engineering*, vol. II, No. 1 (1958), pp. 7-12.

or 30 families, in a remote district of a semi-arid zone in the tropics where some agriculture is possible.

The loads listed in table 5 would be sufficient to make a significant improvement in a community's way of life and to provide the basis for development. The total energy required annually would be of the order of 140,000 kilowatt-hours and the total installed capacity of power plant, wind, solar and heat engines, would be some 50 kilowatts having a specific output of about 3,000 kilowatt-hours per annum per kilowatt.

Diversity and inherent storage of the loads is important, and it can be seen that some loads can be supplied at random — day or night, some must be supplied only during the day and others only during the night. In general, the heating loads and the water pumping loads have inherent storage, while motive power loads have none and must be supplied when power is available during the day time. This eases the position considerably. Recent British experiments in the automatic load distribution from a wind-electric plant have shown that it is possible, by such distribution, to ensure that none of the random power is wasted: it is always used

effectively for loads, the priority of which is pre-selected by the user.²

CONCLUSION

This outline of the possibilities for providing a useful power service from local resources has been given, not as a fully worked-out scheme, but rather as a basis for discussion. It is impossible to generalize in such matters: plans must be made to suit the particular conditions. But that there are interesting possibilities is clear. What is now needed is an experimental scheme to discover how such methods might be applied in practice and how the users — the "guinea pigs" living in the community so supplied — would react to them.

Finally, for any success in this direction the question to be asked is not "Can a full power service to a remote area be given economically through imported energy?" — when the answer would often be "No" — but rather "What service can be provided economically from the energy resources which are already at hand and are at present being wasted?"

² J. G. Walker, "The automatic operation of a medium-sized wind-driven generator running in isolation, *The Electrical Research Association* (London), *Technical report C/T 122* (1960).

POWER FROM LOCAL ENERGY RESOURCES

Summary

To aid development and to improve living conditions in many remote, thinly populated areas a supply of energy is a very important requirement. Importation of this energy, either through electrical transmission or in the form of fuel, is often prohibitively expensive. An alternative, which may be more economical, is the exploitation of local energy resources such as wind power, solar energy or organic wastes. These resources have individual characteristics which need special consideration in relation to the possible power loads; and the loads should be planned to match the unconventional methods of power production. The use of local energy resources in combination may offer the best prospect of success in providing a valuable service to remote communities and experimental schemes should be established to test the possibilities under practical conditions.

LA PRODUCTION D'ÉNERGIE A PARTIR DES RESSOURCES LOCALES

Résumé

Pour favoriser le développement des régions écartées et peu peuplées et améliorer les conditions d'existence des habitants, la fourniture d'énergie est, dans bien des cas, de la plus haute importance. L'importation de cette énergie, soit par les lignes de transport d'électricité, soit par le transport routier de combustibles, est souvent d'un coût prohibitif. Une solution éventuellement plus économique consiste à exploiter les ressources locales d'énergie, telles que l'énergie éolienne, l'énergie solaire ou l'énergie provenant des déchets de

matières organiques. Puisque ces ressources ont toutes des caractéristiques particulières, il faudrait à la fois les étudier spécialement en fonction des demandes éventuelles à satisfaire et ménager ces demandes compte tenu des méthodes non traditionnelles de production d'énergie. L'emploi combiné des ressources locales d'énergie peut constituer la meilleure solution du problème de la desserte des collectivités écartées, et des projets expérimentaux devraient être établis afin de permettre de juger les possibilités dans les conditions existant en pratique.

ENERGY STORAGE PROBLEMS

Farrington Daniels, Rapporteur

Widespread use of solar energy or wind power, except for irrigation, depends on finding practical ways of storing the energy or the products. Research on the production and storage of solar energy is new because there has not been sufficient incentive. Those countries which are best able to undertake research and development in these fields have had an ample supply of combustion fuels and have had little need for new sources of energy. This Conference is concerned with present practical applications of solar and wind energy and is not interested in basic scientific research because the time lag between laboratory experiments and consumer use is too long. Neither is this Conference interested, we assume, in the long-range future when our present easily recoverable reserves of coal, oil and gas begin to dwindle.

The field of solar energy storage is so new in importance that the discussions of economic applications at this session must be based on limited experimental and engineering data. They will have to be aimed at geographical areas where there is not now an adequate supply of fuel and conventional electric power. In considering the economics of solar and wind energy production and storage, it is important to realize that the conditions of the highly industrialized countries do not apply and that capital investment and foreign exchange are difficult to obtain, but that labour may be relatively abundant. It is important to emphasize also that we cannot think in terms of producing electricity for less than one cent per kilowatt-hour, as is done in the large efficient electrical power plants of the highly industrialized nations. It is not reasonable to compare the cost of electricity produced in solar units of one kilowatt with that produced in 100,000-kilowatt units of the conventional type. Electricity from the sun or the wind can be produced and stored in small units of the order of kilowatts, and without large capital investment. Moreover, there is a considerable saving in the cost of transmission lines and distribution to many small users.

The cost of stored electrical or mechanical energy can be considerably greater than the cost of the energy produced directly, because of the inefficiency and the cost of the storage and later release of the stored energy.

The total cost T of one kilowatt-hour of electrical energy delivered from storage may be expressed in the following terms :

$$T = \frac{P}{se e_D} + \frac{M}{n} + \frac{I}{n} + \frac{C}{ny}$$

where

- P = cost of 1 kilowatt-hour of electricity derived from the energy of the sun or the wind;
 e_s = efficiency of storage;
 e_D = efficiency of delivery;
 M = cost per year of maintaining and operating storage;
 n = number of kilowatt-hours delivered from storage per year;
 I = annual interest charges on capital investment;
 C = capital investment for storage and delivery of energy; and
 y = number of years of life of the storage unit.

The storage unit can be composed of several parts, each with a different length of life, and so C/y may be regarded as a summation of the cost of each part divided by the length of its life.

This formula can be illustrated with a couple of specific examples. It is assumed that solar-produced or wind-produced electricity costing five cents per kilowatt-hour charges a 12-volt lead-acid storage battery at 10 amperes for an average of 8-1/3 hours per day on the average. Thus one kilowatt-hour is delivered to storage per day or 365 kilowatt-hours per year. The efficiency of delivery to storage is assumed to be 90 per cent and the efficiency of recovery from storage 80 per cent, and so the number n of kilowatt-hours delivered from storage is $365 \times 0.9 \times 0.8 = 263$. The cost of the storage battery C is assumed to be \$25 or 2,500 cents, and the useful life y two years. The cost of the maintenance and operation M is neglected and the interest charge is assumed to be 10 per cent. Then

$$T = \frac{5}{0.9 \times 0.8} + \frac{250}{263} + \frac{2,500}{2 \times 263} = 12.6 \text{ cents}$$

The prices assumed here are in fair agreement with the findings of Evans (GEN/3), but the prices are lower than those of Bacon (GEN/9).

In a second illustration, it is assumed that the solar or wind energy supplies electricity at 12 volts and 10 amperes for 8-1/3 hours per day providing one kilowatt-hour which is used to electrolyse water with an efficiency of 70 per cent. The stored hydrogen and oxygen then operate a fuel cell and produce electricity with an efficiency of 60 per cent. The kilowatt-hours delivered from storage per year are then $365 \times 0.7 \times 0.6$ or 153. It is assumed that the electrolyser, the fuel cell and storage tank for the hydrogen and oxygen will cost twice that of a storage

battery namely, \$50, and that they will operate for five years. However, it is assumed that the electrodes with their catalytic surfaces will have to be replaced at a cost M of \$2 per year.

Then

$$T = \frac{5}{0.7 \times 0.6} + \frac{200}{153} + \frac{500}{153} + \frac{5,00}{5 \times 153} = 23 \text{ cents}$$

More exact costs of fuel cells are discussed thoroughly by Bacon (GEN/9) and by Evans (GEN/3).

These formulas show that the efficiency of the storage and delivery and the length of life of the equipment influence the cost greatly. If the storage is to be effected through pumping water to a higher reservoir, the formula shows the great advantage of going to larger units with higher pumping efficiencies. If the storage and recovery is to be effected by later operation of a heat engine with a Carnot cycle limitation of perhaps 10 per cent, the small value of e_D makes the total cost T extremely high.

One kilowatt-hour of energy from a storage battery will operate four 50-watt electric lamps for five hours, or pump 61,000 litres or 16,000 gallons of water to a ten feet (or three metres) high level if the combined efficiency of motor and pump is 50 per cent. If one 50-watt lamp were to be operated for 3 hours each evening, consuming 150 watts, the cost according to the example just given would be 0.15×12.6 cents or 1.9 cents assuming that the very small unit of 0.15 kilowatt-hour per day has the same efficiency and relative cost as a unit of one kilowatt-hour. This assumption, of course, is invalid except as a rough approximation.

It is hoped that the participants in the discussion will supply realistic values for the several factors included in the cost formula for the several different types of storage which will now be discussed.

MECHANICAL STORAGE

The simplest and most efficient way of storing energy mechanically is to pump water to a higher reservoir and let it flow back through a water turbine when the power is needed. In hilly country water can easily be pumped to a higher tank or pool for storage; or a hole can be dug in the ground and the pump and turbine placed at the bottom. In some localities, an abandoned mine might be used. If a lake or a harbor is near by, a diving bell can be used and water pumped from the bottom to the surface. This principle, of course, is sometimes used with large hydraulic electric plants with limited amounts of water where there are reservoirs of water at two different levels.

One such plant is operating at Austin, Texas. A steam plant pumps water from the lower to the higher level when the power demands are light, and when they are heavy both the steam and the hydraulic plants supply electricity directly. For large pumps and turbines, the efficiency is high, but turbines

of fractions of a kilowatt operating small pumps have very low efficiencies — perhaps 30 per cent.

If it is necessary to build a reservoir on a tall frame or tower, the construction costs would be excessive. Large installations are needed for mechanical storage of energy. One kilowatt-hour of stored energy is equivalent to 3.67×10^5 kilogramme-metres (or to 96,900 gallons or 12,900 cubic feet of water falling one metre or 3.28 feet). Weights can be arranged to fall down into an open hole or from a rotating axle on a tall framework. Such operations would be practical only for very small units. It would take 2,650 sacks of sand each weighing 100 pounds (or 45.6 kilogrammes) falling through 10 feet or three metres to store one kilowatt-hour of energy. The weight can be pulled up with a sun-driven or wind-driven motor, which operates later as a dynamo when the weight returns to its lower level. A falling weight can also be used to unwind rope on an axle and turn the wheel of a pump or other machine. It is possible, also, on a small scale, to store solar- or wind-generated energy by winding up a coiled metal spring and releasing it later. The solar-generated energy can be used to compress air in a pressure tank which expands at a later time, through an air-driven turbine or engine.

STORAGE BATTERIES

A great deal of experience is available regarding the manufacture and use of the lead-acid storage battery, such as the type used in automobiles. This battery, efficient and considerably cheaper per kilowatt-hour than any other type, has to be operated under favorable conditions. It must be kept filled with water and not allowed to stand long in a discharged condition. Automobile batteries are cheap because they are mass produced in large quantities, but they have to be compact, rugged and portable and they have to be capable of very heavy drains up to 50 amperes and more. In ordinary usage they do not last more than about two years. The large surface area, required to give the heavy currents, disintegrates eventually, and the close packing of the plates leads to difficulties.

For the storage of solar- or wind-generated electricity, it should be possible to simplify the structure and lower the costs, because the battery can be large, non-portable and would not be designed for very heavy drains. Reserve lead storage batteries for power stations have a much longer life, or 10 to 20 years. But there is a serious handicap in using storage batteries for the storage of solar or wind energy, because the batteries are to be nearly completely discharged every day. Under these conditions their life is much shorter. Automobile and power station batteries are rarely subjected to a deep discharge. If, in order to assure long life, it is necessary to discharge the battery only half-way, then the capacity of the storage battery and the capital cost must be doubled.

Many other types of storage battery are available, such as the iron-nickel alkaline battery and the nickel-cadmium battery, which are more efficient and less dependent on careful handling, but also more expensive. A great deal of effort has gone into recent research on storage batteries designed for use in space vehicles. In these, the emphasis has been on kilowatt-hours stored per pound or per kilogramme of weight, whereas in our discussions we are not much concerned with weight, but rather with dollars per kilowatt-hour.

The cost of storage batteries per kilowatt-hour depends largely on the length of life of the battery. The forming and reforming of a solid by electroplating through many cycles eventually leads to disintegration of the structure of the plated deposit. Research should be directed towards developing storage batteries which involve the alternate reduction and oxidation of electrolytes in solution without the electro-deposition of a solid.

One of the advantages of the use of storage batteries is the ability to charge them in parallel at low voltages of perhaps 2 volts from a solar generator and then discharge them in series to give a high voltage and better efficiency in the operation of electrical equipment.

Evans (GEN/3) gives a summary of the cost of storage batteries and discusses the requirements for intermittent use. He estimates the annual cost of a lead-acid storage battery to be \$13.50 per kilowatt-hour of storage capacity. He points out that since the cost and size vary linearly with storage capacity, large installations become very expensive.

FUEL CELLS

A primary electrochemical battery, such as a flashlight battery, operates only until the electrode materials are used up. In a storage battery the discharged cell is restored to its original condition by passing direct current from an outside source in the opposite direction. In the fuel cell, the electrode materials from an outside source are fed into the electrochemical battery as fast as they are consumed in the production of the electric current. Frequently, the electrode materials consumed in the operation are gases. The most advanced fuel cell and the one of most interest in these discussions is the hydrogen-oxygen cell. The solar-produced electricity is used to electrolyse water and the hydrogen and oxygen produced are stored and fed into a fuel cell at a later time to produce electricity while re-forming water.

A great deal of research is now going into the development of fuel cells at a cost of several million dollars per year in the United States alone, largely in industry. The activity, which may be somewhat out of proportion to anticipated results, is encouraged by the high efficiency of operation (60 to 70 per cent of the chemical energy being converted directly into electricity), by the elimination of the temperature limitations of the Carnot cycle, and by the fact that no moving parts are involved.

There are many problems, including the production of catalytic electrode surfaces and the removal of the water produced in the reactions. One of the most important economic considerations is the length of life of the cells. At present, the catalytic surfaces of the electrodes tend to become inactive after hundreds of cycle, and the life of the fuel cells may well be less than a year. These are difficulties which can probably be corrected by further research.

In storing solar energy, the efficiency of the electrolysis of water approaches 100 per cent on the basis of hydrogen and oxygen produced per faraday or per ampere-hour of electricity. On the basis of energy, however, regardless of the amount of hydrogen and oxygen, the efficiency of the production of hydrogen in electrolysis may be about 70 per cent. The operation of the cell can be simplified and the storage of the oxygen can be eliminated by using the air instead of oxygen, but the operation of the fuel cell then becomes less efficient.

Although there are no operating data available yet for fuel cells, two of the papers give expert estimates of costs. Evans (GEN/3) describes the fuel cell operation and analyses the cost data fully. He estimates the annual cost per kilowatt of a low-temperature hydrogen-oxygen fuel cell alone to be \$75 for power levels of one kilowatt or greater. He suggests that future developments may bring the cost down to \$30 per year per kilowatt for 1-kilowatt or larger units and \$50 for 0.1-kilowatt units. He estimates the cost of the electrolyser to be \$25 per kilowatt and the storage under pressure in permanent steel tanks to be \$0.50 per year for a capacity of one kilowatt-hour. He considers the effect of seasonal and daily fluctuations on the output.

Bacon (GEN/9) describes fully the fuel cell, electrolyser and gas storage requirements, and gives costs. He advocates operation at medium pressures. In general, his cost estimates run appreciably higher than those of Evans. He emphasizes the importance of operating the electrolyser at medium pressures (30 atmospheres) and using a fuel cell operating either at 70°C and atmospheric pressure or at 200°C and 20 to 40 atmospheres, under conditions which he himself has worked out after years of intensive research. He believes that the over-all efficiency is not apt to be greater than 50 per cent now, but that further research may lead to considerably higher efficiencies. He estimates an over-all capital investment (not annual cost as in Evans' estimates) of about \$325 per kilowatt for a 100-kilowatt installation. Particularly helpful is Bacon's cost estimate for gas storage in low-pressure gas holders, high-pressure steel cylinders and underground caverns. He favours storage in long steel pipes at 100 atmospheres. Bacon concludes that serious consideration of fuel cells for energy storage in economically, less developed parts of the world is still premature.

Hydrogen-oxygen fuel cells are not the only fuel cells to be considered for storing solar energy. Other chemical products can be made electrochemi-

cally with sun-produced or wind-produced electricity, such as zinc or aluminium. They can be used later to operate a primary electrochemical battery, and the metals can be recovered again from the ingredients after the battery has run down. Again, the focused solar energy gives high temperatures which may be used to dissociate chemical compounds thermally and give products that can be recombined electrochemically to produce electricity.

Two interesting papers to be considered in this session describe frontier theoretical and experimental work on these thermally-reversible galvanic cells, which may be regarded as closed-cycle fuel cells. In another sense, they may be regarded as storage batteries in which the spent cell is recharged not by an external electrical current, but by an external source of heat, such as focused sunlight.

McCully (GEN/6) has undertaken a thorough thermodynamic investigation of possible thermally-regenerative galvanic cells of oxides, hydrides, halides, carbides and nitrides in suitable temperature ranges, obtainable for solar energy and parabolic collectors. He believes that it is possible to choose reversible systems which can convert directly into electricity 11 per cent of the heat absorbed at the higher temperature. He describes two particularly promising galvanic cells, one containing manganese oxide and silver oxide and another containing antimony and tin chlorides. The thermal regeneration of the electrochemically active ingredients allows the storage of energy. The cost is high for present consideration, but would come down with mass production. No data are available on the length of operating life.

Werner and Ciarlariello (GEN/14) describe thermally regenerative hydride fuel cells, particularly the lithium hydride cell operating up to 900°C. Lithium hydride is heated to decompose into molten lithium and hydrogen. When electrical power is needed, the lithium loses its electron and hydrogen gains an electron to form hydride anion. In the operation of the cell, an electron is transferred through an external circuit from the hydrogen electrode to the lithium electrode, thus providing an electric current for doing useful work. The product, lithium hydride, dissolves in the cell in a molten salt to give the conducting electrolyte. If the regeneration proceeds more rapidly than the lithium and hydrogen are consumed in the cell, then they are stored for later use in the closed system. An efficiency of 8 to 13.8 per cent is expected, which is better than thermoelectrical generators are now able to give continuously, and the lithium-hydride cell has the additional advantage of providing energy storage.

In choosing the thermally regenerative galvanic cell, Werner and Ciarlariello point out that the free energy change must not be too great, because the temperature range necessary to effect reversibility would be too great, and it must not be too low because the voltage of the cell would be too low.

Experimental tests of the lithium-hydride cells have been made, but data on costs and on the length

of life and the number of cycles are not yet available. Practical units appear to be two or three years away.

HYDROGEN FUEL

The electrolysis of water to give hydrogen fuel is one of the simplest ways of storing energy from the sun. Capital investment for the electrolytic cells is low; the cells have a very long life, and over 70 per cent of the theoretical amount of hydrogen is produced without moving parts and without need for skilled operators. The most efficient way to use the hydrogen is in fuel cells, but these have not yet been fully developed. Hydrogen can be used also in the operation of internal combustion engines. There appear to be no obstacles in the way of adapting internal combustion engines to run on hydrogen instead of petroleum products or methane, but further research is needed. Hydrogen, of course, has a low heat of combustion on the volume basis (274 BTU per cubic foot in comparison with 912 BTU per cubic foot from methane). However, the density is only 1/8 as much as that of methane, and on the weight-basis a gramme of hydrogen has 2.4 times as much heat of combustion as a gramme of methane. Hydrogen fuel can also be used with air to produce steam and heat for operating a steam engine or turbine. It will be remembered from earlier considerations that the heat engines are limited to low efficiencies, and that the low efficiencies combined with the expensive hydrogen makes the operation of heat engines very costly.

The storage of hydrogen for operating fuel cells or heat engines is a problem. It may be stored in large plastic bags or steel pressure-tanks, or by the displacement of water. It could be stored in large abandoned mines under pressure, as is now done with natural gas (methane). Storage in the form of a liquid or solid chemical is attractive because of the much smaller space involved. Palladium will hold 800 times its volume of hydrogen; but palladium is too expensive. Research to find practical, reversible hydrogenations and dehydrogenations is needed. Organic or inorganic reactions with hydrogen, which can be reversed by raising the temperature or reducing the pressure, should be investigated.

Hydrogen can be transported over long distances in pipelines, as is now being done with natural gas. It is not limited, as electrical transmission lines are, to 300 or 400 miles. It can be transported in tanks or in the form of chemicals.

It is hoped that the participants in the discussion will consider the feasibility of using hydrogen for the operation of movable vehicles such as tractors and small trucks. Would it be practical to carry out agricultural and transportation operation with fuel cells (or possibly with small internal combustion engines) operating on hydrogen which is contained in pressure-tanks or in balloons anchored to the moving vehicle? One kilowatt-hour of electricity electrolysing water at 1.7 volts can produce 21 moles of hydrogen or 252 litres occupying 8.9 cubic feet.

If the hydrogen were used to operate an internal combustion engine at 10 per cent efficiency, ten times as much hydrogen or 89 cubic feet would be required to give a kilowatt-hour of work. If it were used to operate a fuel cell at 60 per cent efficiency, 1.66 times as much hydrogen or 14.8 cubic feet would be required to give a kilowatt-hour of work from the stored hydrogen. It would be possible to electrolyse water with energy from the sun or the wind for several hours and store the hydrogen in a balloon to operate a small truck or tractor for a short time. The operation would be small and inefficient, but it would make possible operations without the expenditure of cash for petroleum fuel, and it might help to reduce the number of farm work animals and release their food for human consumption.

CHEMICAL AND PHOTOCHEMICAL STORAGE OF ENERGY

Hydrogen has been considered as a specially important case for energy storage because its production by electrolysis is so simple and inexpensive and the raw material, water, is so easily obtained everywhere. Many other possibilities exist, however. The hydrogen can be stored and transported in the form of ammonia by combining it with nitrogen under pressure by the Haber process. The ammonia can be oxidized to give nitric acid or partially oxidized to give ammonium nitrate, which contains much stored energy and is used extensively as an explosive. Again, it is possible to focus solar radiation so as to obtain temperatures of 2,100°C, sufficient to combine the nitrogen and oxygen (of the air) to give nitric oxide; when the nitric oxide is chilled at the rate of 20,000°C per minute, it is recovered and later oxidized with air and combined with water to give nitric acid. Another possibility consists in combining hydrogen with carbon dioxide, obtained by absorption of the 0.03 per cent carbon dioxide in the air. The two gases under pressure with a catalyst produce methyl alcohol, which can be used for fuel. The several chemical operations suggested here would have to be carried out on a very large scale.

Another possibility is to use sunlight for the direct production of energy-rich chemicals through photochemistry. In fact, all our present foods and fuels are made by photosynthesis of carbohydrates from water and the carbon dioxide of the air.

For the practical storage of solar energy through photochemistry, several requirements must be met. The photochemical reaction must absorb energy and be capable of reversal with the evolution of energy at a later time. At least one of the photochemically reacting materials must absorb a considerable fraction of the solar energy, preferably most of the visible light, and the photochemical reaction must take place with high efficiency about one molecule reacting for each photon absorbed. The energy storage should be reasonably large, at least 50 to 100 calories per gramme. Finally, the reverse reaction must take place at just the right rate — fast enough

to be practical and yet not so fast as to complete itself during the time of the exposure. Very few photochemical reactions are known which satisfy all these conditions. The situation has been summarized in a report, *Photochemistry in the Liquid and Solid States*, prepared by a sub-committee on the photochemical storage of energy of the National Research Council of the United States National Academy of Sciences, and published in New York by John Wiley and Sons.

Although there is nothing practical yet in sight, it is interesting to realize that photosynthesis in nature shows that the goal is not impossible and that if a suitable photochemical reaction could be found, it would be theoretically possible, using reasonable assumptions, to produce three tons of photochemical products per acre per day in bright sunlight, whereas yields in ordinary agriculture in temperate climates are only about two or three tons per year.

A contribution to the photochemical storage of energy has been described in a paper by Marcus & Wohlers (GEN/2). These investigators have made use of a focusing solar furnace with very high energy concentrations to study the photolysis of water, and the photolysis of nitrosyl chloride in quartz vessels. They point out that the photochemically reacting systems are transparent to most of the solar radiation and that the aqueous solutions in quartz-reaction vessels do not become hot. The ultraviolet and short-wavelength visible light, however, is so intense that it is easy to make quantitative measurements of the reactions. It would be possible to produce photochemical products on a reasonably large scale.

The photodecomposition of water to give oxygen, catalysed by ceric ions, was established but evidence was not found for the photodecomposition of water into hydrogen, catalysed by cerous ions. The quantum yield, or photochemical efficiency, of this reaction is so low, and the quantity of active ultraviolet light in sunlight as well is so low that the photolysis of water by sunlight is not appreciable. A few years ago, hope had been expressed that these reactions might produce sufficient quantities of hydrogen and oxygen for storage and later operation of a fuel cell or heat engine.

The other reaction investigated by Marcus and Wohlers had been proposed for storage of solar energy because it absorbs most of the sunlight from 3,000 to 6,300 Å, and it decomposes with a high photochemical efficiency and with the absorption of energy.



The products of the reaction can be stored separately and combined later to reform nitrosyl chloride with the evolution of heat. The reactions take place in solution in carbon tetrachloride and the products are separated as fast as they are formed because the nitric oxide produced is insoluble in carbon

tetrachloride. This automatic separation of products, which prevents premature recombination, is an important feature of this reaction.

It has been proposed to recombine the nitric oxide and chlorine in a fuel cell so as to produce electricity rather than heat, but no results have yet been published. Marcus and Wohlers report an energy storage of 1.71 per cent in a flowing system, and 0.18 per cent in a static system where the chlorine and nitric oxide are recombined photochemically before the nitric oxide can escape as a gas. This stored energy is comparable to that of the photochemical storage of energy through photosynthesis in an ordinary agricultural crop. The favourable characteristics of this reaction are offset to a considerable extent by the fact that the energy released by the reaction of chlorine and nitric oxide is relatively small.

The authors suggest the possibility of photolysing molten silver chloride to give silver and chlorine. The recombination is favourable, and it evolves a large amount of energy. Other endothermic photochemical reactions should be investigated which are photochemically efficient in sunlight and which proceed with the proper velocity. The generation of photochemical products that can be stored and later combined in a galvanic cell would be promising, if suitable reactions could be found. There appears to be nothing yet available among photochemical reactions which deserves economic study by this Conference. Even the direct use of wood or agricultural by-products to operate heat engines can be economically attractive only in special cases because of the low efficiency of photosynthesis, the high cost of collecting and transporting the material and the fact that the plant materials may well be more valuable for other purposes than for fuel.

Another approach to the storage of solar energy in chemical reactions has been reported by Melzer (GEN/13). He states that the abundant agricultural crops of the babasu palm in Brazil can be used for thermal gas distillation, and the carbonaceous residues used with steam in such a way as to produce combustible gases. He considers the possibility of several power plants up to 150 kilowatts, distributed in areas of abundant palm growth situated far from electrical transmission lines. The heat balance is not quite sufficient, however, and he proposes to supplement the heating chambers with focused solar energy. He plans to use a large mirror, 15 metres by 15 metres, made of small squares of glass, set 30 metres from the oven, and focused into a cone which leads into the hot chamber through an aperture 1.5 metres in diameter. The chamber is vertical and the horizontal beam of focused sunlight is reflected vertically with an aluminium mirror. No experimental data or cost estimates are given. The construction and adjustments of a large mirror, 15 metres on a side, so as to give a sharp focus of 1.5 metres at a distance of 30 metres will be difficult. The capital costs and operation might offset any gain in the heat produced by the solar collector.

HEAT STORAGE

The storage of solar energy as heat will be discussed in a different session of this conference, but it should be pointed out here that the storage of high-temperature heat to be used later for conversion into work through a heat engine or some other device might well be discussed from technical and economic standpoints. Focused sunlight can provide high-temperature heat considerably more cheaply than it can produce electrical or mechanical energy. The high-temperature heat is quickly lost unless the heat storage structure is heavily insulated. A pebble bed of refractory materials can be effectively heated with hot air. If it is thoroughly insulated, it will hold its head for long periods of time, because the pebbles touch each other only on restricted surfaces and the lateral heat conduction through the pebble bed is low. Several years ago, Hütter suggested that heat from the sun or electric currents generated by the energy of the wind or the sun could be stored effectively in a large insulated sphere of iron and used to heat thermocouple wires or engine fluids. The large heat capacity and the small ratio of surface area to volume in a sphere minimize the effect of heat losses.

ELECTRICAL NETWORK

If a commercial electric network grid is available, extending over a large geographical area, it can be used to absorb electricity which is generated from the sun or the wind and converted into alternating current. While the electricity of the network is being supplemented intermittently from these sources, the conventional production of electricity from fuel or water power can be decreased with a proportionate saving in operation costs.

CONCLUSIONS

The present state of development in the storage of energy is presented for discussion at this session. Various possibilities for future development have been suggested even though they are not covered by formal papers submitted to the Conference.

The papers to be considered include two on the hydrogen-oxygen fuel cell, two on thermally-regeneratable fuel cells, one on photochemical storage of energy and one on the production of fuel gases achieved with the help of supplemental solar heating. The discussions should extend beyond the areas covered in these papers.

Emphasis in this general report has been placed on small storage systems of about one kilowatt-hour, because these can be so simple that they can be purchased at prices comparable with farm animals and operated by relatively unskilled labour. These units are considered for use by a single family. However, this Conference has the responsibility also to consider much larger units which can be used for village utilities or manufacturing operations or community services. It is also hoped that there will be discussion of still smaller units, of fractional

kilowatts. Such small units are more expensive per kilowatt, but under economic conditions where capital is very difficult to obtain and there is ample supply of manual labour, it may be worth while to consider simplified equipment that would not be considered in an industrialized society.

It is clear that there are no new technological advances in energy storage, now in sight, which are likely to lead to striking economic advances. But encouraging progress is being made in basic science and there is good hope that this will lead eventually to useful devices. Much needs to be done in research and engineering to bring about practical applications. This Conference can make an important contribution to the development of some of the less industrialized areas of the world by pointing out the needs and the specifications for useful devices which will store the energy of the sun and the wind.

Proposed topics for discussion

1. What modifications can be offered for improving the method of calculating the economic costs of energy storage as suggested here?
2. How large is the demand for electric light in houses where conventional electrical power is not available? At what price could the owner of a small house afford to purchase solar- or wind- operated equipment which would supply one or more 50-watt lamps for three hours per day?
3. What realistic values should be used for calculating the cost of energy storage on a small scale by mechanical, electrical and chemical means?
4. What demand might be developed for small tractors and trucks operated on hydrogen from the electrolysis of water by solar- or wind- operated devices? Considering the possibilities

of reducing the number of farm work animals, what cost could be considered per kilowatt-hour?

5. What opportunities are available in the non-industrialized countries for financing small power-producing equipment and energy storage on the instalment plan?
6. Can the necessary technical skills be developed for the operation of solar-produced and wind-produced power and energy storage? Can these solar and wind devices and energy storage devices be manufactured in the non-industrialized countries? Can the simpler devices be made in the villages?
7. What efficiencies and prices for small units and large units can reasonably be expected for (a) storage batteries, (b) fuel cells, (c) water pumping, (d) electric motors, (e) hydrogen storage, and (f) hydrogen combustion engines?
8. The emphasis in this report has been on small units because the solar and wind energy is already distributed and large central stations are not required. The capital investments should be kept small for the non-industrialized countries. Nevertheless, the possibilities of large-scale production and storage of energy should be considered here. What suggestions can be offered for the practical storage of hundreds and thousands of kilowatt-hours of mechanical, electrical or chemical energy?
9. What other methods of storing energy should be considered, in addition to those reviewed here?
10. What suggestions can be made for lowering the cost of energy storage systems if they are to be used only in very small units (a fraction of a kilowatt) and operated with an ample amount of manual labour?

PROBLÈMES D'EMMAGASINAGE DE L'ÉNERGIE

(Traduction du rapport précédent)

Farrington Daniels, Rapporteur

L'emploi de l'énergie solaire ou éolienne à des fins autres que l'irrigation deviendra chose courante lorsqu'on aura trouvé des moyens pratiques d'emmagasiner cette énergie ou ses produits. Les recherches en vue de capter et d'accumuler l'énergie solaire en sont encore à leur stade initial, faute d'avoir suscité un intérêt suffisant. En effet, les pays les mieux placés pour entreprendre des recherches et réaliser des progrès dans ce domaine étaient amplement pourvus de combustibles et n'avaient guère besoin de nouvelles sources d'énergie. La présente conférence s'occupe des applications pratiques actuelles de l'énergie solaire ou éolienne et ne peut s'intéresser à la recherche scientifique fondamentale, car il s'écoule trop de temps entre les expériences de laboratoire et la fourniture de l'énergie au consommateur. Nous admettons également que la Conférence n'a pas à se préoccuper de l'avenir lointain où nos réserves de charbon, de pétrole et de gaz, facilement exploitables à l'heure actuelle, commenceront à diminuer.

L'emmagasinement de l'énergie solaire est un champ d'activité d'un intérêt si nouveau que ses applications économiques ne pourront être discutées à la présente séance que sur la base des données peu abondantes fournies par les expérimentateurs ou les constructeurs. Ces discussions devront avoir en vue les régions du globe qui actuellement ne sont pas suffisamment pourvues de combustibles et d'énergie électrique sous sa forme habituelle. En examinant l'économie de la production et de l'emmagasinement de l'énergie solaire ou éolienne, il importe de ne pas perdre de vue que les conditions économiques dont il faut tenir compte ne sont pas celles des pays hautement industrialisés, que les mises de fonds et les devises étrangères sont difficiles à obtenir, mais que la main-d'œuvre peut être relativement abondante.

Il importe aussi de souligner que l'on ne peut songer à produire de l'électricité à moins de 1 cent le kilowattheure, comme le font les puissantes centrales électriques à haut rendement dans les pays hautement industrialisés. Il n'est pas logique de comparer le prix de revient de l'énergie électrique produite par des centrales solaires de 1 kilowatt à celui des centrales de 100 000 kilowatts du type classique. L'électricité emmagasinée, provenant de l'énergie solaire ou éolienne, peut être produite par de toutes petites centrales de l'ordre de quelques kilowatts sans mises de fonds importantes. Ce système permet en outre de réaliser une économie

substantielle en supprimant les lignes de transport et de distribution à de nombreux petits usagers.

Le coût de l'énergie électrique ou mécanique emmagasinée peut dépasser de loin celui de l'énergie fournie directement, en raison du faible rendement et du coût de l'emmagasinement et de la libération ultérieure de l'énergie accumulée.

Le prix de revient total T d'un kilowattheure d'énergie électrique livrée après emmagasinement peut s'exprimer comme suit :

$$T = \frac{P}{e_s e_D} + \frac{M}{n} + \frac{I}{n} + \frac{C}{ny}$$

Dans cette formule,

P = prix de revient d'un kilowattheure d'électricité produite par l'énergie solaire ou éolienne;

e_s = rendement de l'emmagasinement;

e_D = rendement de la livraison ultérieure;

M = coût annuel de l'entretien et de l'exploitation de l'unité d'emmagasinement;

n = nombre de kilowattheures fournis par an après emmagasinement;

I = intérêt annuel du capital investi;

C = capital investi pour l'emmagasinement et la fourniture de l'énergie électrique; et

y = durée de vie utile, en années, de l'unité d'emmagasinement.

L'unité d'emmagasinement peut se composer de plusieurs éléments ayant chacun une durée de vie utile différente, et C/y représentent dans ce cas la somme des prix de revient unitaire divisés par la durée de vie utile correspondante.

Illustrons l'application de cette formule par deux exemples concrets. Supposons qu'un courant électrique produit au moyen de l'énergie solaire ou éolienne et coûtant 5 cents le kilowattheure charge un accumulateur au plomb de 12 volts à 10 ampères pendant 8 heures $1/3$ par jour en moyenne. Ainsi 1 kilowattheure est emmagasiné par jour et 365 kilowattheures par an. En estimant le rendement de l'emmagasinement à 90 p. 100 et celui de la récupération ultérieure à 80 p. 100, le nombre n de kilowattheures récupérables est de $365 \times 0,9 \times 0,8 = 263$. Le coût C de l'accumulateur est estimé à 25 dollars, soit 2 500 cents, et la durée de vie utile à deux ans. Le coût M de l'entretien et de l'exploitation est négligé, et les intérêts du capital investi sont estimés à 10 p. 100.

Nous avons alors :

$$T = \frac{5}{0,9 \times 0,8} + \frac{250}{263} + \frac{2\,500}{2 \times 263} = 12,6 \text{ cents}$$

Cette estimation des prix concorde bien avec celle d'Evans (GEN/3), mais est plus basse que celle de Bacon (GEN/9).

Comme second exemple, supposons que l'énergie solaire ou éolienne fournisse de l'électricité à 12 volts et 10 ampères pendant 8 heures 1/3 par jour produisant 1 kilowattheure qui est utilisé pour l'électrolyse de l'eau avec un rendement de 70 p. 100. L'hydrogène et l'oxygène emmagasinés servent alors à produire de l'électricité au moyen d'une cellule à combustible avec un rendement de 60 p. 100. Le nombre de kilowattheures fournis par an après emmagasinage sera dans ce cas de $365 \times 0,7 \times 0,6 = 153$. Le coût global du dispositif à électrolyse, de la cellule à combustible et du réservoir d'hydrogène et d'oxygène est estimé au double de celui de la batterie d'accumulateurs, c'est-à-dire à 50 dollars, et leur durée de vie utile à cinq ans. Il faut prévoir toutefois que le remplacement des électrodes et de leurs surfaces de catalyse représentera un coût annuel M de 2 dollars.

Nous avons alors :

$$T = \frac{5}{0,7 \times 0,6} + \frac{200}{153} + \frac{500}{153} + \frac{5\,000}{5 \times 153} = 23 \text{ cents}$$

Une estimation plus précise du coût des cellules à combustible a fait l'objet d'un examen approfondi par Bacon (GEN/9) et par Evans (GEN/3).

Il ressort de ces formules que le prix de revient dépend dans une large mesure du rendement des opérations d'emmagasinement et de récupération et de la durée de vie utile du matériel. Si l'emmagasinement doit se faire par pompage d'eau vers un réservoir situé plus haut, la formule fait ressortir le grand avantage que présenterait l'emploi de groupes plus importants, à rendement de pompage plus élevé. Si l'emmagasinement et la récupération doivent se faire par l'utilisation ultérieure d'un moteur thermique présentant une limitation du cycle de Carnot de 10 p. 100 environ, la faible valeur de e_p rend le prix de revient total T extrêmement élevé.

Un kilowattheure d'énergie fournie par un accumulateur peut faire fonctionner quatre lampes électriques de 50 watts pendant une heure, ou pomper 61 000 litres, soit 16 000 gallons d'eau à une hauteur de 10 pieds (soit 3 mètres) si le rendement global du moteur et de la pompe atteint 50 p. 100. Si une lampe de 50 watts fonctionne pendant trois heures tous les soirs en consommant 150 watts, cela coûtera, conformément à l'exemple ci-dessus, $0,15 \times 12,6$ cents, soit 1,9 cent, en admettant que le tout petit groupe de 0,15 kilowattheure par jour a le même rendement et revient au même prix relatif qu'un groupe de 1 kilowattheure. Cette supposition n'est évidemment valable qu'à titre d'approximation grossière.

Il est à espérer qu'au cours de la discussion, les participants fourniront des chiffres réels précisant

la valeur des différents coefficients que contient la formule du prix de revient pour les divers modes d'emmagasinement que nous allons examiner.

EMMAGASINAGE MÉCANIQUE

Le moyen le plus simple et le plus efficace d'emmagasiner l'énergie mécaniquement consiste à pomper l'eau vers un réservoir situé plus haut et à la laisser s'écouler à travers une turbine hydraulique quand on a besoin d'énergie électrique. Dans une région montagneuse, il est facile de pomper l'eau vers une citerne ou un bassin d'accumulation situé à un niveau plus élevé; ou bien on peut creuser un puits et placer la pompe et la turbine au fond. Dans certaines localités, on peut utiliser une mine abandonnée. Si un lac ou un port se trouve à proximité, on peut se servir d'une cloche à plongeur et pomper l'eau du fond vers la surface. Il va de soi que ce principe est parfois appliqué par de grandes centrales hydrauliques pour des quantités d'eau limitées, lorsqu'il existe des réservoirs d'eau à deux niveaux différents.

Une de ces centrales fonctionne à Austin, au Texas. Pendant les périodes de faible consommation, une centrale à vapeur pompe l'eau du niveau moins élevé vers le niveau plus élevé, et pendant les périodes de pointe, la centrale à vapeur et la centrale hydraulique fournissent le courant électrique directement. Pour les grandes pompes et turbines, le rendement est élevé, mais les turbines entraînent de petites pompes et celles dont la puissance n'atteint pas un kilowatt ont un rendement extrêmement bas, de l'ordre de 30 p. 100.

S'il faut prévoir un réservoir placé sur un support élevé ou une tour, la construction coûtera excessivement cher. L'emmagasinement mécanique de l'énergie exige des installations importantes. Un kilowattheure d'énergie emmagasinée équivaut à $3,67 \times 10^5$ kilogrammètres (ou à 96 900 gallons, soit 12 900 pieds cubes d'eau tombant d'une hauteur d'un mètre ou de 3,28 pieds). On peut prévoir des poids qui tombent dans un trou ou d'un axe rotatif sur une charpente élevée. Ces procédés ne peuvent avoir de valeur pratique que pour de très petites unités. Il faudrait 2 650 sacs de sable de 100 livres (soit 45,6 kilogrammes) tombant d'une hauteur de 10 pieds ou de 3 mètres pour emmagasiner 1 kilowattheure d'énergie. Un poids peut être monté par un moteur utilisant l'énergie solaire ou éolienne, qui fonctionne ensuite comme dynamo lorsque le poids redescend à son niveau initial. On peut aussi utiliser un poids tombant pour tirer une corde enroulée sur un axe et tourner la roue d'une pompe ou d'une autre machine. Il est également possible, à une petite échelle, d'emmagasiner l'énergie fournie par le soleil ou par le vent en tendant un ressort métallique enroulé et en le relâchant plus tard. L'énergie fournie par le soleil peut également servir à comprimer l'air dans un réservoir à pression, dont la détente ultérieure fera fonctionner une turbine ou un moteur à air comprimé.

BATTERIES D'ACCUMULATEURS

On possède une expérience approfondie de la fabrication et de l'emploi des batteries d'accumulateurs au plomb. Chaque auto en possède une. Ces batteries efficaces et coûtant sensiblement moins cher par kilowattheure que tout autre type d'accumulateur, doivent être utilisées dans des conditions favorables. Il faut qu'elles soient toujours bien remplies d'eau et qu'elles ne restent pas longtemps déchargées. Les batteries d'automobile sont bon marché parce qu'elles sont fabriquées en masse, mais elles doivent être compactes, robustes et portatives et capables en outre de fournir de fortes intensités de 50 ampères et même plus. En service normal, elles ne durent généralement pas plus de deux ans. Leur importante couche de surface, nécessaire pour produire les forts courants demandés, finit par se désintégrer et le peu d'espacement des plaques crée des difficultés.

Pour l'emmagasinement de l'électricité produite par l'énergie solaire ou éolienne, il doit être possible de simplifier la construction et d'abaisser le prix des batteries, celles-ci pouvant être plus grandes et ne devant pas être portatives ni prévues pour de très fortes intensités. Les batteries d'accumulateurs au plomb utilisées comme réserve par les centrales électriques durent bien plus longtemps, c'est-à-dire de 10 à 20 ans. Mais l'utilisation de batteries d'accumulateurs pour l'emmagasinement de l'énergie solaire ou éolienne présente un inconvénient du fait que les batteries doivent être presque complètement déchargées tous les jours. Dans ces conditions, leur durée de vie utile sera sensiblement plus courte. Les batteries d'automobile et celles des centrales électriques sont rarement déchargées à fond. Si, pour durer longtemps, les batteries ne doivent être déchargées qu'à moitié, il faudra doubler la capacité des batteries d'emmagasinement, ainsi que l'investissement initial.

Il existe de nombreux autres types de batteries d'accumulateurs, comme par exemple les batteries alcalines au fer-nickel et les batteries au nickel-cadmium qui sont plus efficaces et exigent moins de soins. Mais elles sont plus coûteuses. De grands efforts ont été déployés dans les recherches récentes consacrées aux batteries d'accumulateurs destinées aux véhicules spatiaux. Dans ces batteries on s'est attaché à emmagasiner le maximum de kilowattheures par livre ou par kilogramme de poids, tandis que nous n'avons pas à nous préoccuper du poids, mais du prix en dollars par kilowattheure.

Le coût des batteries d'accumulateurs dépend dans une large mesure de la durée de vie utile de la batterie. La formation sans cesse renouvelée d'un dépôt électrolytique solide pendant de nombreux cycles finit par désintégrer la structure du dépôt électrolytique. Il serait utile d'entreprendre des recherches en vue de réaliser des batteries d'accumulateurs à réduction et oxydation alternées des électrolytes en solution, sans la formation d'un dépôt électrolytique solide.

L'un des avantages de l'emploi de batteries d'accumulateurs consiste dans la possibilité de les charger en parallèle à de basses tensions de 2 volts environ au moyen d'un générateur solaire et de les décharger ensuite en série de façon à obtenir une tension élevée et un meilleur rendement pour l'utilisation du matériel électrique.

Evans (GEN/3) donne un tableau du coût des accumulateurs et examine les exigences que pose leur emploi intermittent. Il estime le coût annuel d'une batterie d'accumulateurs au plomb à 13,50 dollars par kilowattheure de capacité d'accumulation. Il fait remarquer que l'augmentation du coût et des dimensions en proportion directe de la capacité d'accumulation rend les installations importantes extrêmement coûteuses.

CELLULES A COMBUSTIBLES

Une pile électrochimique primaire, telle que celle d'une torche électrique, ne marche que jusqu'à épuisement des électrodes. Dans un accumulateur, l'élément déchargé est ramené à son état initial par le passage, dans le sens opposé, d'un courant électrique continu fourni par une source extérieure. Dans la cellule à combustible, les électrodes en provenance d'une source extérieure, sont fournies à la pile électrochimique au fur et à mesure de leur consommation pour la production du courant électrique. Les électrodes consommées lors du fonctionnement de la cellule sont souvent des gaz. La cellule à combustible la plus perfectionnée et dont l'examen présente le plus d'intérêt est la cellule employant le couple hydrogène-oxygène. L'électricité fournie par l'énergie solaire est utilisée pour l'électrolyse de l'eau et l'hydrogène ainsi que l'oxygène obtenus sont emmagasinés pour alimenter plus tard une cellule à combustible afin de produire de l'électricité en reformant de l'eau.

De nombreuses recherches sont consacrées actuellement à la réalisation de cellules à combustible, représentant une dépense annuelle de plusieurs millions de dollars rien qu'aux États-Unis et surtout dans l'industrie. Cette activité qui semble quelque peu disproportionnée par rapport aux résultats escomptés trouve un encouragement dans le haut rendement de la cellule à combustible (60 à 70 p. 100 de l'énergie chimique étant convertis directement en électricité), dans l'élimination des limitations thermiques du cycle de Carnot et dans le fait que la cellule ne comprend aucune partie mobile.

Il se pose de nombreux problèmes, notamment celui de l'exécution des surfaces de catalyse des électrodes et celui de l'évacuation de l'eau formée par les réactions. L'une des considérations les plus importantes d'ordre économique concerne la durée de vie utile des cellules. Actuellement, les surfaces de catalyse des électrodes tendent à devenir inactives après des centaines de cycles et la durée de vie d'une cellule à combustible pourrait bien être inférieure à un an. Ce sont là des difficultés auxquelles

il sera probablement possible d'apporter remède en poursuivant les recherches.

Pour l'emmagasinement de l'énergie solaire, l'efficacité de l'électrolyse de l'eau est de près de 100 p. 100 du point de vue de l'hydrogène et de l'oxygène obtenus par faraday ou par ampère-heure. Mais du point de vue du rendement énergétique, quelle que soit la quantité d'hydrogène et d'oxygène obtenue, l'efficacité de la production d'hydrogène par électrolyse est voisine de 70 p. 100. Il est possible de rendre le fonctionnement de la cellule plus simple et de supprimer l'emmagasinement d'oxygène en utilisant l'air au lieu d'oxygène, mais la cellule y perdra en rendement.

Il n'existe pas encore de données d'exploitation relatives aux cellules à combustible, mais la Conférence a l'avantage de disposer de deux rapports qui donnent l'estimation des prix de revient par un expert. Evans (GEN/3) décrit le fonctionnement de la cellule à combustible et analyse en détail les données relatives aux prix de revient. Pour la cellule seule, du type utilisant le couple hydrogène-oxygène à basse température, il estime le coût annuel par kilowatt à 75 dollars pour une puissance de 1 kilowatt ou au-dessus. Il prévoit que les progrès qui seront accomplis par la suite permettront de ramener ce coût à 30 dollars pour les unités de 1 kilowatt ou au-dessus et à 50 dollars pour les unités de 0,1 kilowatt. Il estime le coût annuel du dispositif d'électrolyse à 25 dollars par kilowatt et celui de l'emmagasinement sous pression dans des réservoirs permanents en acier à 0,50 dollar pour une capacité de 1 kilowatt-heure. Il examine l'effet des fluctuations saisonnières et journalières sur le débit.

Bacon (GEN/9) décrit en détail les conditions auxquelles doivent répondre la cellule à combustible et les dispositifs d'électrolyse et d'emmagasinement de gaz, et indique les prix de revient. Il préconise l'emploi de pressions moyennes. Ses prix d'estimation sont en général sensiblement plus élevés que ceux d'Evans. Il insiste sur les avantages importants de l'utilisation d'un dispositif d'électrolyse à pression moyenne (30 atmosphères) avec une cellule à combustible fonctionnant soit à 70 °C et à la pression atmosphérique, soit à 200 °C et à une pression de 20 à 40 atmosphères, dans des conditions qu'il a lui-même élaborées après des années de recherche. Il pense qu'actuellement le rendement global ne pourrait dépasser 50 p. 100, mais qu'en poursuivant les recherches on arrivera à obtenir un rendement bien plus élevé. Il estime l'investissement initial global (et non le coût annuel comme dans l'estimation d'Evans) à 325 dollars environ par kilowatt pour une installation de 100 kilowatts. Une évaluation particulièrement utile faite par Bacon est celle du coût de l'emmagasinement de gaz dans des réservoirs à basse pression, dans des cylindres d'acier à haute pression et dans des cavernes souterraines. Il préconise l'emmagasinement dans de longs tuyaux en acier à une pression de 100 atmosphères. Bacon arrive à la conclusion qu'il serait encore prématuré d'envisager sérieusement l'emploi de cellules à

combustible pour l'emmagasinement de l'énergie dans les pays économiquement sous-développés.

Les cellules à combustible utilisant le couple hydrogène-oxygène ne sont pas les seules à prendre en considération pour l'emmagasinement de l'énergie solaire. D'autres produits chimiques peuvent être obtenus par des procédés électrochimiques à l'aide de l'électricité fournie par l'énergie solaire ou éolienne, tels sont le zinc et l'aluminium. On peut les utiliser plus tard pour faire fonctionner une pile électrochimique primaire et les métaux peuvent ensuite être récupérés à partir des éléments de la pile usée. D'autre part, l'énergie solaire focalisée donne des températures élevées qui peuvent être utilisées pour opérer la dissociation thermique de composés chimiques en vue d'obtenir des produits dont la recombinaison électrochimique fournira de l'électricité.

Deux exposés intéressants qui seront examinés à la présente séance sont consacrés aux recherches théoriques et expérimentales explorant le domaine de ces cellules galvaniques thermiquement réversibles qui sont en quelque sorte des cellules à combustible à cycle fermé. On peut aussi les considérer comme des accumulateurs dont les éléments vidés sont rechargés non par un courant électrique extérieur, mais par une source extérieure de chaleur, telle que la lumière solaire focalisée.

McCully (GEN/6) a entrepris un examen thermodynamique approfondi des cellules galvaniques d'oxydes, hydrures, halures, carbures et nitrures susceptibles de régénération thermique à des températures appropriées, que l'on peut obtenir au moyen de l'énergie solaire et de réflecteurs paraboliques. Il pense qu'il est possible de choisir des systèmes réversibles capables de convertir directement en électricité 11 p. 100 de la chaleur absorbée à la température élevée. Il donne la description de deux cellules galvaniques particulièrement intéressantes, l'une contenant des oxydes de manganèse et d'argent, l'autre des chlorures d'antimoine et d'étain. La régénération thermique des composants électrochimiquement actifs permet d'emmagasiner de l'énergie. Le coût serait élevé à l'heure actuelle, mais baisserait considérablement en cas de fabrication en masse. On ne dispose pas de données sur la durée de vie utile.

Werner et Ciarlariello (GEN/14) présentent des cellules à combustible à régénération thermique d'hydrures, et notamment la cellule à l'hydrures de lithium fonctionnant à des températures jusqu'à 900 °C. L'hydrures de lithium est chauffé jusqu'à se décomposer en lithium liquide et en hydrogène. Lorsqu'il faut produire de l'énergie électrique, le lithium perd son électron et l'hydrogène reçoit un électron pour former un anion d'hydrures. Lors de l'utilisation de la cellule, un électron est transféré par un circuit extérieur de l'électrode d'hydrogène à l'électrode de lithium, fournissant ainsi un courant électrique pour produire du travail utile. L'hydrures de lithium se dissout dans la cellule en sel liquide pour former l'électrolyte conducteur. Si la régénération est plus rapide que la consommation du

lithium et de l'hydrogène dans la cellule, ceux-ci sont mis en réserve en vue d'un usage ultérieur dans le système à cycle fermé. On s'attend à un rendement de 8 à 13,8 p. 100 ce qui dépasse le rendement continu actuel des générateurs thermo-électriques, et la cellule à l'hydrure de lithium présente en outre l'avantage important d'emmagasiner l'énergie.

En choisissant la cellule galvanique à régénération thermique, Werner et Ciarlariello font observer que la variation de l'énergie libre ne doit pas être trop grande car l'écart des températures nécessaires pour assurer la réversibilité serait alors trop grand, ni trop petit, parce que la tension électrique de la cellule serait alors trop faible.

Des essais expérimentaux de cellules à hydrure de lithium ont été effectués, mais on ne dispose pas encore de données sur le prix de revient, la durée de vie utile et le nombre de cycles de ces cellules. Leur réalisation pratique semble possible dans un délai de deux à trois ans.

L'HYDROGÈNE UTILISÉ COMME COMBUSTIBLE

L'électrolyse de l'eau produisant de l'hydrogène est un des moyens les plus simples d'emmagasiner l'énergie solaire. Les installations d'électrolyse n'exigent pas un investissement initial important; leur durée de vie utile est très longue et la production de plus de 70 p. 100 de la quantité théorique d'hydrogène se fait sans le concours de machines et ne demande pas de personnel spécialisé. La manière la plus efficace d'utiliser l'hydrogène consiste à se servir de cellules à combustible, mais celles-ci ne sont pas encore au point.

On peut également utiliser l'hydrogène pour alimenter les moteurs à combustion interne. Rien ne semble s'opposer à l'adaptation des moteurs à combustion interne en vue d'utiliser l'hydrogène au lieu des produits du pétrole et du méthane, mais les recherches dans cette voie doivent être poussées plus avant. L'hydrogène a évidemment une chaleur de combustion assez faible si on se base sur le volume (274 BTU par pied cube contre 912 BTU par pied cube pour le méthane). Mais sa densité n'est que 1/8 de celle du méthane, et en se basant sur le poids, on voit qu'un gramme d'hydrogène a 2,4 fois la chaleur de combustion d'un gramme de méthane. L'hydrogène peut également être utilisé comme combustible avec l'air pour produire de la vapeur et de la chaleur pour faire marcher une machine ou une turbine à vapeur. On se rappellera d'après des constatations faites précédemment que le rendement des moteurs thermiques est limité et que ce rendement médiocre s'ajoutant au coût élevé de l'hydrogène, rend l'utilisation des moteurs thermiques extrêmement onéreux.

L'emmagasinement de l'hydrogène pour faire fonctionner des cellules à combustible ou des moteurs thermiques constitue un problème. L'hydrogène pourrait être emmagasiné dans de grands sacs en plastique ou des réservoirs de compression en acier, ou encore par déplacement d'eau. Il pourrait aussi

être emmagasiné sous pression dans de grandes mines abandonnées comme cela se fait déjà pour le gaz naturel (méthane). L'emmagasinement sous la forme d'un produit chimique liquide ou solide est tentant à cause du peu de volume qu'il demande. Le palladium peut contenir 800 fois son volume d'hydrogène, mais il est par trop coûteux. Des recherches en vue de trouver des procédés pratiques et réversibles d'hydrogénisation et de déshydrogénisation s'imposent. Il faudrait également faire des recherches sur les réactions organiques et non organiques avec l'hydrogène, réversibles par élévation de la température ou par réduction de la pression.

L'hydrogène peut être transporté sur de longues distances par pipe-line comme cela se fait déjà pour le gaz naturel. Ce transport n'est pas limité, comme celui de l'énergie électrique, à des distances de 300 à 400 milles. L'hydrogène peut être transporté en citernes ou sous forme de produits chimiques.

Il est à souhaiter que parmi les questions qui seront discutées au cours de cette séance, figure la possibilité d'utiliser l'hydrogène pour la propulsion de véhicules tels que les tracteurs ou de petits camions. Serait-il pratique d'effectuer des travaux agricoles ou des transports en se servant de cellules à combustible (ou bien de petits moteurs à combustion interne) utilisant l'hydrogène contenu dans des réservoirs de compression ou dans des ballons accrochés au véhicule propulsé? En utilisant un kilowattheure d'électricité pour l'électrolyse de l'eau à 1,7 volt on obtient 21 molécules-grammes d'hydrogène ce qui représente 252 litres occupant un volume de 8,9 pieds cubes. Si cet hydrogène était employé pour alimenter un moteur à combustion interne avec un rendement de 10 p. 100, il faudrait 10 fois autant d'hydrogène, soit 89 pieds cubes, pour produire un kilowattheure de travail utile. S'il était utilisé pour alimenter une cellule à combustible avec un rendement de 60 p. 100, il faudrait 1,66 fois autant d'hydrogène ou 14,8 pieds cubes pour produire un kilowattheure de travail utile à partir de l'hydrogène emmagasiné. Il serait possible de faire l'électrolyse de l'eau au moyen de l'énergie solaire ou éolienne pendant plusieurs heures et d'emmagasiner l'hydrogène obtenu dans un ballon, pour faire marcher un petit camion ou un tracteur pendant un court laps de temps. Ce procédé ne fournirait que peu de travail utile et aurait un rendement bien médiocre, mais il pourrait être appliqué sans avoir à dépenser de l'argent pour les combustibles à base de pétrole et permettrait de réduire le nombre de bêtes de trait et de rendre leur nourriture disponible pour les besoins de l'homme.

EMMAGASINAGE CHIMIQUE ET PHOTOCIMIQUE DE L'ÉNERGIE

L'hydrogène a été étudié en tant que moyen particulièrement important d'accumulation de l'énergie en raison de la simplicité et du faible coût de sa production par électrolyse et du fait que la matière

première, l'eau, est si facile à obtenir n'importe où. Il existe cependant beaucoup d'autres possibilités. L'hydrogène peut être emmagasiné et transporté sous forme d'ammoniaque obtenu par combinaison avec l'azote sous pression selon le procédé Haber. L'ammoniaque peut être oxydé pour donner de l'acide nitrique ou oxydé partiellement pour donner du nitrate d'ammonium qui renferme beaucoup d'énergie accumulée et s'emploie couramment comme explosif. D'autre part, il est possible de focaliser les rayons du soleil de manière à obtenir des températures de 2 100 °C, suffisantes pour combiner l'azote et l'oxygène (de l'air) pour produire le bioxyde d'azote. Refroidi à raison de 20 000 °C par minute, le bioxyde d'azote est recueilli et par la suite oxydé à l'air et combiné à l'eau pour donner de l'acide nitrique. Une autre possibilité consiste à combiner l'hydrogène avec l'anhydride carbonique obtenu par absorption du 0,03 p. 100 contenu dans l'air. Les deux gaz sous pression en présence d'un catalyseur produisent de l'alcool méthylique, qui peut être employé comme combustible. Les différents procédés chimiques proposés ci-dessus devraient être pratiqués à une très grande échelle.

Il existe la possibilité d'utiliser la lumière solaire pour la production directe, par la photochimie, de produits chimiques riches en énergie. En fait, tous nos aliments et combustibles actuels sont un produit de la photosynthèse des hydrates de carbone de l'eau et de l'anhydride carbonique de l'air.

L'emmagasinement pratique de l'énergie solaire par des moyens photochimiques pose plusieurs conditions. La réaction photochimique doit absorber de l'énergie et pouvoir se refaire plus tard en sens inverse en libérant de l'énergie. Une au moins des matières réagissant photochimiquement doit absorber une partie importante de l'énergie solaire de préférence la plus grande partie de la lumière visible, et la réaction photochimique doit avoir un rendement élevé, de l'ordre d'une molécule réagissant pour chaque photon absorbé. L'emmagasinement d'énergie doit être suffisamment important, représentant au moins 50 à 100 calories par gramme. Enfin, la réaction inverse doit se faire exactement au rythme voulu, assez rapide pour qu'elle soit efficace et pourtant pas assez rapide pour que la réaction s'achève pendant le temps d'exposition. On connaît bien peu de réactions photochimiques qui remplissent toutes ces conditions. L'état actuel de la question a été résumé dans un rapport sur « La photochimie des phases liquides et solides » du sous-comité pour l'emmagasinement photochimique de l'énergie du Conseil national de recherches de l'Académie nationale des Sciences des États-Unis, publié par John Wiley et Fils, New York.

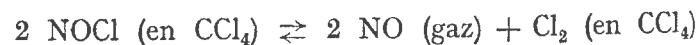
Bien qu'aucune solution pratique ne soit encore en vue, il est intéressant de constater que la photosynthèse dans la nature prouve que le but n'est pas impossible à atteindre et que si une réaction photochimique appropriée pouvait être découverte, il serait possible en théorie, en s'en tenant à des hypothèses raisonnables, d'obtenir trois tonnes de

produits photochimiques par acre (0,4 hectare), par jour de bon ensoleillement, alors qu'en agriculture normale dans les climats tempérés on ne peut s'attendre qu'à un rendement de deux à trois tonnes environ par an.

Une méthode d'emmagasinement photochimique de l'énergie a été proposée par Marcus et Wohlers (GEN/2). Ces chercheurs font usage d'un four solaire convergent à très haute concentration d'énergie pour étudier la photolyse de l'eau et la photolyse du chlorure de nitrosyle dans des récipients en quartz. Ils signalent que les systèmes réagissant photochimiquement sont transparents à la plus grande partie du rayonnement solaire et que les solutions aqueuses dans les récipients de réaction en quartz ne s'échauffent pas. La lumière ultraviolette et la lumière visible à ondes courtes sont cependant si intenses qu'il est facile de faire des mensurations quantitatives des réactions, et la méthode permettrait d'obtenir des produits photochimiques à une échelle assez ample.

La photodécomposition de l'eau libérant de l'oxygène, catalysée par des ions cériques, a été établie, mais on n'a pas recueilli de preuves d'une photodécomposition de l'eau libérant de l'hydrogène, catalysée par des ions céreux. Le rendement quantique ou photochimique de cette réaction est si bas et la quantité de lumière ultraviolette active dans la lumière solaire est si faible que la photolyse de l'eau par la lumière du soleil se réduit à peu de chose. Il y a quelques années, on avait exprimé l'espoir que ces réactions pourraient produire des quantités suffisantes d'hydrogène et d'oxygène pour qu'on puisse les emmagasiner et les utiliser plus tard pour alimenter des cellules à combustible ou des moteurs thermiques.

L'autre réaction expérimentée par Marcus et Wohlers avait été proposée pour l'emmagasinement de l'énergie solaire parce qu'elle absorbe la plus grande partie de la lumière solaire, de 3 000 à 6 300 angströms, et la décomposition se fait avec un rendement photochimique élevé et avec absorption d'énergie.



Les produits de la réaction peuvent être emmagasinés séparément et combinés plus tard pour reformer du chlorure de nitrosyle avec dégagement de chaleur. Les réactions ont lieu dans une solution de tétrachlorure de carbone et les produits sont séparés dès leur formation parce que le bioxyde d'azote produit est insoluble dans le tétrachlorure de carbone. Cette séparation automatique des produits qui les empêche de se recombiner prématurément est une caractéristique importante de cette réaction.

Il a été proposé de recombiner le bioxyde d'azote et le chlore dans une cellule à combustible de manière à produire de l'électricité et non de la chaleur, mais aucun résultat n'a été publié jusqu'ici. Marcus et Wohlers signalent un emmagasinement d'énergie de 1,71 p. 100 dans un système à écoulement, et de 0,18 p. 100 dans un système statique où le chlore

et le bioxyde d'azote se recombinent photochimiquement avant que le bioxyde d'azote ne puisse s'échapper sous forme de gaz. Cette réserve d'énergie se rapproche de celle qui provient de l'emmagasinement de l'énergie par photolyse dans les plantes en exploitation agricole normale. Mais les caractéristiques favorables de cette réaction ne compensent que dans une faible mesure le fait que la réaction du chlore avec le bioxyde d'azote libère relativement peu d'énergie.

Les auteurs envisagent la possibilité d'opérer la photolyse du chlorure d'argent liquide pour obtenir de l'argent et du chlore. Ceux-ci se recombinent dans des conditions favorables et en libérant une grande quantité d'énergie. Il serait utile d'expérimenter d'autres réactions photochimiques endothermiques qui ont un bon rendement photochimique à la lumière solaire et qui s'opèrent à la vitesse requise. La création de produits photochimiques qui peuvent être emmagasinés et combinés par la suite dans une cellule galvanique serait riche de promesses à condition de trouver des réactions appropriées. Il semble que parmi les réactions photochimiques connues à l'heure actuelle aucune ne mérite d'être étudiée du point de vue économique à la présente conférence. Même l'emploi immédiat de sous-produits forestiers ou agricoles pour alimenter les moteurs thermiques ne peut présenter d'intérêt du point de vue économique que dans des cas particuliers, étant donné le faible rendement de la photosynthèse, le coût élevé du ramassage et du transport des matières en question et le fait que celles-ci pourraient bien être plus précieuses pour un autre usage que comme combustible.

Une autre manière d'emmagasiner l'énergie solaire au moyen de réactions chimiques est celle proposée par Melzer (GEN/13). Melzer signale que les abondantes ressources végétales que représentent les palmiers babassu au Brésil peuvent servir à produire du gaz par distillation thermique, les résidus charbonneux étant utilisés avec de la vapeur de manière à produire du gaz à l'eau. Il examine la possibilité d'installer plusieurs centrales d'une puissance pouvant atteindre 150 kilowatts, réparties dans les régions riches en palmiers et qui sont éloignées des lignes de transport d'énergie électrique. Le bilan thermique est toutefois légèrement insuffisant et Melzer se propose de fournir aux chambres de chauffe un appoint d'énergie solaire focalisée. Il compte utiliser un grand miroir, de 15 mètres sur 15 mètres, se composant de petits miroirs carrés, disposés à 30 mètres du four et concentrant la lumière dans un cône qui pénètre dans la chambre de chauffe par un orifice de 1,5 mètre de diamètre. La chambre est verticale et le faisceau horizontal de lumière solaire focalisée est réfléchi verticalement vers le bas par un miroir en aluminium. Il n'est pas cité de données expérimentales ni de prix estimatifs. La construction et la mise au point d'un grand miroir de 15 mètres de côté permettant d'obtenir un foyer virtuel de 1,5 mètre à une distance de 30 mètres ne seront pas faciles. L'investissement initial et les

frais d'exploitation pourraient rendre trop coûteux tout gain de chaleur réalisé grâce au collecteur solaire.

EMMAGASINAGE DE LA CHALEUR

L'emmagasinement de l'énergie solaire sous forme de chaleur sera examiné à une séance ultérieure de cette conférence, mais il y a lieu de remarquer dès maintenant que l'emmagasinement de la chaleur à haute température, destinée à être convertie plus tard en travail par un moteur thermique ou un autre dispositif, mériterait d'être examiné du point de vue technique comme du point de vue économique. La lumière solaire concentrée peut donner de la chaleur à haute température à bien meilleur compte qu'elle ne peut fournir de l'énergie électrique ou mécanique. La chaleur à température élevée se perd très rapidement à moins que le dispositif d'emmagasinement ne soit extrêmement bien isolé. Un lit de galets de matières réfractaires se réchauffe très bien à l'air chaud. S'il est entièrement isolé, il retiendra longtemps la chaleur, parce que les galets ne se touchent que sur des surfaces réduites et la conduction latérale de chaleur au travers du lit de galets est faible. Il y a quelques années, Hütter a émis l'idée que la chaleur produite par le soleil ou par un courant électrique fourni par l'énergie solaire ou éolienne, pourrait être efficacement emmagasinée dans une grande sphère isolée en fer et utilisée pour réchauffer des fils de thermocouples ou des liquides alimentant un moteur. La grande capacité thermique et le faible rapport de la surface au volume dans une sphère réduisent au minimum les effets de déperdition de chaleur.

RÉSEAU ÉLECTRIQUE

S'il existe un réseau de distribution commerciale d'électricité s'étendant sur une vaste région, il peut être utilisé pour absorber l'électricité produite au moyen de l'énergie solaire ou éolienne et transformée en courant alternatif. Pendant que le réseau d'énergie reçoit l'appoint intermittent de ces sources de courant, la production classique d'électricité par les centrales thermiques ou hydrauliques peut se faire à un rythme ralenti, les frais d'exploitation baissant en conséquence.

CONCLUSIONS

La question soumise pour examen à la présente séance est celle de l'état actuel des techniques d'emmagasinement d'énergie. Diverses possibilités de développement futur de ces techniques ont été suggérées sans qu'elles fassent l'objet de documents officiels soumis à la Conférence.

Les mémoires à examiner comprennent deux communications sur la cellule à combustible hydrogène-oxygène, deux sur les cellules à combustible à régénération thermique, un sur l'emmagasinement photochimique de l'énergie et un sur la production de gaz combustibles par distillation avec appoint

d'énergie solaire. Les discussions ne devraient pas se limiter au contenu de ces documents.

Dans ce rapport général, on a insisté sur l'emploi de petites unités d'emmagasinement d'un kilowattheure environ parce qu'elles peuvent être réalisées sous une forme si simple que leur prix ne sera guère supérieur à celui des animaux de ferme et leur exploitation ne nécessitera pas de connaissances spéciales. Ces unités sont prévues pour l'usage d'une seule famille. Mais il appartient à la Conférence d'envisager l'utilisation éventuelle d'unités bien plus importantes qui seraient destinées à desservir les services publics d'un village ou encore des installations industrielles ou communales. Il est à espérer que l'examen portera également sur des unités plus petites encore, de moins d'un kilowatt. De si petites unités reviennent plus cher par kilowatt, mais dans des conditions économiques où le capital est extrêmement difficile à obtenir et où, par contre, la main-d'œuvre est abondante, il peut être rentable de prévoir un matériel simplifié qui ne serait pas pris en considération dans un pays industrialisé.

Il est clair qu'il n'y a pas lieu de s'attendre dans l'immédiat à de nouveaux progrès technologiques en matière d'emmagasinement de l'énergie, susceptibles de se traduire par des progrès économiques sensationnels. Mais les progrès accomplis en recherche scientifique fondamentale sont encourageants et il y a lieu d'espérer qu'ils finiront par prendre corps sous la forme de dispositifs utiles. Il reste beaucoup à faire dans les domaines de la recherche et de la construction pour en arriver aux applications pratiques. La présente Conférence peut apporter une contribution importante au développement économique de quelques-unes des régions les moins industrialisées du globe en déterminant les besoins et les caractéristiques auxquels doivent répondre les dispositifs qui emmagasineront utilement l'énergie solaire ou éolienne.

Sujets proposés pour la discussion

1. Quelles modifications peut-on envisager pour améliorer la méthode proposée dans ce rapport pour le calcul du coût de l'emmagasinement de l'énergie?
2. Quelle est l'ampleur des besoins en éclairage électrique dans les maisons où l'on ne dispose pas de l'énergie électrique sous sa forme habituelle? A quel prix le propriétaire d'une petite maison pourrait-il se permettre d'acquérir un dispositif marchant à l'énergie solaire ou éolienne, capable d'alimenter une ou plusieurs lampes de 50 watts pendant trois heures par jour?

3. Sur quelles valeurs effectives faut-il fonder le calcul du coût de l'emmagasinement de l'énergie à une petite échelle par des moyens mécaniques, électriques ou chimiques?
4. Quelle ampleur pourrait prendre la demande de petits tracteurs ou camions marchant à l'hydrogène obtenu par électrolyse de l'eau opérée au moyen de dispositifs utilisant l'énergie solaire ou éolienne? Compte tenu de la possibilité de réduire le nombre de bêtes de trait, quelle dépense pourrait-on envisager par kilowattheure?
5. Quelles sont, dans les pays non industrialisés, les possibilités de financement de petites unités de production de force motrice et d'emmagasinement d'énergie, sur la base de paiements échelonnés?
6. Les utilisateurs pourront-ils acquérir l'habileté technique nécessaire pour se servir des dispositifs de production ou d'emmagasinement d'énergie utilisant l'énergie solaire ou éolienne? Ces dispositifs peuvent-ils être fabriqués dans les pays non industrialisés? Les dispositifs plus simples peuvent-ils être fabriqués dans les villages?
7. A quels rendements et à quels prix des petites unités et des grandes unités peut-on raisonnablement s'attendre pour a) les batteries d'accumulateurs, b) les cellules à combustible, c) le pompage d'eau, d) les moteurs électriques, e) l'emmagasinement d'hydrogène et f) les moteurs à combustion d'hydrogène?
8. Dans ce rapport, on a insisté sur l'emploi de petites unités parce que l'énergie solaire et l'énergie éolienne sont déjà distribuées et les grandes centrales ne sont pas nécessaires. Les investissements initiaux doivent être maintenus à un niveau suffisamment bas pour les pays non industrialisés. Néanmoins, il y a lieu d'examiner également la possibilité de produire et d'emmagasiner l'énergie à une grande échelle. Quelles propositions peut-on faire en vue d'un emmagasinement effectif de centaines et de milliers de kilowattheures d'énergie mécanique, électrique ou chimique?
9. Quelles autres méthodes d'emmagasinement de l'énergie y a-t-il lieu d'examiner en plus de celles déjà passées en revue?
10. Quelles propositions peut-on faire en vue d'abaisser le coût des systèmes d'emmagasinement de l'énergie, s'ils sont destinés à être utilisés uniquement en petites unités (de moins d'un kilowatt) et exploités à l'aide d'une main-d'œuvre abondante?

ENERGY STORAGE PROBLEMS

Rapporteur's summation

Although solar energy and wind power have the advantage of practicality in small units and their utilization does not incur the cost of fuel transportation and electricity distribution, they do have the great disadvantage of interrupted power and require expensive equipment for storage.

One of the papers presented a formula for calculating costs of energy storage. It indicated that, if the costs of sun- or wind-produced electricity is five cents per kilowatt-hour, the cost of electricity delivered from a storage battery will be thirteen cents and that from a small fuel cell twenty-three cents. In some cases, however, the value of the electricity is much greater than what can be expressed in terms of cents per kilowatt-hour.

With large solar-and wind-operated dynamos the best way of storing the electricity is to feed it into an electric power grid.

Hydraulic storage is simple and effective on a large scale, if the topography of the area is such as to provide a water reservoir at a higher level. The water is first pumped up into the reservoir, and the energy is recovered by running the water down through a water turbine. In small units, though, the water pumps and motors are very inefficient, perhaps 30 per cent in the 100-watt size.

Lead storage batteries are readily available and efficient, but active research should be directed toward simpler and cheaper batteries with longer life.

A great deal of research is being conducted with fuel cells, into which fresh chemicals are introduced to replace those which have been consumed in the production of electricity. The hydrogen-oxygen fuel cell is particularly important for solar and wind energy, because it can be used easily to electrolyse water, the hydrogen can be stored and transported and later used with air to produce electricity with an efficiency of 60 per cent.

Two authoritative papers discussed the costs of storing electricity in storage batteries and fuel cells. Batteries appear to be better for small units and fuel cells for large ones. There was argument about the cost of storing compressed hydrogen, but it was pointed out that the electrolysis of water can be arranged so that the hydrogen is delivered at a moderately high pressure without the use of compression pumps. One difficulty is the deterioration

of the catalytic surfaces of the electrodes, which require reactivation after a year of operation.

The transportation of hydrogen and the use of hydrogen in engines and in the production of transportable fuels, such as methanol and ammonia, are other aspects of the subject that were mentioned.

The view was expressed that, although fuel cells appear promising for the near future, they are not yet quite ready for recommendation to the developing nations. The industrialized nations need to do further research and development before encouraging the less industrialized ones to gamble on them.

Closed-cycle fuel cells, in which the renewable fuel is produced internally by heating and chemical decomposition, were described.

A valuable statistical study was presented on the storage of solar energy. It appears that prediction for storage capacity needs is not simple.

One paper on photochemical storage of solar energy gave an efficiency of 1.7 per cent. Theoretically, photochemical storage should be effective: all our fuels and foods have been made through photosynthesis with sunlight. No large-scale practical photochemical storage system is yet in sight.

One paper described the generation of electricity by producing combustible gases from the distillation of the babasu palm, using supplementary solar heating. The abundance of this material offers the possibility of a large power source in regions where electrical power is not now available.

It was pointed out that research might well be directed toward developing a fuel cell utilizing waste organic material and air for the direct production of electricity.

Electrical energy can also be stored by storing heat for subsequent power production. Solar ponds were described, in which a large quantity of water after many days reaches temperatures high enough to operate a vapour turbine continuously, day and night. The hot water is kept at the bottom of the pond by using a layer of highly concentrated salt solution, which will not rise to the top when heated. Thus, the heat loss from the surface is minimized.

The storage of energy can be readily effected now, but it is expensive. Data are available for many different systems, but, as in most branches of solar energy utilization, more research and development, as well as testing in the field, will be needed.

PROBLÈMES D'EMMAGASINAGE DE L'ÉNERGIE

Résumé du rapporteur

Si l'énergie solaire et l'énergie éolienne présentent l'avantage pratique de pouvoir être captées dans de petites centrales et si leur utilisation n'entraîne pas de frais de transport de combustible ni de distribution d'électricité, elles ont en revanche le grand inconvénient d'avoir un débit discontinu et d'exiger un matériel coûteux pour l'emmagasiner.

Dans l'un des mémoires, on a présenté une formule pour calculer le coût de l'emmagasiner d'énergie. On y indique que, si le coût de l'électricité produite par l'énergie solaire ou l'énergie éolienne est de 5 cents par kilowattheure, le coût de l'électricité provenant d'une batterie d'accumulateurs sera de 13 cents et celui de l'électricité produite au moyen d'une petite cellule à combustible sera de 23 cents. Quelquefois, cependant, la valeur de l'électricité est supérieure à ce qui peut être exprimé en cents par kilowattheure.

Dans le cas des grandes dynamos mues par l'énergie solaire ou l'énergie éolienne, le meilleur moyen d'emmagasiner l'électricité est d'alimenter un réseau de distribution d'électricité.

L'emmagasiner hydraulique est simple et efficace lorsqu'il est pratiqué à grande échelle, si la topographie de la région permet de disposer d'un réservoir d'eau situé à un niveau plus élevé. On pompe d'abord l'eau vers le réservoir, puis on la laisse s'écouler à travers une turbine hydraulique pour récupérer l'énergie. Dans les petites installations, cependant, les pompes hydrauliques et les moteurs ont un rendement très faible, de l'ordre de 30 p. 100 dans les centrales de 100 watts.

Les batteries d'accumulateurs au plomb sont efficaces et il est facile de se les procurer, mais il faudrait entreprendre des recherches pour réaliser des batteries d'accumulateurs plus simples, meilleur marché et durant plus longtemps.

De nombreuses recherches sont consacrées aux cellules à combustible, où l'on introduit de nouveaux produits chimiques pour remplacer ceux qui ont été consommés pour la production d'électricité. La cellule à combustible employant le couple hydrogène-oxygène présente un intérêt particulier pour l'énergie solaire et éolienne, car il est facile de s'en servir pour l'électrolyse de l'eau, l'hydrogène peut être emmagasiné et transporté, puis utilisé avec de l'air pour produire de l'électricité avec un rendement de 60 p. 100.

Dans deux mémoires qui font autorité, on examine le coût de l'emmagasiner d'électricité dans des batteries d'accumulateurs et des cellules à combus-

tible. Il semble que les batteries soient préférables pour les petites installations et les cellules à combustible pour les grandes. La question du coût de l'emmagasiner d'hydrogène comprimé a soulevé des difficultés, mais on a fait observer que l'électrolyse de l'eau peut être effectuée de manière que l'hydrogène produit ait une pression assez élevée sans qu'on soit obligé d'utiliser des pompes pour le comprimer. L'altération des surfaces de catalyse des électrodes présente un inconvénient, car il faut les réactiver chaque année.

La question du transport de l'hydrogène et celle de son utilisation dans des moteurs et pour la production de combustibles transportables comme le méthanol et l'ammoniac ont également été mentionnées.

On a estimé que, si l'on peut envisager d'obtenir avec les cellules à combustible des résultats prometteurs dans l'avenir immédiat, elles ne sont pas encore suffisamment au point pour qu'on puisse les recommander aux pays en voie de développement. Les pays industrialisés devront procéder à de nouvelles recherches et réaliser d'autres progrès avant d'encourager les pays peu industrialisés à essayer d'utiliser les cellules à combustible.

On a décrit des cellules à combustible à cycle fermé, où le combustible renouvelable est produit à l'intérieur au moyen de la chaleur et par décomposition chimique.

Une étude statistique très intéressante a été présentée sur l'emmagasiner de l'énergie solaire. Il semble qu'il n'est pas facile de prévoir quelle quantité d'énergie devra être emmagasinée.

Dans un mémoire sur l'emmagasiner photochimique de l'énergie solaire, on indique un rendement de 1,7 p. 100. Théoriquement, l'emmagasiner photochimique devrait avoir un rendement élevé : tous nos combustibles et nos aliments sont produits par photosynthèse au moyen de la lumière solaire. On n'est pas encore près de mettre au point un système d'emmagasiner photochimique pratique de grande envergure.

Un mémoire explique comment on peut produire de l'électricité au moyen de gaz combustibles provenant de la distillation de palmiers babassu en utilisant, en outre, la chaleur solaire. En raison de leur abondance, ces arbres peuvent constituer une source d'énergie importante dans les régions qui ne disposent pas d'énergie électrique.

On a fait observer que l'on pourrait effectuer des recherches en vue de mettre au point une cellule

à combustible utilisant des déchets organiques et de l'air pour la production directe d'électricité.

L'énergie électrique peut également être emmagasinée sous forme de chaleur pour la production ultérieure d'électricité. On a décrit des bassins pour l'emmagasinage d'énergie, où de grandes quantités d'eau atteignent, au bout d'un temps assez long, des températures suffisamment élevées pour actionner une turbine à vapeur en permanence, jour et nuit. L'eau chaude est maintenue au fond du bassin au

moyen d'une couche de solution saline très concentrée qui ne monte pas à la surface lorsqu'on la chauffe. On élimine ainsi la perte de chaleur à la surface.

L'emmagasinage d'énergie est maintenant réalisable, mais il est coûteux. On dispose de données sur un grand nombre de systèmes différents mais, comme pour la plupart des aspects de l'utilisation de l'énergie solaire, il est nécessaire de poursuivre les recherches et de réaliser de nouveaux progrès, et aussi d'effectuer des essais sur le terrain.

ENERGY STORAGE BASED ON ELECTROLYSERS AND HYDROGEN-OXYGEN FUEL CELLS

F. T. Bacon, M.A., A.M.I.Mech.E.

National Research Development Corporation
London

Where electricity is being generated from wind-driven generators or from solar energy, it becomes very desirable to incorporate some storage device, and it has been suggested that the combination of electrolyzers and hydrogen-oxygen fuel cells could provide this need. It is necessary therefore to consider precisely how this would be done in practice, particularly as the utility of the system may be largely determined by the overall capital cost, and also to a secondary extent by the energy efficiency achieved.

AC-DC CONVERSION

If an AC system is being used, then a rectifier-inverter would have to be installed. It is obvious that a DC system would be preferable, owing to the lower capital cost and also to the losses involved in this double conversion. As regards efficiency, it has been suggested that a figure of about 90 or 95 per cent could be taken for a mercury arc rectifier, and 98 per cent for a large rectifier-inverter installation of the semi-conductor type.

ELECTROLYSER PLANT

Up till the present time it has not been found possible to combine the functions of electrolyser and current generating cell in one apparatus, although in the author's opinion, this will be achieved in course of time. In regard to some types of hydrogen-oxygen fuel cell, it has been claimed that this can be accomplished, but as far as is known, these have not got beyond the laboratory stage. It must be assumed therefore that at present a separate electrolyser plant would be required. A great technical advance in electrolyser design took place a few years ago with the introduction of the Zdansky-Lonza electrolytor,¹ now made by the Lurgi Company. This operates at a pressure of about 30 atmospheres (440 pounds per square inch) and a voltage per cell of the order of 1.72 to 1.76 volts at a reasonable current density. Units with a power consumption as high as 3,000 kilowatts, and even larger, have been constructed. It would of course also be possible

to employ the older type of electrolyser operating at about atmospheric pressure, but the voltage per cell is actually higher than the high pressure type and is of the order of 1.8 to 2.0 volts; moreover, if the gases are to be stored under pressure, the cost of compression would be greatly increased. It is well known that a successful electrolyser operating at 204 atmospheres (3,000 psi) has been constructed in America for the United States Navy;² it is believed that this has been very successful, but no attempt has been made to evolve an economic design.

All types of electrolyser and many types of fuel cell possess the great advantage that they can be seriously overloaded if necessary; the efficiency is somewhat reduced, but there are no other ill effects.

GAS STORAGE

The simplest, though not necessarily the cheapest, method of gas storage would undoubtedly be to use an electrolyser working at atmospheric pressure, and supplying the two gases to ordinary gas holders of the variable volume type, also at sensibly atmospheric pressure; about 17 cubic feet of hydrogen and 8.5 cubic feet of oxygen, at atmospheric temperature and pressure, are required to generate one kilowatt-hour, assuming 0.92 volt per cell. Two other methods can be considered, one a constant volume system and the other a constant pressure system, but both at a substantially higher pressure than atmospheric. With the former method, two compressors would be required for compressing the hydrogen and the oxygen from the electrolyser pressure of either one or, say, 30 atmospheres (440 psi) to the storage vessel pressure of, say, 136 atmospheres (2,000 psi) or possibly 204 atmospheres (3,000 psi). The energy used in the compression of the gases would be of the order of five per cent of the energy input to the electrolyser for compression from one to 136 atmospheres, and about one per cent for compression from 30 to 136 atmospheres. The gas could be stored in forged steel cylinders of the usual type. Alternatively, it has been suggested that it could be stored in long lengths

¹ See A. E. Zdansky, "The electrolytic production of hydrogen under pressure" (in German, with a summary in English), *World Power Conference*, Eleventh sectional meeting, Belgrade, 1957, section B.5, paper 3.

² R. Spitzer, "High pressure electrolytic oxygen generator for submarine service", *Electrochemical Society, Philadelphia meeting* (5 May 1959).

of high-tensile steel pipe, as used for pipe-lines, on what might be called a "pipe-farm". This could be obtained for a working pressure of, say, 100 atmospheres (1,470 psi) and as it is manufactured on a large scale, the cost should be comparatively low. Moreover, if the electrolyser station were situated at some distance from the fuel cell installation, the pipe-lines themselves would provide considerable storage capacity.

With the constant pressure system, which has been considered for storage on a very large scale, underground caverns would be constructed. It is assumed that they would not have to be lined. They would be of the liquid seal type, and would be largely filled with water when the storage system was in the discharged state. As the two gases are generated in the electrolyser plant, the water in the two caverns would be gradually expelled through pipes leading to the surface, where it would be stored in a reservoir until required again. If the storage pressure is 30 atmospheres, as previously suggested, then the caverns would have to be approximately 1,000 feet below the level of the water in the surface reservoir.

FUEL CELL PLANT

Two types of fuel cell could be considered for the kind of service required, the type which operates at atmospheric temperature up to about 70°C and usually at about atmospheric pressure (a good example being the Union Carbide cell) and the type working at 200°C and at about 20 to 41 atmospheres (300 to 600 psi). It is the latter type with which the author has been associated over many years. Both types have been described many times before³ and it is not necessary therefore to give a detailed description. The low-temperature type usually employs electrodes of porous carbon, but sometimes of porous metal for example, nickel the other type has electrodes of porous nickel and both use aqueous electrolytes of potassium hydroxide. Units of the low-temperature type of a capacity as large as one kilowatt have been demonstrated, and units of the other type to about 6 kilowatts. In addition to this, a unit of the low-temperature type as large as 15 kilowatts has been demonstrated in the United States, driving a farm tractor. It is believed that this operated essentially on hydrogen and oxygen. As far as is known, no fuel cell of any size has yet been fully engineered, and none are yet on the market, though a few small units have been developed for special military purposes in the United States. Great advances are continually being made in the field of fuel cells, and research and development on a very large scale is going on in many parts of the world, notably in the United States of America. To take an example of recent advances, the performance of the cell with which the author is associated has been improved by a factor of three quite recently,

and current densities of 350 amperes per square foot (377 milliamperes per square centimetre) at 0.9 volt, 679 amp per sq ft (732 ma per sq cm) at 0.8 volt, and 1,707 amp per sq ft (1,838 ma per sq cm) at 0.6 volt have been achieved at 200°C and a pressure of 41 atmospheres. This means that previous estimates of capital cost can be substantially reduced, or, if preferred, lower operating temperatures and pressures can be adopted.

The ion exchange membrane cell, developed in the United States by the General Electric company, is essentially reversible, but the high capital cost and relatively low performance probably make it unsuitable for the present purpose. Mention should also be made of the cell recently developed by Shell Research Ltd. in England, though details of the electrodes have not yet been published.⁴

OVER-ALL EFFICIENCY OF THE DOUBLE PROCESS

It must at once be conceded that the over-all efficiency of the whole charge-discharge process is likely to be considerably lower, as far as can be seen at present, than that usually quoted for both acid and alkaline storage batteries, which are usually given as 75 per cent and 55 to 60 per cent, respectively. Nor is it likely to be able to compete with a large-scale pumped water storage scheme, the over-all efficiency of which is about 70 per cent.

The current efficiency of both electrolysers and hydrogen-oxygen fuel cells is normally high, a figure of 98 to 99 per cent has been quoted for the low pressure type of electrolyser, and 98 per cent for a medium temperature hydrogen-oxygen fuel cell with two cells in series. As a first approximation the current efficiencies will be neglected; it is mainly the voltage efficiencies which are still rather low. As previously stated, the voltage per cell in the medium pressure electrolyser is about 1.72 to 1.76 volts at the usual current density, which may be about 130 amp per sq ft (140 ma per sq cm).

The fuel cell voltage will also of course depend on the current density; until recently it has been thought that it would be economic to work at 0.8 volt per cell; but it is a fact that recent improvements in electrodes at Cambridge have shown that a current density of 280 amp per sq ft (301 ma per sq cm) which was previously attained at a cell voltage of 0.8 volt, can now be obtained at 0.92 volt. The over-all voltage efficiency could under these circumstances be about $0.92/1.72 \times 100 = 53.5$ per cent. It would probably be safe to say that an over-all energy efficiency of about 50 per cent could be obtained at the present time, using reasonable current densities in both electrolysers and cells.

If, as seems likely at present, the two gases to be compressed from the electrolyser pressure of 30 atmospheres to the storage vessel pressure of, say, 136 atmospheres, a further small loss will occur,

³ G. J. Young, "Fuel cells", American Chemical Society. Division of gas and fuel chemistry; Fuel cells, a symposium held by the Division at Baltimore (New York, Reinhold, 1960).

⁴ K. R. Williams, "The fuel cell for transport", *The New Scientist* (London), 4 August 1960.

but it seems likely that an over-all energy efficiency of nearly 50 per cent should still be attainable.

For a really large installation of, say, 200 megawatts, it has been estimated by an independent authority that an over-all energy efficiency of over 53 per cent might be obtained, with present-day cell and electrolyser efficiencies and constant pressure gas storage in underground caverns.

Taking the case of the very simple tank type electrolyser working at atmospheric pressure, coupled with compressors and gas storage vessels, and fuel cells with the performance it was possible to offer about six years ago, it was estimated then that the over-all energy efficiency would be as low as 32 per cent, which was considered unacceptable. For this reason, it is now suggested that the only type of electrolyser which need be considered seriously at present is the medium pressure type, operating at about 30 atmospheres (440 psi). If, however, it were decided that an over-all efficiency somewhat lower than 50 per cent could be tolerated, then the simplicity of the atmospheric type coupled with storage at atmospheric pressure could offer certain advantages.

PROBABLE CAPITAL COST OF THE SYSTEM

The author is not qualified to make a reliable estimate of the running cost of a system of this kind, but some rough estimates of capital cost can be made which may be enough to show if the scheme is approaching the stage at which it could be considered economic. The system will almost inevitably be more expensive than a pumped water storage scheme, the cost of which has been given as about £40 per kilowatt regenerated for a size of 300 megawatts, at a favourable site. It is only in mountainous country, however, that this can be used, and possible sites are few and far between. Associated transmission costs might therefore increase the total capital cost of pumped storage to perhaps £70 per kilowatt.

It is also important to distinguish carefully between cost per kilowatt and per kilowatt-hour. Assuming, for instance, that a separate electrolyser must be used, it would plainly be difficult to compete with a lead-acid battery if the time of charge and discharge were of the order of one or two hours, but it would get progressively easier to compete if the time of discharge were increased to many hours or days. In a conventional battery, if the capacity in kilowatt-hours has to be increased tenfold, then the cost of the whole battery is increased by the same ratio, as a general rule, whereas in an electrolyser-fuel-cell combination, it is only the gas-storage vessels which would have to be increased tenfold. For this reason, the cost of the gas-storage vessels has been kept quite separate.

(a) The cost of rectifier-inverter installations is understood to be about £15 per kilowatt for medium sizes of about 300 kilowatts falling to about £10 per kilowatt for large sizes. Small sizes would no doubt cost more than £15 per kilowatt. In a scheme of this

sort it would of course be preferable to avoid this additional cost by using DC throughout.

(b) The cost of electrolyser plants vary somewhat with the type. The tank type is believed to be about £35 per kilowatt, the atmospheric pressure filter-press type is about £40 per kilowatt, and the medium pressure filter-press type about £50 per kilowatt. As it is believed that only the last type would have an efficiency high enough for the present purpose, and since it would avoid the high extra investment cost for large compressors, it will be assumed that £50 per kilowatt must be allowed.

(c) The cost of compressors is believed to be about £50 per kilowatt input for compression up to 100 atmospheres in the case of hydrogen, and about £100 per kilowatt input for oxygen. As the energy used in the compression of the gases would be of the order of one per cent of the energy input to the electrolyser, for compression from 30 atmospheres up to 136 atmospheres, it is thought that it would be reasonable to assume a capital cost for compressors of about £1 per kilowatt input to the electrolyser. In a very small installation, it would no doubt be appreciably more than this.

(d) The capital cost of gas storage will vary widely with the method adopted. The cost of each individual method will also vary widely, depending on scale and a number of other factors. It is thought that the best unit to adopt for gas storage is cost in pounds sterling per kilowatt-hour output from the fuel cell. To obtain the cost of gas storage per kilowatt-hour input to the electrolyser, these figures should be approximately halved. Where the gas is stored pressure, it has been assumed that it can be expanded down to 400 lb per square inch, and the average cell voltage is taken as 0.92 volt. As the tendency is now to reduce cell operating pressures, it is probable that these figures can be somewhat improved upon. Also, the figures assume that both hydrogen and oxygen must be stored, though it is conceivable that with cells operating at atmospheric pressure, air could be used in place of oxygen, if a lower cell performance can be tolerated.

The figures obtained have been summarized in the table below, and it is hoped that they are reasonably accurate. It would seem that for a storage unit for say one or more 100 kilowatt windmills, the high tensile steel pipes should provide the cheapest method of storing gas.

(e) The capital cost of fuel cells is of course extremely difficult to assess at the present moment, as none have so far been manufactured for sale, as far as is known. However, estimates tend to show that a cost of £50 per kilowatt should be achieved for units of 100 kilowatts, in the present state of knowledge, and with the improved performance previously referred to for the medium-temperature cell with which the author has been associated. This assumes that a few hundreds of batteries are supplied, on a "one-off" basis the cost would naturally be excessive. Larger units would certainly be cheaper to manufacture per kilowatt output, as the same

amount of control gear would be required for a small unit as a large one.

As far as is known, no costs have been published for fuel cells of other types but in an interesting American publication on fuel cells⁵ the cost of the medium temperature cell with porous nickel electrodes is estimated to be \$12.50 per square foot of cell area for limited production, falling to \$4.00 for large-scale production; these costs include all cell parts, accessories and profit. Assuming 0.92 volt per cell, and the present performance, this corresponds to \$47 per kilowatt for limited production falling to \$15 per kilowatt for large-scale production. These figures seem optimistic at the present time, but they tend to show that fuel cells are not, as a general rule, inherently expensive, and eventually the cost of production may fall considerably when mass-production methods are introduced.

Assuming an over-all efficiency of 50 per cent, and also assuming (for want of information on the precise application envisaged) that the power of the electrolyser and the fuel cell are the same (which would mean two hours of electrolysis for each hour of regeneration), the capital costs, in pounds sterling per kilowatt, have been summarized briefly as follows, omitting the costs of transport, buildings and construction :

Rectifier-inverter plant (if required), £15; medium-pressure electrolyser, £50; gas compressors (per kilowatt of input to the electrolyser), £1; and medium-pressure fuel cell, £50, or a total of £116 per kilowatt.

To this must be added the capital cost of the gas-storage plant, which varies directly with the capacity required, in terms of kilowatt-hours. If we take the most favourable cost of £0.22 per kilowatt-hour of output, the total capital cost of the whole system per kilowatt-hour would amount to £116.2 for one hour, £23.4 for five hours, £9.9 for 12 hours, £5.1 for 24 hours, and £0.91 for one week. The cost per kilowatt, including gas storage, would be £116.2 for one hour, rising to £121.3 for 24 hours, and £153 for one week.

As the capital cost of a stationary-type lead storage battery is of the order of £45 per kilowatt-hour stored, assuming a five hour discharge, it is clear that the proposed scheme could not possibly compete unless a discharge time in excess of about two hours were required. In the case of a traction-type lead battery, costing, say, £19 per kilowatt-hour, this critical time would be increased to five or six hours. For longer durations, the proposed scheme would become progressively more favourable.

As regards competition with a Diesel generator, the most likely alternative source of power, the author would prefer to leave this to those who are more qualified to judge; it is a complex comparison, much affected by size, load factor, cost of fuel and

other operating costs. It is difficult to see how an electrolyser-fuel cell combination could compete at present, unless the price of Diesel oil in the locality is extremely high.

One other point concerns the scale of the plant. In small units the cost per kilowatt is bound to be relatively high, and as the size is progressively increased, the cost per kilowatt should fall. For this reason, it is difficult to visualize a commercial storage unit with an output of less than about 10 kilowatts as a minimum. It may be that 100 kilowatts would be a more realistic figure.

PROPULSION OF VEHICLES

The author has always believed that fuel cells will finally prove to be specially suitable for propulsion, both by road and by rail. In this case, the two gases would be transferred to storage vessels on the vehicles, and this would be equivalent to filling up with petrol or fuel oil. The advantages of the system lie partly in the fact that the combination of battery and direct-current motor is peculiarly suitable for traction purposes, as the maximum torque is achieved at the lowest speeds and large overloads can be taken for short periods, and partly in the virtues of silence, lack of vibration and freedom from exhaust fumes. However, opinion in industry at the present time seems to be that the system is unacceptable, owing partly to the rather high cost of the gases and partly to the weight and bulk of the gas cylinders. In remote areas, where Diesel fuel is expensive, it may be that the cost of the gases could be tolerated; but the difficulty of the weight and bulk of the gas cylinders remains. As regards weight, it was estimated in 1955 that a 44-kilowatt battery would weigh 3,900 lb for three hours, endurance on normal load, and 5,000 lb for five hours. The three fold improvement in performance should reduce these figures substantially, but the weight will still be much greater than that of a diesel engine and fuel, though much less than that of a lead-acid battery.

Many other applications could be suggested, and rail traction would certainly seem to be more favourable than road. However, the disadvantage of having to store the fuel in heavy and bulky steel cylinders remains. Much thought is now being given to possible ways of avoiding this difficulty, and it may be that re-forming of liquid fuels will provide the answer.

CONCLUSION

If the arguments put forward in this paper are substantially correct, it would seem that serious consideration of this method of energy storage in under-developed parts of the world is still rather premature. The question then arises as to whether future improvements in the method could eventually lead to an economic system. The most obvious improvement would be to produce a reversible cell, which would then be able to fulfil both the functions

⁵ G. S. Lockwood *et al.*, *Fuel cells, power for the future*, Cambridge, Mass. Fuel Cell Research Associates, 1960.

of electrolyser and fuel cell; this would require further research work, but if successful, would lead to a big reduction in capital cost.

Furthermore, it is only recently that electrolyser manufacturers have become alive to the fact that information obtained during research on hydrogen-oxygen fuel cells could possibly be applied to electrolyzers, leading to a higher energy efficiency or a lower capital cost, or both.

Finally, if an economic electrolyser were developed which would operate at the gas storage pressure of say 100 to 204 atmospheres (1,470 to 3,000 lb. per

square inch), a further small improvement would be obtained, and the system would be simplified.

It is freely admitted that this paper is very far from being a complete analysis of the system, but this would be somewhat premature at present, until fuel cells have advanced sufficiently for them to be commercially available. However, it is salutary to face up to the facts as they are, and to invite suggestions and criticisms which might lead to a practical and economic system of energy storage being finally achieved. Suggestions from other workers in the field of fuel cells would be especially welcomed.

Table

Capital cost of gas storage

Type	Capacity (kilowatt-hours)	Cost per kilowatt-hour output from cell (pounds sterling)	Remarks
Low-pressure	250	21.4	Constant
gas-holders	2,500	8.2	pressure system
(atmospheric pressure)	7,500	4.8	(prices f.o.b.)
	25,000	2.7	
	100,000	1.8	
Steel cylinders	Upwards of 10		Cost varies with size
(136-272 atm pressure)			and maximum
			pressure
Underground caverns	400,000	0.26	Liquid seal
(45 atm pressure)			constant
			pressure system
High-tensile steel pipes	100,000	0.22	Inner diameter of
(100 atm pressure)	(per mile)		pipe 36 inches

ACKNOWLEDGEMENTS

The author wishes to thank Dr. A. B. Hart, of the Research and Development Department of the Central Electricity Generating Board, for help in preparation of this paper, Mr. Campbell Secord and his staff at Constructors John Brown, Ltd., for valuable advice and assistance, and the Power Gas Corporation for help in assessing the cost of gas storage. He would also like to thank the National Research Development Corporation for permission to publish the paper.

Summary

It is suggested in the paper that the utility of this method of energy storage will be largely determined by the over-all capital cost, and also to a secondary extent by the energy efficiency achieved. Up till the present time, it has not been possible to combine the functions of electrolyser and current-generating cell in one apparatus, so separate units must be allowed for. For minimum costs it would seem essential to choose the new type of medium-pressure electrolyser now being made in Germany; this operates at a pressure of about 30 atmospheres (440 psi), and a voltage per cell of about 1.72 to 1.76 at a reasonable current density.

A number of different methods of gas storage are suggested, and these are outlined in the table.

As regards the types of fuel cell which could be used, it is tentatively concluded that either the atmospheric pressure type, working up to 70°C could be used, a good example being the Union Carbide cell, or alternatively the medium-pressure type with which the author has been associated. This normally works at 200°C and 20 to 41 atmospheres (300 to 600 psi), but recent work has shown that a good performance can still be achieved at much lower pressures than 20 atmospheres (300 psi). A third alternative is the cell developed recently by Shell Research Ltd., in England, but no details of construction have been released so far.

The over-all efficiency is not likely to exceed 50 per cent, in the present state of knowledge, though there seems to be no fundamental reason

why this should not be improved upon considerably in course of time, when the principle of operation of gas electrodes is thoroughly understood and when this knowledge is fully applied to both electrolyser and cell design. With low-pressure electrolysers and compressors, the over-all efficiency will be considerably less than 50 per cent; with electrolysers, gas storage and fuel cells all operating at atmospheric pressure, a very simple system would be achieved but, again, the over-all efficiency would at present be somewhat less than 50 per cent, and it is thought that the capital cost of the gas storage would be excessive.

As regards capital cost, assuming an AC network, and a fuel cell of 100-kilowatt output, a rough estimate indicates this might amount to £116 per kilowatt, exclusive of such items as transport, buildings and erection; this assumes the use of a medium-pressure electrolyser, gas compressors and medium pressure fuel cell of the same power as the electrolyser. An attempt has been made to assess the capital cost of gas storage by different methods, and these are set out in the table; it would seem from this that high-tensile steel pipes would afford the cheapest method. This means that the total capital cost of the system per kilowatt-hour output would be £116.2 for one hour, £23.4 for five hours, £9.9 for 12 hours, £5.1 for 24 hours and £0.91 for one week.

The comparison of these costs with those of lead-acid batteries, and also with those of an auxiliary Diesel generator, are left to those who are better qualified to judge than the author, but the present high capital cost of the scheme would seem to show that at present it would be difficult to compete, with a Diesel generator, except where the price of fuel is very high.

It is difficult to visualize a commercial unit with an output less than about 10 kilowatts, and the capital cost per kilowatt might be excessive even for a unit of this size. Capital costs would certainly fall with an increase in size.

It is concluded that further research and development work is required before a strong case can be put forward for this method of energy storage, in competition with an auxiliary Diesel generator. In particular, a combined electrolyser-fuel cell might be produced, and the activity of electrodes still further increased.

It is freely admitted that this paper is far from presenting a complete analysis of the system, but it is hoped that it may serve to stimulate discussion and lead to further suggestions as to how an economic energy storage system of this kind could eventually be evolved.

EMMAGASINAGE OU ACCUMULATION D'ÉNERGIE EMPLOYANT LES PROCESSUS ÉLECTROLYTIQUES ET LES CELLULES A HYDROGÈNE-OXYGÈNE

Résumé

On laisse entendre, dans le texte du mémoire, que la valeur de cette technique d'accumulation de l'énergie sera conditionnée dans une large mesure par les investissements qu'elle exigera au titre des frais d'établissement ou de construction ainsi, dans une moindre mesure toutefois, que par le rendement en énergie des processus envisagés. On n'a pas encore réussi à combiner les fonctions d'un dispositif à électrolyse et celles d'une cellule productrice d'énergie dans un seul et même appareil, si bien qu'il faut prévoir, pour ces fonctions, des groupes séparés et indépendants. Pour réduire les prix au minimum, il semblerait essentiel de choisir le nouveau type de dispositif à électrolyse à moyenne pression qui est actuellement en fabrication en Allemagne, dans lequel cette pression est de l'ordre de 30 atmosphères et la tension, par cellule, est comprise entre 1,72 et 1,76 volts le tout avec une densité de courant raisonnable.

On suggère un nombre appréciable de méthodes d'emmagasinement des gaz ainsi produits, lesquelles sont résumées dans le tableau. (Voir le texte anglais du mémoire.)

En ce qui concerne les types de cellule à combustible utilisables, on aboutit à la conclusion provisoire que l'on pourrait se servir, soit du type à pression

atmosphérique, capable de fonctionner jusqu'à une température de 70 °C, dont la cellule Union Carbide est un bon exemple, soit encore le type à pression moyenne, auquel l'auteur de ce mémoire s'est intéressé, appareil dont la température normale de fonctionnement est 200 °C et la pression de 20 à 41 atmosphères. De récents travaux ont démontré toutefois qu'un bon rendement peut encore être attendu à des pressions bien inférieures à 20 atmosphères. Une troisième solution serait fournie par la cellule récemment mise au point par Shell Research, Limited, en Angleterre, sur les détails de réalisation de laquelle on n'a encore rien publié.

Il n'est pas probable que le rendement global dépasse 50 p. 100 dans l'état actuel de nos connaissances, bien qu'il ne semble pas y avoir de raison profonde qui s'oppose à ce que d'importantes améliorations soient réalisées dans quelque temps, une fois que l'on comprendra complètement le principe de fonctionnement des électrodes à gaz et que ces connaissances seront mises en œuvre convenablement pour la conception des appareils d'électrolyse et celle des cellules. Avec les appareils de ce genre qui font usage de basses pressions et de compresseurs, le rendement global du système restera nettement inférieur à 50 p. 100. Dans le cas des systèmes où

le dispositif à électrolyse, l'emmagasinement des gaz et l'exploitation des cellules à combustible fonctionnent tous à la pression atmosphérique, on pourrait mettre au point un système très simple mais, là encore, le rendement global serait actuellement un peu inférieur à 50 p. 100 et on estime que les investissements nécessaires pour la construction des dispositifs d'emmagasinement des gaz seraient excessifs.

En ce qui concerne ces investissements initiaux, si on admet qu'il soit fait usage d'un système en courant alternatif et d'une cellule ayant une puissance de 100 kilowatts, on peut établir, en approximation grossière, que leur importance serait de l'ordre de 116 livres sterling par kilowatt, à l'exclusion des frais de transport, de construction des bâtiments et de leur montage. Ceci présuppose l'emploi d'un dispositif d'électrolyse à moyenne pression, de compresseurs de gaz et d'une cellule à combustible à moyenne pression ayant même capacité que le dispositif d'électrolyse. On s'est penché sur le problème consistant à déterminer les frais de premier établissement afférents aux systèmes de mise en réserve des gaz par les diverses méthodes possibles, renseignements que l'on trouvera dans le tableau. Il semble en ressortir que l'emploi de tubes en acier à haute résistance à la traction serait le plus économique. Dans ces conditions, les investissements globaux de capitaux par kilowatt-heure de débit seraient de 116,2 livres pour une heure, 23,4 livres pour 5 heures, 9,9 livres pour

12 heures, 5,1 livres pour 24 heures et 0,91 livre pour une semaine.

On laissera à des juges plus compétents que l'auteur de ce mémoire le soin de comparer ces frais à ceux qui correspondent aux batteries à plaques de plomb et à électrolyte acide, ainsi qu'à ceux des systèmes faisant usage d'un groupe électrogène auxiliaire à moteur diesel, à moins que le prix du combustible ne soit extrêmement élevé.

Il est difficile de concevoir une installation commerciale ayant une puissance installée inférieure à 10 kilowatts pour laquelle les investissements initiaux par kilowatt seraient peut-être encore excessifs. Il va de soi qu'ils diminueraient avec l'accroissement de la taille du groupe. On en conclut qu'il faut procéder à des travaux de recherches et de mise au point ultérieurs avant que l'attrait de cette méthode de mise en réserve de l'énergie puisse la rendre supérieure à l'emploi d'un groupe diesel auxiliaire. Il serait possible, en particulier, de produire un système dans lequel se combineraient le dispositif d'électrolyse et la cellule à combustible, ce qui augmenterait encore l'activité des électrodes.

L'auteur reconnaît très volontiers que ce mémoire est loin de présenter une analyse complète du système, mais espère qu'il suscitera des échanges de vues et aboutira à l'élaboration d'autres recommandations quant à la manière dont on pourrait, en fin de compte, mettre au point un système économique de mise en réserve de l'énergie du même genre.

ELECTROCHEMICAL ENERGY STORAGE FOR INTERMITTENT POWER SOURCES

George E. Evans, Director of Research

Union Carbide Consumer Products Company
Cleveland, Ohio

ENERGY SOURCES

Analysis of the energy storage requirements for an intermittent power source depends critically upon the regularity or statistical uniformity of the power delivered by the source. For a solar power source there is a diurnal variation and a seasonal variation depending only upon the solar azimuth which can be predicted with high accuracy. Variations in local cloud cover, although random on a daily basis, can be predicted fairly well in terms of monthly or seasonal averages for various locations which have been studied. (1), (2), (3)

The average power in the wind for a location which has been studied can also be predicted in terms of monthly or seasonal averages with fairly high accuracy. (4), (5)

A limited amount of statistical data are also presented in the references cited to show the frequency distribution of days providing less than some specified minimum amount of solar (or wind) power. A. E. Bleksley presents data for Mount Brukkaros, South-West Africa, for example, showing that one can expect about one day per year with a total solar radiation less than 200 calories per square centimetre; about 10 days per year with a total solar radiation less than 300 cal/cm²; and a total radiation greater than 400 cal/cm² through 88 per cent of the year. [(1) p. 132.] Data of this general type are of little value in attempting to estimate the capacity required in an energy storage system. It is not safe to assume, for example, that three days' worth of energy storage is adequate for some proposed wind generator, simply on the basis that periods of calm exceeding three days are extremely rare. The energy storage system will supply three days' worth of power only if it is fully charged at the beginning of the period; this may or may not be true, depending upon the power input available during the period preceding the three-day calm. The expected result, which has been verified in practice, is a tendency to underestimate the amount of energy storage required. An accurate but laborious method of computing energy storage requirements is to plot a continuous energy balance for the solar or wind generator for some pre-selected power output, using actual daily or hourly records of available input power (for example, from weather bureau information). The maximum energy deficit occurring over an extended

period of time is the capacity required in the storage system. Such an analysis has been carried out for wind generators proposed for several locations. (6), (7)

ENERGY STORAGE SYSTEMS

Two types of electrochemical energy storage systems will be considered in this presentation: lead acid storage batteries and hydrogen-oxygen fuel cells in combination with water electrolyzers and gas storage tanks. A schematic diagram of the latter is shown in figure 1.

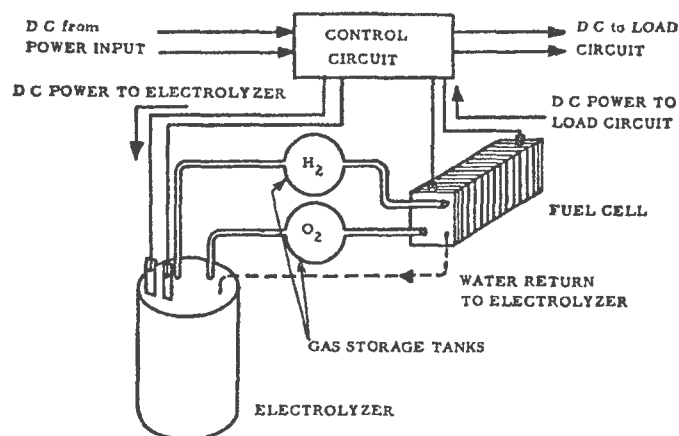


Figure 1

Fuel cell energy storage system

Power from the wind generator or solar power source is diverted to the electrolyser whenever the power input from the source exceeds the load demand, except when pressure-sensitive switches on the gas storage tanks indicate that the energy storage system is charged to full capacity. Although it may be possible for some types of fuel cells to use the fuel cell itself as the electrolyser, the use of a separate high pressure electrolyser permits operation of the fuel cell at constant pressure, and also decreases the size of the gas storage tanks required.

Storage batteries

The size and weight of a storage battery system can be estimated from the typical parameters 20 watt-hours per pound (50 pounds per kilowatt-hour) and 1.5 watt-hours per cubic inch (approximately

0.4 cubic foot per kilowatt-hour). For almost all applications concerned with storage of solar or wind power, the battery size will be determined by the energy storage capacity rather than by maximum current requirements.

The cost of a storage battery can be expressed as dollars per kWh per year of operation. Assuming a list price of \$110 per kWh and a 10-year life, depreciation of the capital investment on a linear basis at 4 per cent yields a cost per year of \$13.50 per kWh. This agrees closely with an estimate of \$12.50 per kWh per year for Coast Guard applications. (6) The figure \$13.50 per kWh will be used in the following calculations as more representative of 1961 prices. For convenience in reference, typical values of cost per year and size are listed below :

Table 1
Annual cost of storage batteries

Storage capacity (kWh)	Cost (per year)	Size (cu ft)	Weight (pounds)
10	135	3.9	500
25	338	9.6	1,250
50	675	19.3	2,500
75	1,013	28.9	3,750
100	1,350	38.6	5,000
200	2,700	77.0	10,000
500	6,750	193.0	25,000
750	10,130	289.0	37,500
1,000	13,500	386.0	50,000
2,000	27,000	772.0	100,000

Since to a first approximation, cost and size vary linearly with storage capacity, it can be seen that storage of large blocks of energy can become quite expensive. In a United States Coast Guard analysis of wind power storage, 70 kWh was selected as a practical upper limit, on the basis of weight, volume and ventilation requirements. (6)

Fuel cell energy storage systems

The analysis of cost, size and weight of a fuel cell energy storage system differs markedly from that presented for the storage battery. The size and cost of the fuel cell and the electrolyser depend upon the power output required, and not upon the total energy storage requirement. Increases in total storage capacity can be achieved simply by increasing the volume (or pressure) of the stored gases.

Since no fuel cell is yet in commercial sale, it will be necessary to estimate the characteristics from the limited information released on models in development. A study group at the Harvard Business School has analysed available performance and cost information for existing and proposed future fuel cells, and has arrived at a figure of \$110 per kW for a low temperature hydrogen-oxygen fuel cell. (8) This cost value was estimated for a low-pressure fuel cell employing carbon electrodes and potassium hydroxide electrolyte, such as the Union Carbide

fuel cell. The Harvard Business School report estimates 5 years' life for this fuel cell. While 5 years of operation is considered a reasonable expectation in the near future, a more conservative estimate of two years' life will be employed in the following calculations to avoid extrapolation. On this basis, the annual cost per kilowatt for the fuel cell alone is \$55. Auxiliary equipment required for long term automatic operation can be expected to add about \$40 per kW to the initial cost, making the total cost per year \$75 per kW for power levels of 1 kW or more. Anticipated improvements in operating life should eventually reduce this cost to about \$30 per kW per year. For very small systems (less than 1 kW) the cost per kilowatt will be somewhat higher, since cost of auxiliaries will not decrease proportionally to the power level in this range. For later use, an annual cost of \$60 for a 0.5-kW fuel cell and \$50 for a 0.1-kW fuel cell will be assumed.

The electrolyser will add an annual cost of about \$25 per kW of rated fuel cell power, based on a 10-year life with investment amortized at 5 per cent. It is assumed that the electrolyser has a power rating twice that of the fuel cell, so that one hour of electrolyser operation will supply two hours of fuel cell operation. This electrolyser capacity will supply sufficient gas storage for wind power in almost any location and sufficient gas storage for solar power units in tropical or temperate regions (latitude 45°S to 45°N). The electrolyser price used above is for a high-pressure type, so as to avoid the cost and maintenance of pumps to pressurize gas for storage.

The annual cost of the gas storage system is a relatively small item, within the range of storage capacities of interest in connexion with wind or solar power. Hydrogen and oxygen tanks adequate to supply 1000 kWh of fuel cell output can be obtained for \$3,540, f.o.b. manufacturers. The price quoted is based on a fuel cell efficiency of 60 per cent. (Fuel cell efficiency determines fuel usage and hence tank size.) Transportation and installation costs depend upon the power supply location. In an attempt to correct for this indeterminate factor, the tank cost has been doubled to give an installed cost of \$7,080 per 1000 kWh. Amortizing this cost over 30 years at 5 per cent gives an annual charge of \$460, or approximately \$0.50 per kWh per year.

Since the cost of the fuel cell, electrolyser and auxiliaries varies directly as the power level, while cost of the storage tank system varies directly as the energy stored, table 2 is provided to show total cost per year of operation of the entire fuel cell energy storage system for various choices of power level and energy storage.

Entries in table 2 are expressed in \$ per kWh of storage capacity per year of operation. The heavy black line across the table assists in comparing tables 1 and 2. Above and to the right of the line, a storage battery is less expensive than the fuel cell system; below and to the left of the line the fuel cell system is less expensive than the storage battery. Also shown in table 2 are hours of continuous operation of the

Table 2
Annual cost of fuel cell energy storage

Energy stored, kWh	Power level, kW					
	0.1	0.5	1.0	5	10	100
1	\$53 10 hrs	73 2 hrs	100 1 hr	500	1,000	10,000
5	55 50 hrs	75 10 hrs	102 5 hrs	502 1 hr	1,002	10,002
10	58 100 hrs	78 20 hrs	105 10 hrs	505 2 hrs	1,005 1 hr	10,005
50	78 21 days	98 100 hrs	125 50 hrs	525 10 hrs	1,025 5 hrs	10,025
100	103 42 days	123 8 days	150 100 hrs	550 20 hrs	1,050 10 hrs	10,050 1 hr
500	303 216 days	323 42 days	350 21 days	750 100 hrs	1,250 50 hrs	10,250 5 hrs
1,000	> 1 yr	573 83 days	600 42 days	1,000 8 days	1,500 100 hrs	10,500 10 hrs
5,000		> 1 yr	2,600 216 days	3,000 42 days	3,500 21 days	12,500 50 hrs
10,000			> 1 yr	5,500 83 days	6,000 42 days	15,000 100 hrs
50,000				> 1 yr	26,000 216 days	35,000 21 days

fuel cell energy storage system for the different power levels considered.

The estimated cost for very large energy storage capacities is sensitive to the period of time over which the price of the fuel gas tanks is amortized.

Since with proper protection from corrosion these tanks should have indefinitely long life, the lower right hand corner of table 2 is recalculated in table 3, using 50 years' life for the storage tanks instead of 30.

Table 3

Energy stored, kWh	Power level, kW			
	1	5	10	100
500	290	690	1,190	10,190
1,000	480	880	1,380	10,380
5,000	2,000	2,400	2,900	11,900
10,000	—	4,300	4,800	13,800
50,000	—	—	20,000	29,000

OPERATING CHARACTERISTICS

Systems requiring minimum storage

The suitability of an energy storage system depends upon the needs or demands of the power-consuming

circuits. There are some applications which can utilize available power despite random fluctuations; for example, water-pumps in a hydraulic mining operation. Even for such applications, a small capacity in stored energy is desirable in order to integrate momentary fluctuations in power, such as those arising from gusts of wind. Reference to table 2 shows that a storage battery is the proper choice, irrespective of the power level.

Systems requiring constant output

As an opposite extreme condition, there are applications requiring essentially constant power supply throughout the year, at least on a daily average basis. For example, consider power for a remote hospital centre, for operation of a small airport or a communication centre. Ideally, the energy storage system should be expected to carry over energy for a period of months from seasonal peaks to seasonal lulls, so as to minimize the cost of the solar or wind generator proper. From tables 1 and 2 it is immediately apparent that the storage battery is completely uneconomic for such use, and that the fuel cell energy storage although expensive, is much cheaper than storage batteries. Further economic analysis requires introduction of data on costs of the wind or solar generator, as well as comparative data for competing

power sources. While a detailed analysis of such costs is beyond the scope of this paper, an illustrative application involving the use of wind power will be given. Data are given in reference (6) for the average monthly power output to be expected from a 6-kW wind generator located at Eldred Rock, Juneau, Alaska. In table 4 are given average monthly outputs for this location, scaled from a chart in the original reference.

Table 4

Month	Average power, kW	Month	Average power, kW
January	3.55	July	2.30
February	4.90	August	3.65
March	3.65	September	2.40
April	2.50	October	4.10
May	2.70	November	4.40
June	2.70	December	4.90

The average annual output power for this location would be 3.46 kW. Even with long-term energy storage, this power cannot be delivered to the load, since only about one-half of the wind power stored (in either storage batteries or a fuel cell storage system) can be returned to the load circuit. Assuming an efficiency of 50 per cent in energy storage, an average power output of 3.2 kW can be realized. To meet the demands of the summer calm, a total energy storage of 2,200 kWh is required. Using a figure of \$1,000 per year as the annual cost of a 6 kW wind generator, combined with cost data already presented for fuel cell energy storage, the total annual cost of this 3.2 kW system should be about \$2,420. (\$1,000 for the wind generator, \$320 for the fuel cell and electrolyser, and \$1,000 for the storage tanks.) The annual cost of a storage battery system to meet the same requirements would be over \$30,000. The system delivers 28,032 kWh of electricity in a year, which indicates a cost of about \$0.086 per kWh for the electricity produced. Since a Diesel-electric generator to handle the same load would cost less than \$0.05 per kWh at a fuel price of \$0.15 per gallon, the wind generator system is not competitive. However, if transportation or availability of Diesel fuel is a problem, this wind generator can become competitive if the actual delivered price of Diesel fuel is above about \$0.30 per gallon. Even with this proviso, attempts to integrate the output of a wind

generator on a yearly basis appear to be of marginal value.

Seasonal fluctuations in output

If the attempt to obtain an absolutely uniform high output is abandoned, much more economical use of the wind generator can be realized. If, for example, the wind generator in Alaska described above is operated at 4 kW in October through March and at 2.5 kW in April through September, a total output of 28,470 kWh can be realized. Under these conditions, only 325 kWh of storage capacity is needed, reducing the annual cost of operating the plant to \$1,563, or about \$0.054 per kWh. By reducing the storage from 12 months' integration to 6 months, integration, the operating costs are cut by almost 40 per cent. Of the annual cost of \$1,563 for this system, \$1,000 represents the wind power generator and \$563 the storage system, so that any further major cost reductions would require cutting the cost of the primary wind generator itself.

Daily fluctuations in output

In operation of a solar power system, energy storage is required to provide power during the night, as well as to compensate for cloudy, sunless days. Data in reference (1) show that three days of energy storage should maintain a system in operation over 90 per cent of the time for a location at Boston, Massachusetts, and 6 days of energy storage would handle all but extremely rare occasions. For a 1-kW system, 6 days of storage requires 144 kWh. A fuel cell energy storage system providing 144 kWh at 1 kW should cost about \$172 per year to operate; a corresponding storage battery would cost about \$1,944 per year.

As, mentioned previously was the costs estimated for fuel cell operation are based on a two-year operating life; future developments are expected to permit operation for longer periods, which will reduce present estimates of operating cost. On the other hand, major reductions in the cost of gas storage tanks appear unlikely, which places an upper limit on the maximum number of hours of storage feasible. If a 5-year fuel cell life is assumed, along with a 50-year life for the gas storage tanks, the \$172 per year estimate for a 144 kWh, 1-kW system can be reduced to about \$85 per year.

[Note. A list of bibliographical references appears on page 186 after the French translation of the summary which follows.]

Summary

Two sources of energy are considered wind power and solar energy. These sources of power are subject to diurnal and seasonal variations in addition to random fluctuations, which necessitates energy storage in order to provide reliable and uniform power output. Accurate estimates of the minimum

energy storage required in conjunction with a given wind or solar energy application are extremely laborious to calculate, requiring the determination of a running energy balance over an extended period of time. In the present paper these difficulties are by-passed by considering several limiting cases.

The only energy storage system presently available for solar or wind power systems is the ordinary storage battery. This device is best suited for storing and delivering power over relatively short periods of time. The annual cost of a storage battery system is estimated at \$13.50 per kWh and is directly proportional to the total energy stored.

A fuel cell energy storage system, consisting of a hydrogen-oxygen fuel cell, an electrolyser, and gas storage tanks offers promise of reducing the costs of energy storage in the future. Actual fuel cell costs are not available, but a rough estimate can be made from available literature. The annual cost of the fuel cell plus electrolyser should be about \$100 per kW proportional to the power level. The cost of the gas storage tanks is proportional to the energy storage requirement, and is estimated to be about \$0.50 per kWh. It is hoped that future development of the fuel cell can reduce the cost of the fuel cell plus electrolyser to about \$30 per kW per year of operation.

As an illustrative example, these data are employed to estimate the annual operating costs of a hypothetical 6-kW wind generator plant in Juneau, Alaska. The annual operating cost of the wind generator itself is estimated at \$1,000 per year. It was found that for this location a continuous operation at 3.2 kW could be maintained by the use of 2,200 kW

of energy storage. The total annual cost of the power plant is estimated at \$2,420, or about 8.6 cents per kWh. This is more expensive than a Diesel-electric generator system operating on fuel at 15 cents per gallon, but cheaper than the Diesel system operating on fuel at 30 cents per gallon.

Since levelling of the power output over the entire year is of questionable economic merit for this system, a second calculation is presented in which the power output is levelled at 4 kW during the six windy months, and levelled at 2.5 kW during the six calm months. The total operating cost is found to be \$1,563, or 5.4 cents per kWh. In levelling the power output over a six-month period, only 325 kWh of storage capacity is required, compared with 2,200 kWh for the entire year.

In a third type of operation, such as that required for short-time levelling of a solar system output, still smaller energy storage capacity is feasible. For example, a 1-kW solar power plant operating in a latitude such as that of Boston, Massachusetts, should require only 144 kWh of storage capacity. A fuel cell energy storage system for this purpose should cost about \$172 per year. Expected reductions in cost due to continuing development of fuel cell systems could reduce this annual cost to about \$85 per year.

ACCUMULATION ÉLECTROCHIMIQUE DE L'ÉNERGIE POUR LES SOURCES DE FORCE MOTRICE A FONCTIONNEMENT INTERMITTENT

Résumé

On examine deux sources d'énergie, à savoir celle du vent et celle du soleil. Elles sont soumises, outre leurs fluctuations de caractère aléatoire, à des variations diurnes et saisonnières, ce qui impose leur emmagasinage ou accumulation pour assurer la fourniture d'une force motrice sûre et uniforme. Les calculs permettant d'évaluer avec exactitude le minimum d'énergie qui doit se mettre en réserve pour les besoins d'une application donnée des sources solaire ou éolienne sont extrêmement laborieux, car ils exigent la détermination d'un bilan énergétique courant sur une période importante. On a obvié à ces difficultés, dans le présent mémoire, en les laissant de côté dans le cadre de plusieurs cas limités.

Le seul système dont on dispose actuellement pour l'accumulation d'énergie dans les ensembles solaires ou éoliens est constitué par la batterie d'accumulateurs classique. Elle est plus spécialement indiquée quand il faut mettre de l'énergie en réserve et la restituer pendant des périodes relativement brèves. On évalue le coût annuel d'un tel système à 13,50 dollars par kilowattheure et il est directement proportionnel à l'énergie totale qui doit être ainsi accumulée.

Un système d'accumulation d'énergie à cellules à combustible constitué par une telle cellule

employant le couple hydrogène-oxygène, un dispositif d'électrolyse et des réservoirs de gaz offre une promesse de réduire les frais afférents à l'accumulation d'énergie pour l'avenir. On ne dispose pas actuellement de données sur le coût effectif des cellules à combustible mais les communications faites à la presse technique permettent son évaluation approchée. Les frais annuels attribuables à la cellule et au dispositif d'électrolyse doivent s'établir aux alentours de 100 dollars par kilowatt, proportionnellement au niveau de puissance. Le coût des réservoirs de gaz est proportionnel aux besoins d'accumulation d'énergie et on l'évalue à 0,50 dollar par kilowattheure approximativement. On compte que des perfectionnements ultérieurs à apporter à la cellule à combustible permettront de ramener ces frais (cellule plus dispositif d'électrolyse) à 30 dollars environ par kilowatt et par année de fonctionnement.

A titre d'exemple, on citera les données dont il a été fait usage pour calculer les frais annuels d'exploitation d'une centrale électrique éolienne hypothétique supposée installée à Juneau, dans l'État d'Alaska. On évalue les frais annuels d'exploitation de l'aéromoteur proprement dit à 1 000 dollars par an. On a pu établir que, pour l'emplacement en cause, on pourrait assurer le maintien du fonc-

tionnement continu de la centrale à un niveau de 3,2 kilowatts en mettant 2 200 kilowattheures en réserve. Les frais annuels globaux au titre de la centrale sont évalués à 2 420 dollars, soit 0,086 dollar par kilowattheure approximativement. Ce prix de revient est plus élevé que celui qui correspond à une centrale diesel-électrique qui utilise du combustible coûtant 0,15 dollar le gallon, mais meilleur marché qu'une installation comparable brûlant du combustible à 0,30 dollar le gallon.

Pour autant que la valeur du système consistant à égaliser le débit de puissance sur une année entière est douteuse au point de vue économique, on présente un deuxième calcul dans lequel on suppose le débit de puissance égalisé à 4 kilowatts pendant les six mois où souffle le vent et à 2,5 kilowatts pendant les six mois dits calmes. Les frais d'exploitation totaux s'établissent ainsi à 1 563 dollars, soit 0,054 dollar par kilowattheure. Dans le cas de l'égalisation

du débit de puissance sur une période de six mois, il suffit d'une capacité d'accumulation de 325 kilowattheures, au lieu de 2 200 pour l'année entière.

Dans le troisième type d'exploitation, tel que celui qui correspond au nivellement à court terme du débit d'un système solaire, il est possible d'avoir recours à une capacité d'accumulation plus réduite encore. C'est ainsi, par exemple, qu'une centrale à énergie solaire d'un kilowatt fonctionnant à une latitude telle que celle de Boston, État de Massachusetts (États-Unis), n'exigerait qu'une capacité d'accumulation de 144 kilowattheures. Un système d'accumulation avec cellules à combustible servant aux mêmes fins coûterait environ 172 dollars par an. Les réductions que l'on compte réaliser dans les frais en raison du perfectionnement constant des systèmes de cellules à combustible pourrait ramener ces dépenses annuelles à 85 dollars environ.

RÉFÉRENCES

- (1) A. G. H. Dietz, Weather and heat storage factors. Space heating with solar energy. Cambridge, Massachusetts Institute of Technology, 1954 (p. 126).
- (2) L. B. Anderson, op. cit. (p. 17).
- (3) Transactions of the Conference on the use of solar energy; the scientific basis (Tucson, Arizona, 1955). Tucson, Arizona University Press, 1958. 5 vol. in 6.
- (4) P. H. Thomas. Electric power from the wind. Washington, Federal Power Commission (of the United States), March 1945. 57 pp.
- (5) P. C. Putnam. Power from the wind. New York, Van Nostrand, 1948, 224 pp.
- (6) United States. Wind-driven generators for aids to navigation; project CGTD J7-6/1-2. Washington, United States Coast Guard Testing and Development Division, Office of Engineering, 1960.
- (7) U. Hütter. Wind power for remote microwave stations. Houston (Texas).
- (8) G. S. Lockwood *et al.* Fuel cells, power for the future. Cambridge (Massachusetts), Fuel Cell Research Associates, 1960.

CHEMICAL CONVERSION AND STORAGE OF CONCENTRATED SOLAR ENERGY¹

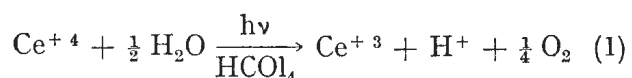
Rudolph J. Marcus and Henry C. Wohlers

Chemistry Department, Stanford Research Institute
Menlo Park, California

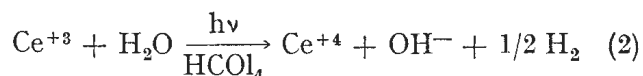
INTRODUCTION

The solar furnace is a radiation concentrator. When a black-body absorber is placed at its focus, the expected black-body temperature of 3,200°C is obtained. When a non-black — body, for instance a solution of ceric perchlorate, is placed at the focus, parts of the concentrated radiation are absorbed and others leave the solution unaffected. Of the concentrated radiation, the part absorbed by water (the infra-red part) appears as heat; this amounts to less than one-third of the total sunlight. The part absorbed by ceric ions (3,000 to 4,000 Å), however, acts just as light of this wavelength from any emitter would, except that it appears as a point source inside the solution. We have, then, in the solar furnace a new, cool, concentrated light source.²

The authors of the present paper first studied the photoreduction of ceric perchlorate at the focus of a 5-foot rear-silvered paraboloid. We found that this reaction was just as clean in the solar furnace as it was under more ordinary conditions. The photochemical production of oxygen —



— is of little value for the conversion of solar energy without the concomitant formation of a reducing substance which will react with oxygen and thereby produce either heat or electricity. As a rear-silvered glass surface effectively cuts off radiation below 3,500 Å, we repeated these experiments with a 2-foot front-surfaced furnace which reflected 60 to 70 per cent of the light down to 3,000 Å.³ The purpose of these experiments was to determine if hydrogen could be produced at this wave-length according to the reaction:



These experiments showed that the mass balance for reaction (1) obtained with the 2-foot front-

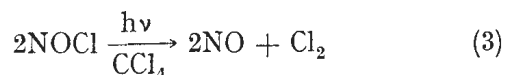
surfaced furnace was better than that obtained with the 5-foot rear-silvered furnace. The rate of oxygen evolution with the small furnace was tenfold faster, based upon equal volumes and concentrations; this increase in rate was due to the additional light energy in the 3,000 to 3,500 Å region. No hydrogen was found according to equation (2). Any hydrogen which may have been formed during a 2-hour exposure was less than 2.5×10^{-6} moles, which was the sensitivity limit of our mass spectrometer.

Thus, the ceric-cerous perchlorate reaction, as here tested, seems to be of little value for the conversion of solar energy on the earth's surface.

PHOTODECOMPOSITION OF NITROSYL CHLORIDE

The photodecomposition of nitrosyl chloride has been suggested by Daniels as one possible system of utilizing solar energy.⁴ Thermodynamically, the photodissociation of nitrosyl chloride is endergonic by 4.9 kcal/mole. The efficiency, Q , of conversion of radiant energy to chemical energy as defined by Calvert is 21.8 per cent.⁵

The free energy stored in the products of this reaction —



— is available upon demand by recombination of the nitric oxide and chlorine to form the original nitrosyl chloride. In order to prevent recombination of the product gases and concomitant waste of absorbed light, the reaction should take place in a solvent in which only one of the products, chlorine, is soluble. In this manner, the gases could be stored and later recombined to give the original nitrosyl chloride and to release the solar energy consumed in the decomposition.

The authors have completed a preliminary examination of the photodecomposition of nitrosyl chloride in both a static system and a flow system, using the 2-foot solar furnace described previously.⁶ In these

¹ This work was supported by the Geophysics Research Directorate of the Air Force Cambridge Research Laboratories, Air Force Research Division, United States.

² R. J. Marcus and H. C. Wohlers, "Photochemistry in the solar furnace", *Industrial and Chemical Engineering* (Washington), vol. 51 (1959), p. 1335, and vol. 52 (1960), p. 377.

³ R. J. Marcus and H. C. Wohlers, "A new solar furnace", *op. cit.*, vol. 52, p. 825.

⁴ F. Daniels, "A table of quantum yields in experimental photochemistry", *Journal of Physical Chemistry* (Washington), vol. 42 (1938), p. 713.

⁵ J. G. Calvert, "Solar energy reactions in prebiological chemistry", *Ohio Journal of Sciences*, vol. 53 (1953), p. 293.

⁶ See footnote 3.

experiments, using the static system, less than 2 per cent of the initial nitrosyl chloride content was decomposed.⁷ This low yield was the result of recombination of the products prior to the end of the experiment.

In order to minimize this back reaction, crude experiments were undertaken with a gravity feed flow system in order to minimize or prevent the accumulation of the products, nitric oxide and chlorine.⁷ A direct pumping system to feed the reactant quickly into the furnace has now been developed and will be described next.

Pumping system

A teflon pump with a Kel-F elastomer liner was used to control the flow. It had the advantage that only the body block (made of Teflon) and the flexible liner were in contact with the pump fluid; the fluid did not touch metal or lubricants. A 1/4-hp General Electric half-wave thymotrol drive, DC motor was connected to the pump. The motor speed was adjustable over a stepless range from 0 to 1,750 rpm. The one disadvantage of this pump was that its squeegee action produced a pulsating flow, which could, however, be minimized with a surge vessel.

Flow apparatus

Three different flow systems were used, as shown in figure 1. Figure 2 shows the flow system in actual operation. In system 5, the nitrosyl chloride storage vessel and the surge vessel to minimize the pulsating flow were combined into a single unit; pressure from the discharge side of the pump forced the solution from the liquid storage vessel through the system. For system 6 a separate surge vessel was used so the suction side of the pump was connected to the solution in the liquid storage vessel. System 7 was a modification of system 6; in system 7 the surge vessel was an integral part of the flow apparatus so there was a minimum hold-up of liquid in that vessel. The three systems worked equally well in the flow experiments. Each system may have a particular advantage depending on the photochemical reaction under investigation, and it was felt that system 7 was most advantageous for the nitrosyl chloride-carbon tetrachloride system.

Reaction cells

Four quartz reaction cells, shown in Figure 3, were designed, constructed and tested. Cells H and I were designed with a splash plate to facilitate quick separation of nitric oxide from the dissolved chlorine. In these cells the focal spot could be located at any point of the free falling stream between the nozzle and the splash plate. In practice the focal spot was located either at the nozzle tip or at the splash

plate itself. In the latter case concentrated illumination of a thin film was obtained. Cells J and K were designed so that the focal spot was in the body of the solution. These two cells were not designed specifically for the nitrosyl chloride reaction. Cell J was, however, similar to the cell used in the static system but without any provision for cooling in the area of the focal spot. Cell K provided a greater light flux for a small instantaneous volume of solution and had provisions for degassing. Figure 4 shows a detailed photograph of cell H, in actual operation.

Experimental results

Results of four typical experiments with concentrated light are shown in figure 5. Data for experiment 57 show that the pressure-volume increase upon exposure to concentrated light was 19 and 20 cm-litre, respectively, for the time periods 41 to 58 min and 70 to 86 min; based upon a gas volume of 3.0 litres, the increase in pressure was 6.5 cm Hg. The increase in pressure for experiment 49 was 1.8 cm Hg; for experiments 60 and 62 it was 2.9 and 2.7 cm Hg respectively. This pressure increase may be considered as the net effect of concentrated light on the carbon tetrachloride solution of nitrosyl chloride—or expressed differently, the excess of nitrosyl chloride decomposition over the recombination of the reaction products, nitric oxide and chlorine. The magnitude of the pressure increase upon illumination may be gauged by subtracting 228 (i.e., three times atmospheric pressure) from the ΣPV figures.

The results may be expressed in terms of the photodissociation of nitrosyl chloride and of the recombination of the photoproducts nitric oxide and chlorine. The pressure rise upon exposure to concentrated light ("cover off" in figure 5) shows that gas is being given off, and that the rate of production of that gas rapidly approaches a steady state. The location of the steady state is governed by the speed of the back reaction, which occurs mainly where the gas storage system joins the liquid circulating system.

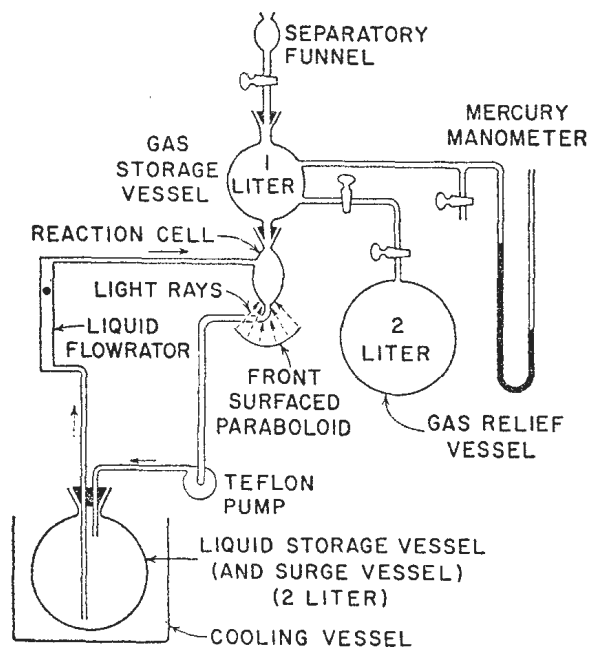
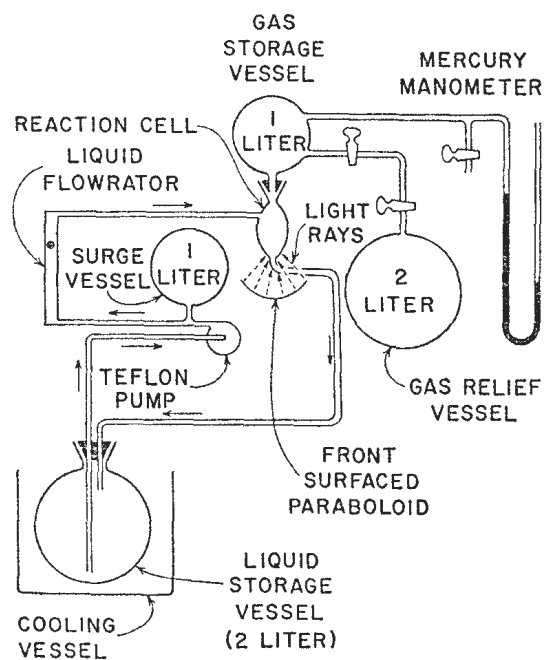
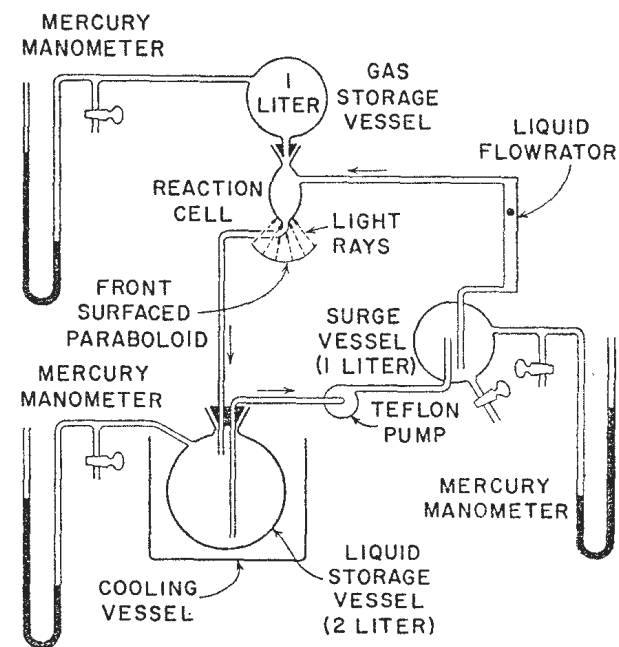
Once the steady state has been established, the gas is generated only as fast as it is consumed by the back reaction. On the other hand, if the gas were withdrawn continuously to feed a nitrosyl chloride fuel cell, the steady state would be upset and the gas would be generated at the rate at which it is generated in the approach to the steady state in our experiments.

Rate of reaction

On this basis we can calculate a forward rate of reaction (3) as it occurs in the solar furnace. The net rate (R_n) of reaction (3), which is the quantity we observe, is the difference between the forward rate (R_f) and the backward rate (R_b), which can be calculated from known rate constants

$$R_n = R_f - R_b = k_f I [\text{NOCl}] - k_b [\text{NO}]^2 [\text{Cl}_2] \quad (4)$$

⁷ R. J. Marcus and H. C. Wohlers, "Photolysis of nitrosyl chloride in solar furnace", *Solar Energy: The Journal of Solar Energy Science and Engineering* (Phoenix, Arizona), vol. IV, No. 2 (1960), pp. 1-8.

SYSTEM 5SYSTEM 6SYSTEM 7

D-3223-11

Figure 1

Flow systems for liquid phase photochemical reactions

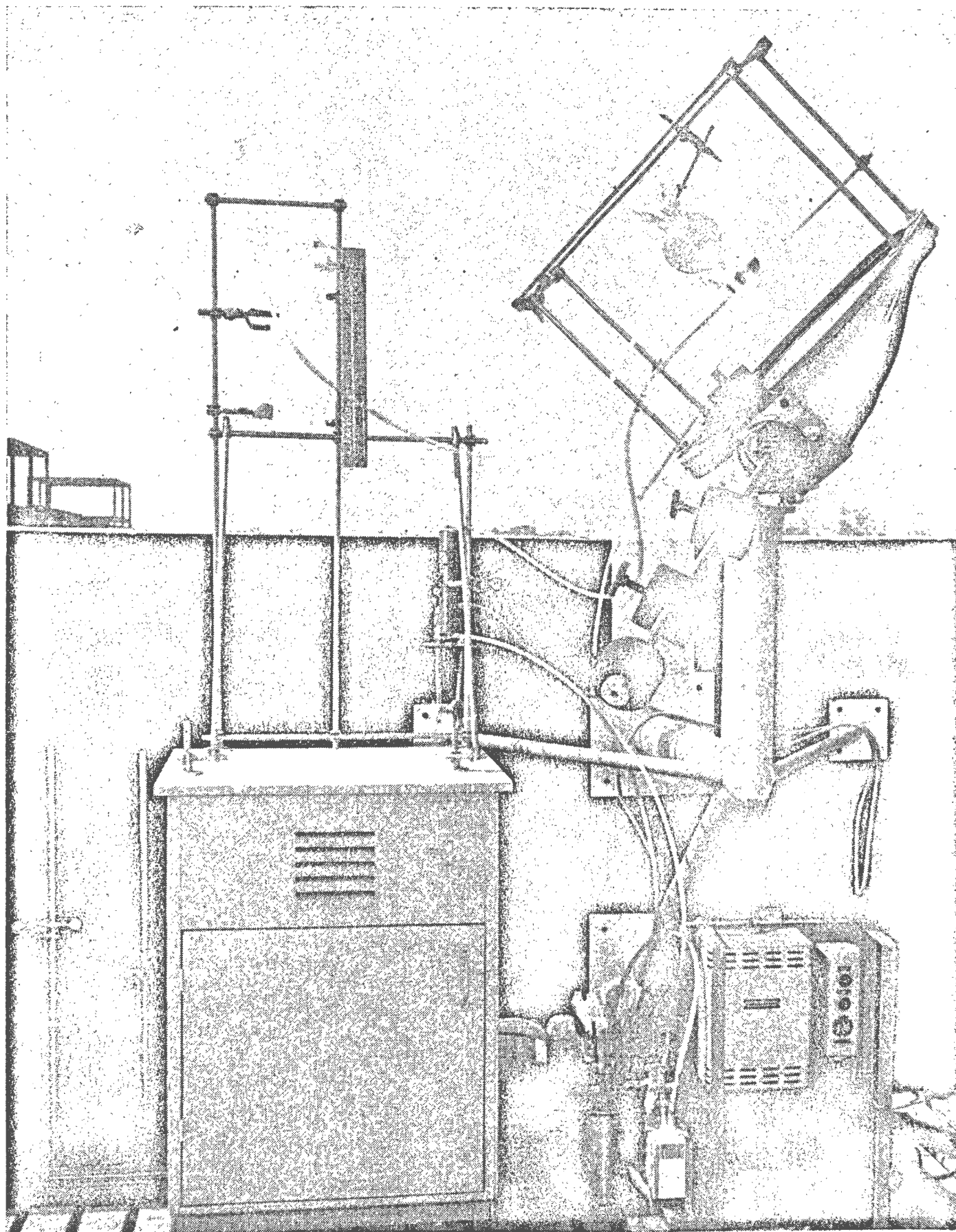


Figure 2

Flow apparatus showing system 5 and reaction cell H in operation

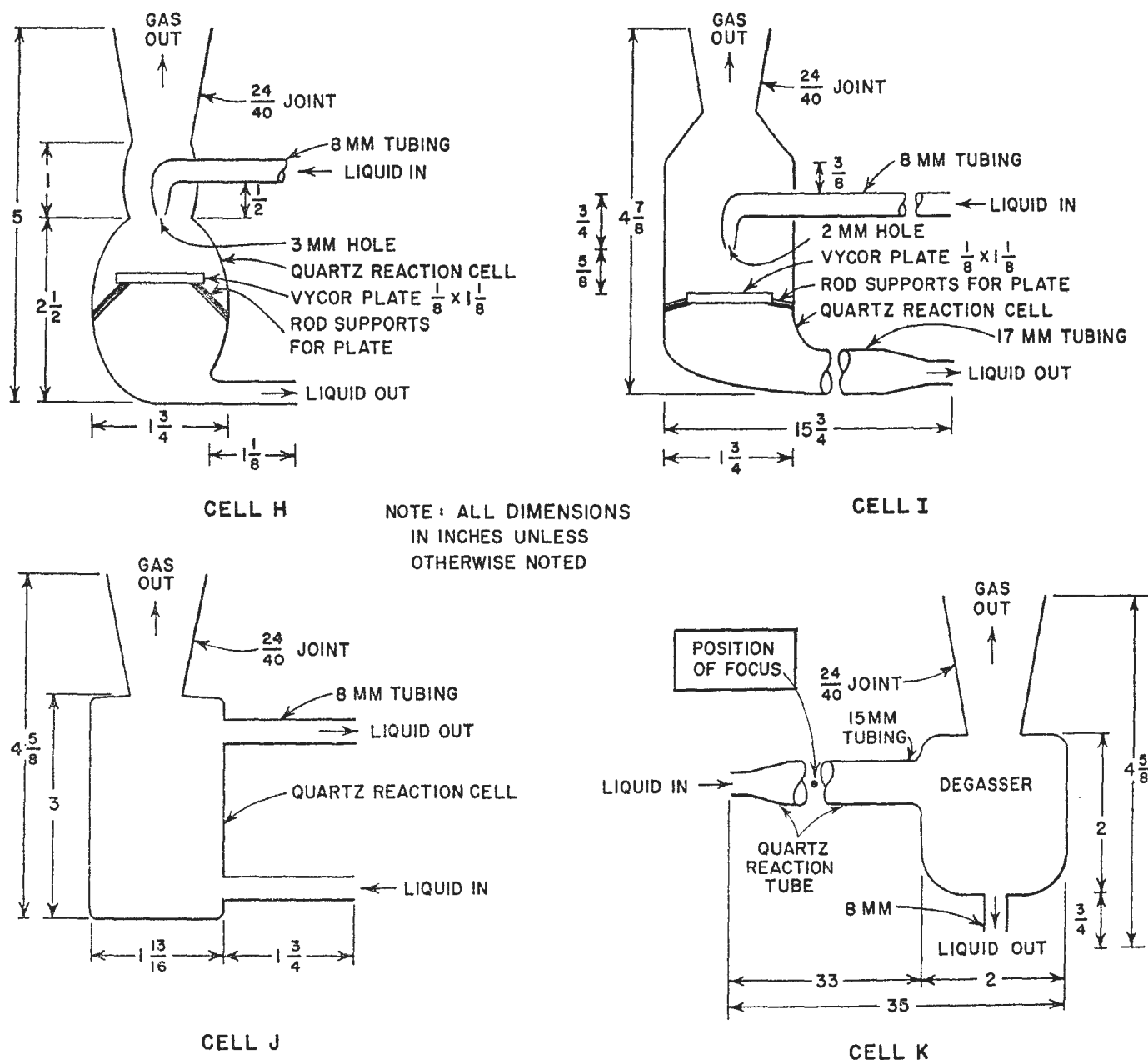


Figure 3

Reaction cells used for liquid photochemical flow systems

In cells H and I, the focal spot is located in the stream between nozzle and splash plate. In cells J and K, the focal spot is at the centre of the liquid

These calculations are carried out for some flow experiments in this series in table 1. It should be noted that the backward rate is a small, but noticeable, part (of the order of 3 per cent) of the net rate, and that the rate of gas evolution perforce decreases to that value when the steady state is established.

The same calculation can be carried out for experiments with the static system, which the authors have shown elsewhere.⁸ The backward rate was somewhat higher in these experiments than it was in the flow experiments, and the net rate of gas evolu-

tion was of the same order of magnitude as that found in the flow experiments.

Light utilization

Nitrosyl chloride in solution absorbs light fairly continuously between 3,000 Å and 6,300 Å.⁹ This absorption covers 38 per cent of the solar spectrum.¹⁰ Since the two-foot-diameter solar furnace collects

⁹ R. J. Marcus and H. C. Wohlers, "Photochemical systems for solar energy conversion — nitrosyl chloride", *Solar Energy*, vol. V, No. 2 (1961), pp. 44-57.

¹⁰ D. Friedman, *NRL Memorandum Report 1005* United States Naval Research Laboratory, December 1959.

⁸ *Ibid.*, figure 5.

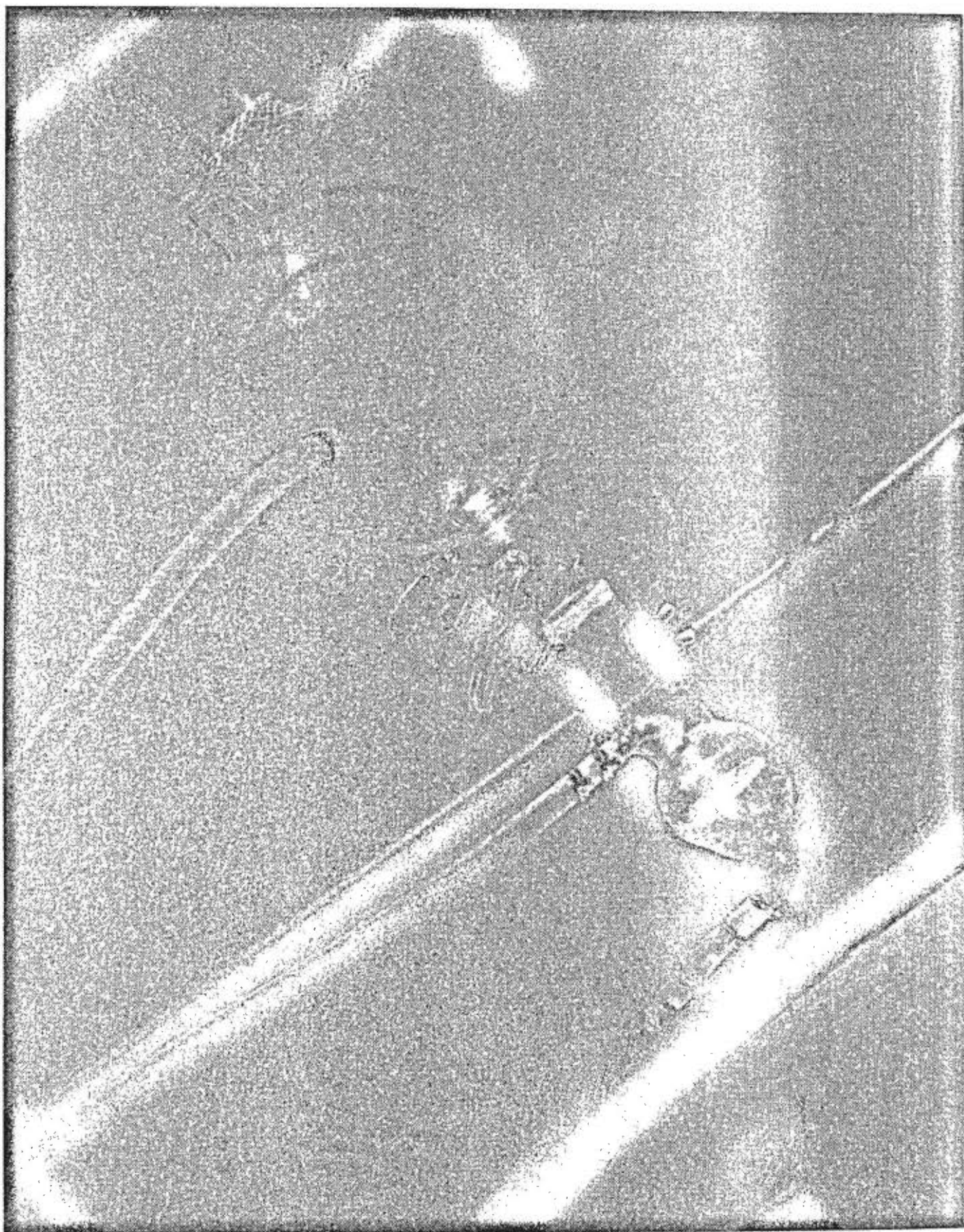


Figure 4

Flow apparatus showing detailed operation of cell H

Photograph taken at f 32, $1/400$ sec

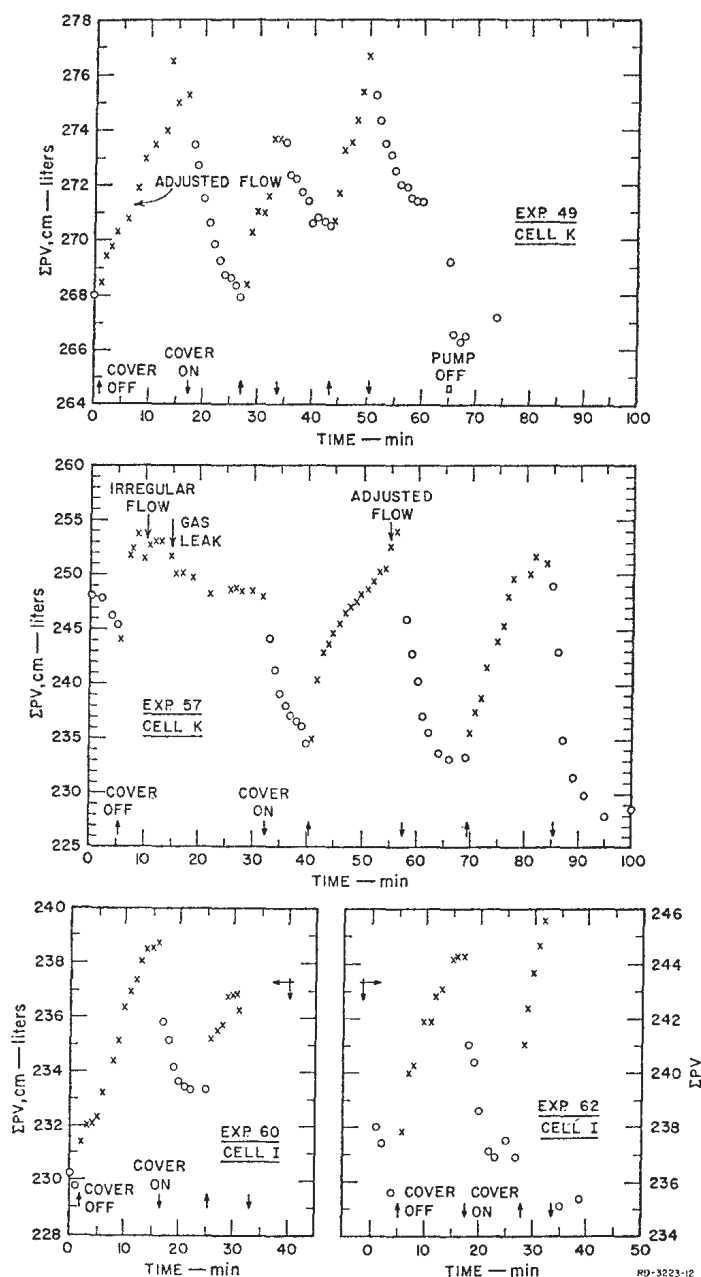


Figure 5

Results of four typical experiments with concentrated (X) and unconcentrated (O) light

49 watts,¹¹ it collects 18.6 watts in the wavelength range absorbed by nitrosyl chloride. This corresponds to a rate of energy collection of 266 cal/min in the 3000-6300 Å wavelength range. If the average energy of a mole of photons is taken as 64 kcal/einstein in that wavelength range, a photon flux ($h\nu_{4,500} \text{ min}^{-1}$) of 4.16×10^{-3} einsteins/min exists at the focal spot.

This figure enables us to estimate a quantum yield, Φ , for gas evolution. When these are calculated from the net rate of gas evolution, they are listed as Φ_N in table 1. When they are calculated from the rate of the forward reaction, they are listed as Φ_F in Table 1. The average of these quantum yields is

0.224, which is of the same order of magnitude as the value reported for a laboratory determination of the optimum quantum yield.¹²

For comparison, quantum yields have also been calculated for experiments with the static system.¹³ These average 0.023 and are a whole order of magnitude smaller than those for the flow system.

It should be pointed out that these rough quantum yields have been obtained without knowing optimum values of such experimental parameters as concentration, flow rate, and configuration of irradiation cell, and also without extrapolation to zero light intensity. Such optimization should be performed when a nitrosyl chloride fuel cell can be attached to the system. Under those conditions the power output and power storage can be measured in terms of light input and the other parameters already mentioned.

One of the differences between the flow system and the static system is illustrated by a light saturation factor. This factor compares the number of molecules of nitrosyl chloride with the number of photons in the focal plane in unit time. It is seen from values of this factor in table 1 that the static system was light-saturated, but that the flow system was not light-saturated.

Energy storage

The most precise indication of energy storage in these experiments would be to measure output from a nitrosyl chloride fuel cell. Since no such device was available, we have added to table 1 two columns showing what this energy storage would be if all of the gas evolved were converted to electrical power. One of these is the product of photon flux (4.16×10^{-3} einstein/min), quantum yield, and free energy of recombination (4.9 kcal/mole). This is the rate of energy storage in cal/min; it can be seen that this is a fraction of a watt. We can also compute the efficiency of this storage by dividing the rate of energy storage by the rate of energy collection (266 cal/min); this efficiency averages 1.71 per cent.

These quantities have also been evaluated for experiments with the static system. The energy storage was somewhat smaller in the static system than in the flow system. The efficiency of this storage averaged 0.18 per cent, or a whole order of magnitude less than the efficiency shown by the flow system.

Efficiency of energy storage

The efficiencies of nitrosyl chloride photolysis which were quoted in the previous section are comparable with the efficiency with which green plants store energy in the open field. This represents a considerable

¹² K. Atwood and G. K. Rollefson, "The efficiency of primary photochemical process in solution", *Journal of Chemical Physics* (New York), vol. 9 (1941), p. 506.

¹³ See footnote 7.

¹¹ See footnote 3.

Table 1

Rates, quantum yields, and calculated energy storage for photolysis of nitrosyl chloride in flow system 7

Experiment No.	Net rate of gas evolution R_N moles/l-min	Rate of backward reaction: $2NO + Cl_2 \rightarrow 2NOCl$ R_B moles/l-min	Rate of forward reaction: $h\nu$ $2NOCl \rightarrow 2NO + Cl_2$ R_F moles/l-min	Net quantum yield Φ_N	Quantum yield for forward reaction Φ_F	Initial NOCl concentration $[NOCl]_0$ moles/l	Flow rates l/min	$\frac{N h\nu}{[NOCl]_0}$ in unit time	Rate of energy storage — $\Phi/F_0 h\nu_{4500}$ min^{-1}	Energy storage in 3,000-6,300 Å range (per cent)
								Light saturation Factor (per cent)	Maximum energy storage cal/min	
FLOW SYSTEM										
49	1.04×10^{-4}	3.32×10^{-6}	1.07×10^{-4}	0.075	0.077	0.243	0.350	4.9	1.53	0.58
	2.26×10^{-4}	1.67×10^{-6}	2.28×10^{-4}	0.16	0.16	0.243	0.350	4.9	3.32	1.2
	2.26×10^{-4}	3.66×10^{-6}	2.30×10^{-4}	0.16	0.17	0.243	0.350	4.9	3.32	1.2
52	1.67×10^{-4}	1.13×10^{-6}	1.68×10^{-4}	0.12	0.12	0.190	0.350	6.3	2.45	0.92
	2.38×10^{-4}	10.2×10^{-6}	2.48×10^{-4}	0.17	0.18	0.190	0.350	6.3	3.51	1.3
55	1.30×10^{-4}	2.14×10^{-6}	1.32×10^{-4}	0.094	0.095	0.059	0.250	2.8	1.92	0.72
57	10.0×10^{-4}	33.8×10^{-6}	10.3×10^{-4}	0.72	0.74	0.283	0.300	3.6	14.7	5.5
	3.73×10^{-4}	53.0×10^{-6}	4.26×10^{-4}	0.27	0.31	0.283	0.300	3.6	5.47	2.1
60	1.65×10^{-4}	6.15×10^{-6}	1.71×10^{-4}	0.12	0.12	0.146	0.400	7.1	2.45	0.91
62	1.47×10^{-4}	5.98×10^{-6}	1.53×10^{-4}	0.11	0.11	0.265	0.350	4.5	2.16	0.81
	6.47×10^{-4}	5.98×10^{-6}	6.53×10^{-4}	0.47	0.47	0.265	0.350	4.5	9.6	3.6
Average				0.224						1.71
STATIC SYSTEM										
46	3.77×10^{-4}	1.83×10^{-5}	3.95×10^{-4}	0.038	0.040	0.162	—	130	0.78	0.29
a	2.24×10^{-4}	1.51×10^{-5}	2.40×10^{-4}	0.022	0.024	0.162	—	210	0.45	0.17
	2.10×10^{-4}	1.63×10^{-5}	2.27×10^{-4}	0.021	0.023	0.162	—	230	0.43	0.16
	1.82×10^{-4}	2.34×10^{-5}	2.04×10^{-4}	0.018	0.020	0.162	—	310	0.36	0.14
	1.68×10^{-4}	0.67×10^{-5}	1.75×10^{-4}	0.017	0.018	0.162	—	230	0.35	0.13
Average				0.023						0.18

* SOURCE: R. J. Marcus and H. C. Wohlers, "Photolysis of nitrosyl chloride in solar furnace", *Solar Energy*, vol. IV, No. 2 (1960), figure 5.

advance over conversion efficiencies previously available in inorganic chemical systems.

We have discussed various possible reactions, which might show higher efficiencies, in another paper.¹⁴ Unfortunately, the extensive tables of that paper cannot be reproduced here, so we will have to be satisfied with quoting one conclusion.

¹⁴ R. J. Marcus and H. C. Wohlers, "Flow systems in the solar furnace and photolysis of nitrosyl chloride," *Solar Energy*, vol. V, No. 4 (1961), pp. 121-128.

Since the efficiency of energy storage depends in part on the energy of recombination of the photo-products, we must look for reactions whose heat of recombination is higher than the 4.9 kcal/mole for nitrosyl chloride. Such reactions do not seem to be available in solution with the present state of the art. Such reactions are available, however, in fused salts, and we look forward to experiments on the photolysis of fused salts. One possible reaction is the photolysis of molten silver chloride, where the energy of recombination is 26.2 kcal/mole.

Summary

We have found that the solar furnace can be used as a light source as well as a heat source. The equipment which has been developed for this use of the furnace is described. With these modifications the solar furnace becomes a concentrated light source. It operates at ambient temperature or below,

requires little or no refrigeration, and can be used for photochemical reactions. The systems chosen for use with this light source absorb light only in selected wavelength regions, thus resulting in a minimum heat absorption. In this way the focal spot of the furnace can be contained within a liquid.

Of the energy storing reactions run so far in the solar furnace in order to try out this technique, only the photolysis of nitrosyl chloride occurs in sunlight at the earth's surface. Other reactions occur at lower wavelengths present only in space. It is quite obvious that this technique has potential usefulness for the conversion and storage of solar energy, and that other reactions should be explored with it.

The photolysis of nitrosyl chloride in carbon tetrachloride solution has been studied in static and in flow systems in a two-foot-diameter solar furnace. An average quantum yield of 0.0232 has been obtained in the static system. An average quantum yield of 0.224 has been obtained in the flow system. Experimental conditions in the flow system have not yet been optimized for maximum quantum yield. The ten times higher quantum yield in the flow

system is due to better separation of the photolysis products, nitric oxide and chlorine.

The maximum energy storage achieved so far with nitrosyl chloride is 0.18 per cent and 1.71 per cent of the incident energy in the 3,000 to 6,300 Å range for the static system and the flow system, respectively. The latter energy storage is comparable to that of a green plant in an open field.

For comparable quantum yields, a greater amount of energy will be stored by reactions whose products recombine with greater energy release than the 4.9 kcal released by the recombination of nitric oxide and chlorine to form nitrosyl chloride. An example of such possible reactions is the photolysis of molten silver chloride, whose recombination energy is 26.2 kcal/mole.

CONVERSION CHIMIQUE ET EMMAGASINAGE D'ÉNERGIE SOLAIRE CONCENTRÉE

Résumé

On a établi que le four solaire peut être utilisé comme source de lumière aussi bien que de chaleur. On décrit, dans le mémoire, le matériel qui a été mis au point en vue de cette application. Avec ces modifications, le four solaire se transforme en source de lumière concentrée. Il fonctionne à la température ambiante ou au-dessous, n'exige pour ainsi dire pas de refroidissement et peut être utilisé pour les réactions photochimiques. Les systèmes choisis en vue de leur utilisation avec cette source de lumière n'absorbent celle-ci que dans les plages de longueurs d'ondes choisies; si bien que la chaleur ainsi absorbée, elle aussi, est réduite au minimum. De la sorte, le foyer du four peut être contenu dans un liquide.

Parmi les réactions visant à accumuler de l'énergie sur lesquelles on a procédé jusqu'à présent à des expériences dans le four solaire pour soumettre cette technique à des essais, seule la photolyse du chlorure de nitrosyle se produit à la surface de la terre sous l'action des rayons solaires. D'autres réactions apparaissent à des longueurs d'ondes moindres, que l'on ne rencontre que dans l'espace interplanétaire. Il est tout à fait évident que cette technique présente une utilité possible pour la conversion et l'accumulation de l'énergie solaire et que d'autres réactions devraient être étudiées parallèlement à elle.

La photolyse du chlorure de nitrosyle dans une solution de tétrachlorure de carbone a été étudiée dans des systèmes statiques et avec écoulement,

dans un four solaire de 2 pieds (61 cm) de diamètre. On a obtenu de la sorte, un rendement quantique moyen de 0,0232 avec le système statique. Un rendement quantique moyen de 0,224 a été réalisé avec un système à écoulement. Les conditions expérimentales, dans le système à écoulement, n'ont pas encore été perfectionnées au point de donner le rendement quantique maximum. Le rendement dix fois supérieur que l'on obtient dans les systèmes à écoulement s'explique par une meilleure séparation des produits de la photolyse, le bioxyde d'azote et le chlore.

Les proportions maximums d'emmagasinement réalisés jusqu'à présent avec le chlorure de nitrosyle sont de 0,18 p. 100 et 1,71 p. 100 de l'énergie incidente dans la gamme de longueurs d'ondes s'échelonnant de 3 000 à 6 300 angströms, pour les systèmes statique et à écoulement, respectivement. Le second chiffre est comparable à celui que donne une plante verte dans un champ ensoleillé.

A rendement quantique comparable, une plus grande quantité d'énergie sera emmagasinée par les réactions dont les produits se recombinent avec une libération d'énergie supérieure aux 4,9 kilocalories dégagées par la recombinaison du bioxyde d'azote et du chlore pour donner du chlorure de nitrosyle. Un exemple de réaction de cet ordre est la photolyse du chlorure d'argent fondu, dont l'énergie de recombinaison est de 26,2 kilocalories par molécule-gramme.

THE CHEMICAL CONVERSION OF SOLAR ENERGY TO ELECTRICAL ENERGY

C. Roland McCully

Scientific Adviser, Armour Research Foundation
Illinois Institute of Technology
Chicago

The requirement for electrical energy in circumstances in which solar energy but not mechanical energy is available is becoming acute. This leads to interest in thermally regenerative galvanic cells which comprise complete systems for chemical conversion of heat energy to electrical energy. Systems to accomplish this based on lithium or calcium hydride have been described in the original work by Shearer and Werner (1, 2), and are under study also by the Thompson Ramo Wooldridge company (3) and the Lockheed Aircraft Corporation, of the United States. (4) Limiting efficiencies computed for these systems have varied with the author from 35 to 45 per cent, and in one case, operating efficiencies were predicted to be 11 per cent. A number of other thermally regenerative systems have been discussed in the technical literature, for example by King (5) and Henderson, (6) although none of these appear to have been studied to the extent of the lithium-hydride system.

An apparently unique approach to the problem of the thermally regenerative galvanic cell has been under investigation at the Armour Research Foundation in Chicago for several years. In this research, the tools of chemical thermodynamics and thermochemistry were used to explore hundreds of systems, comprising the simple oxides, halides, carbides, nitrides, and some hydrides, for suitable characteristics. A number of systems offering increased limiting efficiencies over the lithium hydride system were disclosed. Another development has been a complex galvanic cell combining two electron donors with a single electron acceptor. In addition to offering increased limiting efficiencies, the complex system makes it possible to operate both the galvanic cell and regeneration reactions each at more ideally suited temperatures. Most important, a stable voltage output over a considerable range of cell temperatures is also possible.

A number of these systems have been studied in experimental work designed to test the thermodynamic calculations. This has involved operation of the regeneration reactions and the galvanic cell on batch bases. With systems comprised of chemical compounds for which the thermochemical data are accurately known, the experimental cell potentials have agreed closely with the predicted potentials.

PRINCIPLES OF THE CHEMICAL CONVERSION METHOD

The battery, or galvanic cell, is recognized to function by converting chemical energy to electrical energy. The efficiency of this conversion can be high. However, the chemical energy stored in a battery is limited, and in general it is much less on a weight basis than the chemical energy stored in conventional fossil fuels.

An earlier assumption that the electrical energy produced by a galvanic cell was equivalent to the change in heat content of the system was shown to be inaccurate by J. W. Gibbs (in 1875) and by H. Helmholtz (in 1882), and electrical energy was shown to be equal to the free energy change of the process taking place. (7, 8) Hence the well-known expression:

$$\Delta F = nFe \quad (1).$$

Whether or not the free energy (ΔF) is equal to, less than, or greater than the change in the heat content (ΔH) depends on whether the entropy (ΔS) change accompanying the cell reaction is zero, negative, or positive, respectively (9). These relationships for a reversible process (10,11) are given by another standard equation:

$$\Delta F = \Delta H - T \Delta S \quad (2).$$

If Δ is greater than ΔH , a cell will drop in temperature unless heat is supplied, whereas it will tend to increase in temperature if ΔH is greater than ΔF . (10)

When a heat source is available, thermal regeneration of chemicals for the galvanic cell is of interest. The entire system, including the galvanic cell chemicals, must be compatible to this process. Among the more suitable systems are those having reactions which are thermally reversible over a limited temperature range. This property is disclosed by the slope or slopes of the free energy of formation (ΔF^0) versus temperature curves (figure 1), that is the entropy of formation (ΔS) or ratios ($\Delta S_1/\Delta S_2$), where the subscripts indicate oxidation states. Reactions predicted from figure 1 to be spontaneous at 300°K (degrees Kelvin) are listed below, followed by the respective reverse reactions, each predicted to be spontaneous at the temperature given. The values for ΔF are given in kcal.

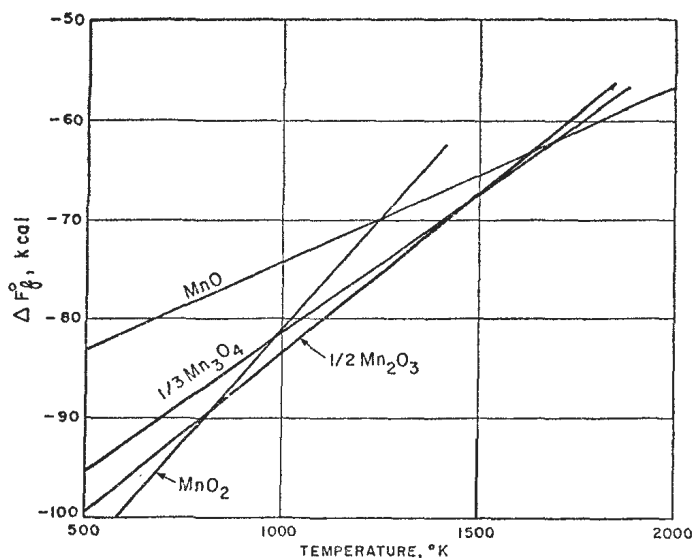
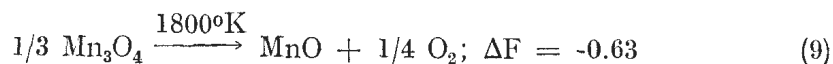
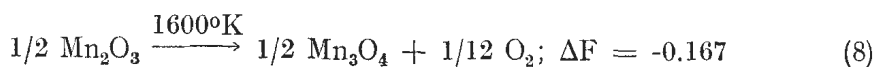
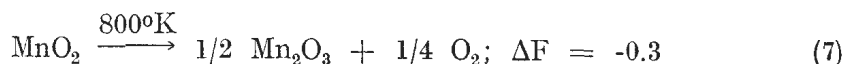
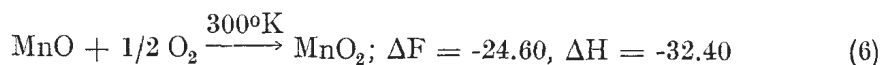
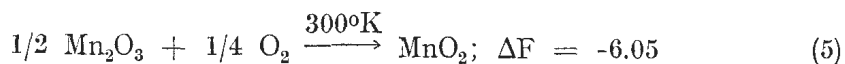
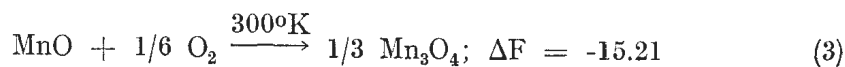


Figure 1

Variation of standard free energy of formation with temperature

listed entropy of formation ratios of several interesting oxides.

For the purpose of demonstrating the principles involved, a system of manganese oxides and a system combining manganese and silver oxides have been selected, since thermodynamic and thermochemical data for these systems are quite accurate compared to data for more promising systems. In the simplest form, the manganese oxide system involves two reactions, one the reverse of the other, as shown in equations (6) and (10), respectively. Reaction (6) is exothermic, giving off heat, and thermodynamically it occurs at moderate temperatures (i.e., 500°K): It can be made the basis for a galvanic cell having a limiting efficiency, $\Delta F/\Delta H$, of about 62 per cent.

Reaction (10) can be made to take place at higher temperatures e.g., 1,400°K, and it is endothermic, taking on heat.¹ The amount of heat taken on can be calculated by standard thermochemical procedures from data compiled by Coughlin, (12) Glassner, (13) Quill, (14) and others. Figure 2 is

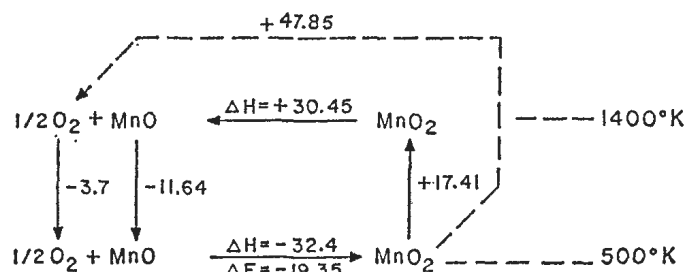


Figure 2

Thermally regenerative system
for galvanic cell of manganese oxides

Such thermochemical and thermodynamic data have been used at the Armour Research Foundation for the review of a very large number of the simple chemical reactions, and several promising systems have been disclosed among the oxides, halides, oxyhalides, sulfides and hydrides of the elements. Some of these are solids and some are liquids at the indicated operating temperatures. In table 1 are

Table 1

Ratios of entropies of formation at 298° K

Atomic No.	Species	S° ratio	Atomic No.	Species	S° ratio
25	MnO ₂ /MnO	2.47	47	Ag ₂ O ₂ /Ag ₂ O	2.74
27	1/3 Co ₃ O ₄ /CoO	1.54	51	Sb ₂ O ₅ /Sb ₂ O ₃	1.66
29	CuO/1/2Cu ₂ O	2.44	75	1/2 Re ₂ O ₃ /ReO ₃	1.35
33	As ₂ O ₃ /As ₂ O	1.76	81	Ti ₂ O ₄ /Ti ₂ O	4.24
45	Rh ₂ O ₃ /Rh ₂ O	5.3	82	PbO ₂ /PbO	1.92
			92	UO ₃ /UO ₂	1.47

¹ For the manganese oxide system, actual decomposition from MnO₂ to MnO may in part take place through intermediate decomposition to Mn₂O₃ and Mn₃O₄, requiring higher temperatures to attain MnO. This is evident from the variations of ΔF° with temperature, as given in figure 1. However, achieving MnO + 1/2 O₂ at 1,400°K by this roundabout system requires +47.12 kcal., which is essentially in agreement with the +47.85 kcal. indicated in figure 2.

a representation of this system including the energy changes, in kilocalories, involved in each step. The actual galvanic cell for the system of figure 2 would require, as an example, the adsorption of oxygen on MnO_2 , which would result in a transfer of oxygen ions (O^-) through an electrolyte to react with the MnO , producing MnO_2 and electrons for the external electrical circuit.

Several elements of the above type of galvanic cell do not appear as favourable as those of a more complex type involving separate oxide systems; examples are those of manganese and silver as depicted in the dashed line rectangle in figure 3. The electrodes are the negative MnO and the positive Ag_2O . The regeneration cycle for the manganese oxides remains as in the previous example. For the silver oxide regeneration cycle the temperature is lowered, for example, to 300°K , at which temperature the regeneration reaction is thermodynamically favoured by a negative ΔF .²

All energy changes for the several steps of the complete cycle, as computed by standard thermochemical practice (7, 8, 15) from compiled data, (12, 14) appear in figure 3. Summation of the energy changes gives $+0.10$ kcal, which is equivalent to zero, as required theoretically, when the uncertainties in the compiled data are considered. In this summation it is assumed that no energy is taken from the galvanic cell and that no energy enters the system.

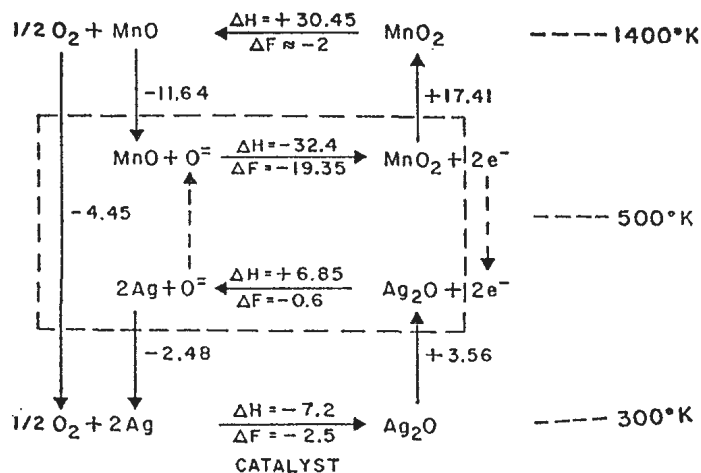


Figure 3

Thermally regenerative system
for galvanic cells of manganese and silver oxides

The maximum energy that can be taken from the cell is the sum of the free energy changes of -19.95 kcal, and the $\Delta F/\Delta H$ ratio is 0.78. This is indicative of a maximum efficiency for the cell, provided that other factors not concerned in the above calculation are also favourable.

To determine the limiting efficiency of the cyclic system to produce electrical energy, it is necessary

to determine the required heat input to sustain the cyclic operation producing the electrical energy output. For this purpose it is assumed that a material being lowered in temperature can be used to increase the temperature of another material with no loss of heat. The total heat required for raising and lowering temperatures in the manganese oxide system is 17.41 and 15.34 kcal, respectively, so that the net heat required is then $+2.07$ kcal. This $+2.07$ added to the $+30.45$ kcal for endothermic regeneration of MnO at $1,400^\circ\text{K}$ gives a total of 32.53 kcal required by the manganese oxide system. The galvanic cell operates exothermically ($\Delta H - \Delta F = -5.60$ kcal), so that it more than meets all the heat requirements of lower temperature phases. Total heat required is then the $+32.52$ kcal as given above, and this should also equal the sum of the heat exhausted ($-5.6 + 0.23 - 7.2 = 12.57$ kcal) and the electrical energy produced, 19.950 kcal, which equals 32.52 kcal and is equivalent to agreement. The limiting over-all efficiency is then

$$\frac{\Delta F}{\Delta Q} = \frac{19.95}{32.52} = 0.614$$

and the Carnot efficiency computed for the same temperature interval, $300^\circ\text{K} - 1,400^\circ\text{K}$, is 0.785.

Limiting efficiencies are lower than Carnot efficiencies, primarily because the total ΔF is not being utilized to produce electrical energy.³

Information on weight per unit of power can be estimated only if regeneration and cycling rates are known or assumed. It is seen from figure 3 that $19.35 + 0.6 = 19.95$ kcal, equivalent to approximately 81 kilowatt-seconds, is obtained ideally from every 1 mole of MnO_2 plus 1 mole of Ag_2O , or 0.8 lb of chemicals, discharged. Assuming that electrolyte and containment materials bring the total weight to 2 pounds, power storage capacity becomes 10 watt-hours per pound. Cycled once a second, power output would be 36 kW per lb. Cycled once a minute, considered a conservative estimate, the power output is still 0.60 kW per lb.

APPLICATIONS

The ratio of power output to weight and the information on conversion efficiency given in the previous paragraphs suggest that the chemical method of energy conversion should find applications wherever a heat source is available. Combustible fuels and nuclear energy are excellent heat sources; however, in this paper the discussions will be limited to solar energy as the heat source. This source can be considered as equivalent to about 400 BTU per hour per square foot under clear sky conditions at latitudes near the equator.

Two types of configuration of the chemical conversion method that offer promise for thermal regeneration with solar energy source are presently

² This reaction, without a catalyst, is known to take place very slowly, otherwise silverware would not be sought for dinnerware.

³ Liebhafsky apparently does not recognize this as a limitation. (16)

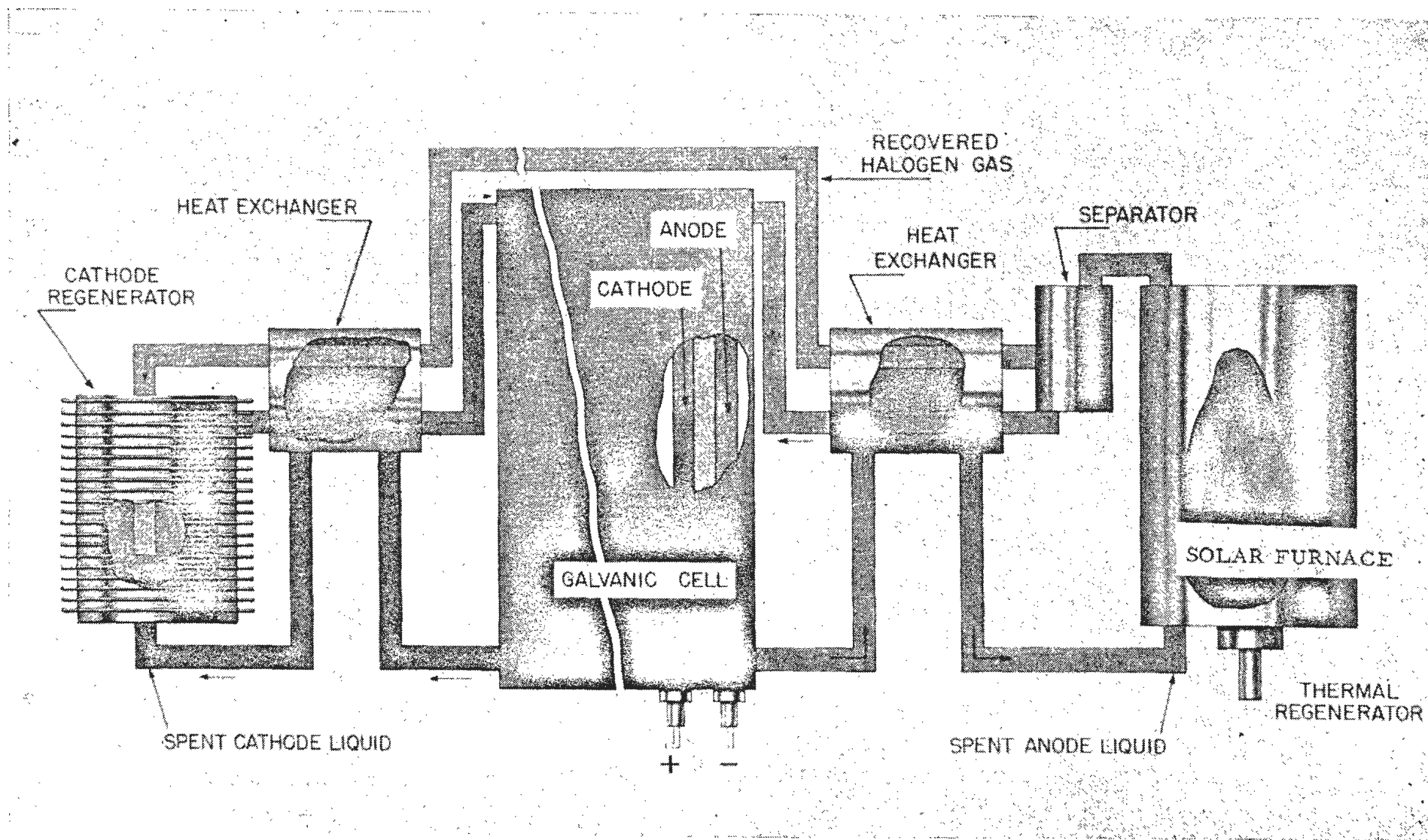


Figure 4

Conversion of heat to electricity using thermally regenerative galvanic cell of liquid halides

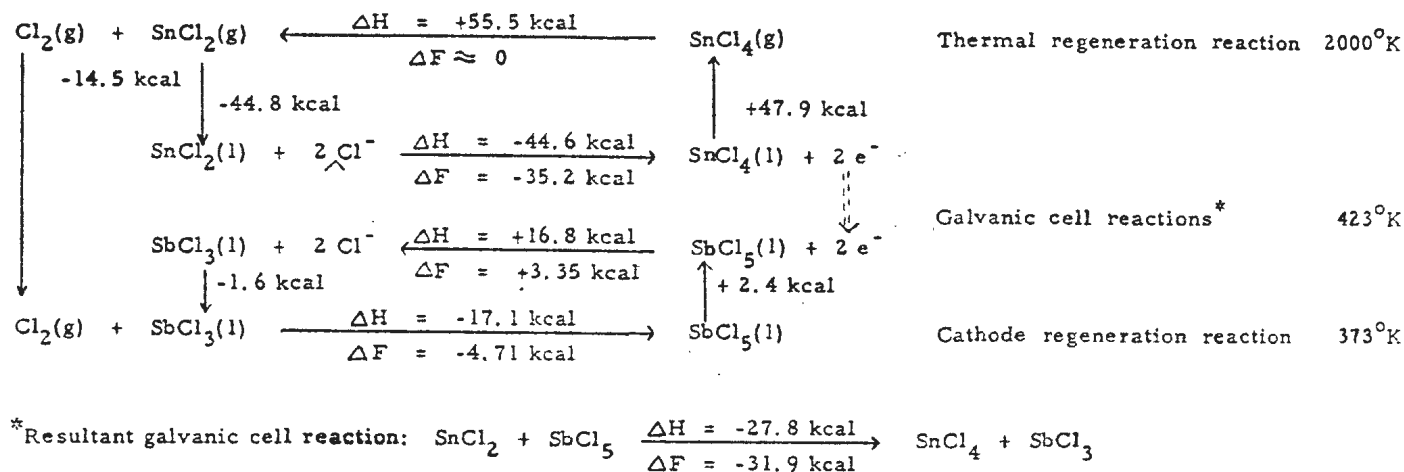


Figure 5

Thermally regenerative system for galvanic cell of antimony and tin chlorides

under development at Armour Research Foundation. One of these utilizes molten salts that circulate through the galvanic cell and the regeneration systems. The efficiency of these systems can be high — in the range of 50 to 55 per cent — when equipped with pumps, regenerative heat exchangers, and controls. Storage of regenerated chemicals, and thus power storage, can be inherent with this system. The second system is possibly less efficient but also less complex, as no circulation is required. It is less developed than the first.

Operation of the first system is depicted in figure 4; molten halide salts are circulated by natural convection. Heat input to the system takes place via the solar furnace that serves for the thermal regeneration of the spent anode liquid. Heat is rejected from the system via the cathode regenerator. A halogen gas is recovered from thermal regeneration of the anode liquid and reacts with the spent cathode liquid to regenerate the cathode liquid. Operational temperatures are completely dependent upon the chemical systems selected. Usually the cathode regenerator and galvanic cell operate at similar temperatures, with the cathode regenerator at the lower temperature. The thermal regenerator operates at a considerably higher temperature. A separator ensures that the two components of the thermal regeneration can be parted. Regenerative heat exchangers conserve heat, and, when power storage is desired, reservoirs are supplied for the regenerated molten anode and cathode liquids.

Chlorides of antimony (Sb) and tin (Sn) have been studied as a thermally regenerative galvanic cell system of this type. The chemical reactions and energy balance are depicted in figure 5. The heat input to this system is 55.5 kcal for a maximum useful energy output of 31.9 kcal, which means a limiting conversion efficiency of about 57.5 per cent. It is apparent from the ratio $\Delta F/\Delta H$ that the galvanic cell can be endothermic, though possibly not when operated under load. Experimental galvanic cells (figure 6) based on the above system have operated

successfully with current densities of 50 amperes per square foot. Computations extrapolate this value to the range of 500 amperes per square foot with forced circulation and a thinner electrolyte.

Regeneration of the cathode liquid, SbCl_5 , from the spent cathode liquid, SbCl_3 , is very rapid even at temperatures approaching the cell operating temperature.

Thermal regeneration of the anode liquid, SnCl_2 , is more difficult, primarily because both the SnCl_2 and Cl_2 produced are gases at the regeneration temperature. It should be noted that both the chemical properties and molecular weights differ widely. Practical methods of separating these gases are now under study.

With the Sb-SnCl₂ system it is computed that 0.8 pounds of chemicals per minute must be circulated and 6,360 BTU per hour must be adsorbed for each kilowatt of power generated. Considering that the

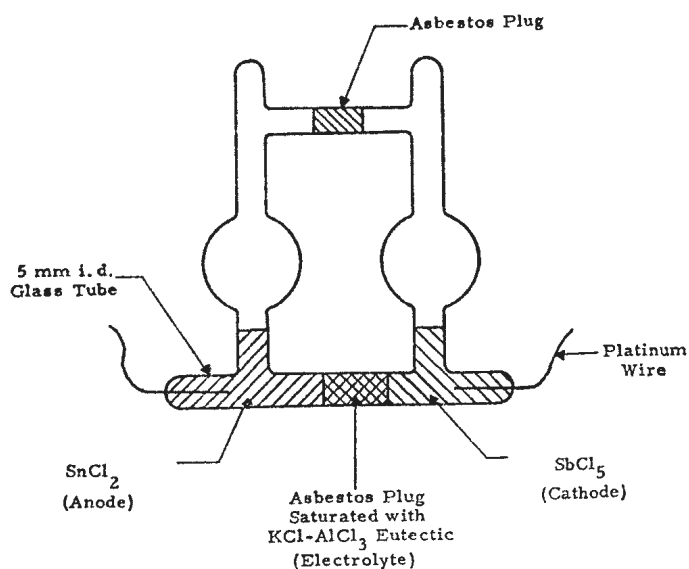


Figure 6

Stannous chloride-antimony pentachloride cell

Table 2

Variation of SbCl_5 - SbCl_3 equilibrium with temperature

Température, °C	Mol. Per cent SbCl_5 ^a
178.5	59
166	82
154	92
141	94
123	96
99	98
77	99
24.4	114 ^b

^a In SbCl_5 - SbCl_3 mixture equilibrated with gaseous chlorine at temperature.

^b Excess of stoichiometry believed due to formation of $\text{SbCl}_5 \cdot 2\text{Cl}_2$ at room temperature.

available 400 BTU per hour per square foot of solar energy is adsorbed at a temperature of 2,000°K and estimating the conversion efficiency of chemical systems as 0.4, one calculates approximately 65 square feet of projected area per kilowatt for a parabolic mirror reflector with a 1-in-diameter adsorber. Thus, a parabolic reflector with an 8-ft diameter could serve for a 1-kW power source. If we assume that a 1-kW capacity for a 24-hour day is obtained from 8 hours of available solar energy, a storage capacity for 720 lb of chemicals is required. This is equivalent to two storage vessels of 3 cubic

feet capacity each. The diameter of the parabolic reflector becomes approximately 12 feet for a 3-kW system; and the galvanic cell, regenerators, and heat exchangers can be accommodated in a cylindrical volume with a 9-inch diameter and 1.5-foot length. The cost of the 720 lb of chemicals is \$360. The cost of the entire system could be as great as \$2,000 unless it is mass produced.

CONCLUSION

In spite of their relative simplicity, conversion efficiency, and other favourable factors, thermally regenerative galvanic cells operated from solar energy do not appear to offer a promising power source of general application unless mass production is undertaken.

ACKNOWLEDGEMENTS

The work reported herein received support from the Armour Research Foundation and the United States Navy Department, Bureau of Naval Weapons, Contract No. NO-60-0760-C. The contribution of Dr. Richard Snow, Dr. Fred Morritz, and Messrs. Ted Rymarz, Stanley Nicholson, Gordon Johnson, and George Macur are gratefully acknowledged.

[Note. A list of bibliographical references appears on page 202, after the French text of the summary which follows.]

Summary

Thermally regenerative galvanic cells have been discussed in the technical literature as devices for the chemical conversion of heat energy to electrical energy. Usually operational efficiencies have been predicted as lower than those conventionally obtained through a steam cycle. At the Armour Research Foundation the variations of free energies of formation with temperature have been studied for the simple oxides, halides, carbides, nitrides, and some hydrides, of the elements. Limiting conversion efficiencies have been computed for systems with suitable properties for thermal regenerations. Galvanic cells of these systems have been operated and regeneration reactions separately studied. One of these systems, representative of those composed primarily of solids,

comprises the oxides of silver and manganese, as cathode and anode respectively, and serves as a basis for discussion of principles involved in the chemical conversion method. Another system, comprising the chlorides of antimony and tin, is representative of systems primarily liquid, and affords several advantageous operational characteristics. For application to solar energy conversion one computes 65 square feet of projected area per kilowatt (of power produced) as required for a parabolic mirror reflector. The computed conversion efficiency for the solar energy accepted is 0.4 (40 per cent). Problems remain regarding the separation of the components after the thermal regeneration of the anode chemicals.

CONVERSION CHIMIQUE DE L'ÉNERGIE SOLAIRE EN ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

Résumé

Les cellules galvaniques à régénération thermique ont été passées en revue dans la littérature technique comme moyen de conversion chimique de l'énergie thermique en énergie électrique. Normalement les rendements d'exploitation ont été prévus comme devant être moindres que ceux que l'on obtient d'une manière classique avec le cycle de la vapeur. A la fondation de recherches Armour, on a étudié

les variations avec la température des énergies libres de formation pour les oxydes, les halures, les carbures, les nitrures et certains hydrures simples des éléments. Les rendements de conversion limite ont été calculés pour des systèmes ayant les propriétés voulues pour la régénération thermique. Les cellules galvaniques de ces systèmes ont été exploitées et les réactions de régénération ont été étudiées séparé-

ment. Un des systèmes qui représente ceux qui sont constitués essentiellement par des solides comprend des oxydes d'argent et de manganèse, pour la cathode et l'anode respectivement, et sert de base à la discussion des principes qui interviennent dans la méthode de conversion chimique. Un autre système comprend les chlorures d'antimoine et d'étain. Il est typique pour les systèmes essentiellement liquides, offrant plusieurs caractéristiques de fonctionnement

avantageuses. Pour l'application de la conversion de l'énergie solaire, on calcule 65 pieds carrés de surface projetée par kilowatt de puissance produite comme étant nécessaires pour un réflecteur à miroir parabolique. On admet que le rendement de conversion calculé pour l'énergie solaire est de 0,4 (40 p. 100). Il reste des problèmes dans la séparation des éléments après régénération thermique des composés chimiques de l'anode.

REFERENCES

- (1) R. E. Shearer and R. C. Werner. Thermally regenerative ionic hydride galvanic cell. *Journal of the Electrochemical Society* (Baltimore, Maryland), No. 105 (1958), (p. 693).
- (2) R. E. Shearer. Study of energy conversion devices. United States, ASTIA (Armed Services Technical Information Agency, Arlington, Virginia), AD report No. 230503 (30 Sept. 1960).
- (3) M. G. Del Duca *et al.* Regenerative fuel cells as space power systems. American Rocket Society, 14th annual meeting and astronautical exposition, held in Washington, 16-20 Nov. 1959. New York, American Rocket Society, paper No. 1039-59.
- (4) H. P. Silverman. Solar regenerative chemical system. United States, ASTIA, AD report No. 233858 (29 March 1960).
- (5) J. King *et al.* General evaluation of chemicals for regenerative fuel cells. Space power systems conference, held at Santa Monica, California, 27-30 Sept. 1960. New York, American Rocket Society, paper No. 1299-60.
- (6) R. E. Henderson *et al.* Résumé of thermally regenerative fuel cell systems. Space power systems conference, Santa Monica. New York, American Rocket Society, paper No. 1301-60.
- (7) F. H. MacDougall, *Thermodynamics and chemistry*, third edition. New York, John Wiley, 1939. 491 pp (p. 369).
- (8) S. Glasstone. *Textbook of physical chemistry*, second edition. New York, Van Nostrand, 1947. 1320 pp (p. 923).
- (9) *Ibid.* (p. 924).
- (10) *Ibid.* (p. 230).
- (11) *Ibid.* (p. 112).
- (12) J. P. Coughlin. Contribution to data on theoretical metallurgy. United States, Bureau of Mines, bulletin 542 (1954).
- (13) A. Glassner. The thermochemical properties of oxides, fluorides, and chlorides to 2500°K. United States, Atomic Energy Commission, ANL report No. 5750 (1957).
- (14) L. L. Quill. The chemistry and metallurgy of miscellaneous materials; thermodynamics. New York, McGraw-Hill, 1950. 329 pp.
- (15) R. R. Wenner. *Thermochemical calculations*. New York, McGraw-Hill, 1941. 384 pp.
- (16) H. A. Liebhafsky. The fuel cell and the Carnot cycle. *Journal of Electrochemical Society* (Baltimore, Maryland), No. 106 (1959) (pp. 1068-1071).
- (17) S. Glasstone, *op. cit.* (pp 184-185. 216 and 217).

GAS PRODUCTION BY DESTRUCTIVE DISTILLATION USING SOLAR HEAT IN COMBINATION WITH A SELF-SUFFICIENT GAS GENERATOR AND GAS STORAGE TANK FOR CONTINUOUS GAS AND POWER SUPPLY

Hugo Melzer, Engineer

Emprêsa Fluminense de Energia Elétrica, S/A
Niterói, R.J., Brazil

INTRODUCTION

In the tropical, non-industrialized region of Brazil, stretching from the northern part of the State of Minas Gerais to the southern part of the State of Amazonas, and particularly in the State of Maranhão, there are large areas of unexploited vegetation. Of this vegetation the babassu palm with its oil-yielding kernel and its useful shell is of considerable importance for the production of industrial oil, gas and power. Originally, only nuts of the finest quality were used. They were manually cracked and shelled in place and the kernels transported to the oil extraction plants, frequently after considerable delay, with consequent risk of the oil turning rancid. In the last two decades, however, research and experiment have been directed towards greater efficiency in babassu-nut production.

PRELIMINARY RESEARCH

The National Economic Council of Brazil has calculated that the babassu growth covers an area of 80,000 square kilometres in Maranhão alone, with 10,000 sq km in the State of Piauí; the growth density varies between 250 and 3,000 trees per hectare.(1) The large vegetation areas were located by photogrammetry, and it was confirmed that Maranhão, Piauí and northern Goiás alone contained about one billion babassu palms with a potential yield of 120 million tons of nuts giving 7.2 million tons of kernels.

It is evident that a pilot project located in the areas of the greatest density of this palm vegetation, often far from the usual sources of energy, needs enough energy for cracking and shelling the nuts and extracting the oil. Energy is also needed for lighting and the transport of large quantities of raw material. Although the easiest course might be to produce power simply by burning the shells in a boiler furnace, it seemed more efficient to proceed by destructive distillation yielding not only gas for stationary power production, but also charcoal for operating trucks, and other subsidiary products, such as tar for paving roads.

In an experimental distillation of the babassu palm kernels at a pilot station, in a retort fired by

regular illuminating gas of 4,400 kilocalories per cubic metre, each ton of babassu-nut shells produced the following average yield :

	<i>Kcal</i>
360 m ³ distillation gas of about 3,600 kcal/m ³	1,296,000
270 kg charcoal of about 7,800 kcal/kg	2,106,000
50 kg tar of about 9,630 kcal/kg	481,500
TOTAL PER TON	3,883,500

The remaining 320 kg (32 per cent of the total weight of the raw material) was a pyrogenous liquip of no economic value.

Distillation in the pilot station at temperatures from 600 to 1,050°C required 2 to 2-1/2 hours, which means that roughly 300,000 kcal had to be supplied by the illuminating gas. From the residual charcoal up to 110 m³ of water-gas of 2,600 kcal/m³ were obtained. This represents a yield of 286,000 kcal, or some 5 per cent less than would be necessary to distill the babassu-nut shell charge.

A patented, self-contained gas generator, "Delima", has been designed for greater efficiency. This is a stationary vertical unit in which incandescent charcoal is used directly for the production of water-gas to run small power production units of 50, 100 or 200 horsepower, and it is designed for eventual amplification. (3,4) For the State of Maranhão a complete electrification plan has been worked out. (5) The plan calls for 145 power stations of very small capacity, using locally produced gas, for areas of small population density, where large power transmission systems would be uneconomic.

Nevertheless, it appeared desirable to increase the margin for charcoal and power production. It is therefore suggested that this small but essential supplementary energy should be produced from the abundant solar heat of the tropics.

INSOLATION

Most of the areas of babassu palm vegetation are in the tropical and subtropical zones, (6) with very high "normal insolation", (7) as shown in figure 1. Table 1 is a list of stations throughout Brazil with insolation statistics, averaged over periods from 6 to 25 years, in descending order from 3,334.4 to



Figure 1

Areas covered by babassu-palm vegetation and mineral pyrobituminous shale. The "polygon of drought", provided with federal assistance against droughts, is approximately the area delimited by the dotted line joining stations 13, 3, 4 (along the coastline), 16, 26, 21, 30 and 8. It does not include the State of Maranhão (V)

1,590.7 hours of direct sunshine per year. It can easily be seen that the amount of direct sunshine per year varies widely.

Station No. 11 (São Luiz, 2°32'S) has a normal insolation of 2,600.9 hours. This is a relatively good

figure, though it is probable that higher figures could be found elsewhere in Maranhão. São Luiz is the state capital, and the greatest effort to exploit babassu industrially has been made in this area (e.g., Quelrú experimental station). (8)

Table 1

Statistics of "normal insolation", averaged over periods from 6 to 25 years at 34 observation stations throughout Brazil (see figure 1)

Number and location of station	Latitude (south)	Longitude (west)	Height above sea level	Hours of direct sunshine per year
1. Fernando Noronha (Pernambuco)	03°50'	32°25'	45	3,334.4
2. Quixeramobim (Ceará)	05°12'	39°18'	198	2,987.1
3. Fortaleza (Ceará)	03°46'	38°31'	27	2,841.9
4. Natal (Rio Grande do Norte)	05°46'	35°12'	8	2,810.0
5. Aracaju (Sergipe)	10°55'	37°03'	6	2,700.0
6. Ondina (Bahia)	12°55'	38°41'	46	2,685.6
7. Uruguayana (Rio Grande do Sul)	29°45'	57°05'	56	2,677.0
8. Pirapóira (Minas Gerais)	17°21'	44°57'	486	2,655.8
9. Catalão (Goyaz)	18°10'	47°57'	855	2,633.9
10. Uberaba (Minas Gerais)	19°45'	47°56'	748	2,620.9
11. São Luiz (Maranhão)	02°32'	44°18'	34	2,600.9
12. Pyrenópolis (Goyaz)	15°51'	48°58'	730	2,584.9
13. Parnaíba (Piauí)	02°54'	41°47'	—	2,578.4
14. Belo Horizonte (Minas Gerais)	19°56'	43°57'	916	2,562.0
15. Tury-Assú (Maranhão)	01°41'	45°22'	8	2,412.3
16. Nazaré (Pernambuco)	07°45'	35°14'	81	2,395.0
17. Barra do Corda (Maranhão)	05°30'	45°16'	82	2,392.4
18. Campos (Rio de Janeiro)	21°45'	41°20'	13	2,271.0
19. Itatiaia (Rio de Janeiro)	22°27'	44°50'	756	2,237.7
20. Porto Alegre (Rio Grande do Sul)	30°02'	51°13'	24	2,237.3
21. São Bento dos Lages (Bahia)	12°35'	38°45'	14	2,215.9
22. Goyaz (Goyaz)	15°54'	50°08'	—	2,193.2
23. Caxambu (Minas Gerais)	21°59'	44°57'	900	2,178.7
24. Petrópolis (Rio de Janeiro)	22°32'	43°11'	846	2,094.3
25. Rezende (Rio de Janeiro)	22°28'	44°27'	434	2,084.1
26. Pesqueira (Pernambuco)	28°22'	36°42'	726	2,080.2
27. Vaseouras (Rio de Janeiro)	22°24'	43°44'	428	2,061.6
28. Teresópolis (Rio de Janeiro)	22°22'	42°59'	876	1,900.3
29. Florianópolis (Santa Catarina)	27°36'	48°34'	35	1,899.2
30. Montes Claros (Minas Gerais)	16°44'	43°51'	627	1,850.9
31. Mar de Espanha (Minas Gerais)	21°52'	43°01'	456	1,748.4
32. Nova Friburgo (Rio de Janeiro)	22°17'	42°32'	848	1,678.7
33. Juiz de Fora (Minas Gerais)	21°46'	43°21'	677	1,644.5
34. Theóphilo Otóni (Minas Gerais)	17°51'	41°30'	369	1,590.7

TECHNICAL SOLUTION

To obtain the necessary additional energy it is suggested that solar heat should be focused axially into the retort of the Delima generator referred to above. This unit will absorb all available direct solar heat, regardless of intermittence, if a unit of appropriate size is operated practically without interruption in order to reduce heat losses to a minimum.

It first seemed as if direct focusing of solar heat axially into a one-ton horizontal rotary furnace would be the best solution, but experiments with such a furnace, though technically suitable for bituminous shale, proved that it would be uneconomic in this instance.

Preference has instead been given to a stationary vertical retort of the Delima design with a capacity of 5 tons and adapted for additional solar heating. The retort consists of two concentric steel cylinders protected by refractory material. The large cylinder is surrounded by thermal insulating material. The tops of the cylinders are closed by a common end-

plate, also with heavy insulation. The babassu-nut shells are charged through a double safety opening in the top of the retort into its inner cylinder. The inner cylinder is normally heated from the outside by water-gas, produced by admitting superheated steam over the incandescent residual charcoal from the destructive distillation. The charcoal is periodically supplied by a radial stoker through a conical valve on the lower bottom end of the inner cylinder. Experiments showed that the highest thermal power of the water-gas produced was attained with a steam quantity equal to 5 per cent of the amount of charcoal used.

Solar heat is focused into a metal cone, the black-body, mounted with its opening downwards towards the lower central point of the inner retort cylinder, and supported by four large vertical and radial steel sheets, the outer ends of which are welded to the inside of the retort cylinder so as to secure better heat transmission and to increase the heat transmission surface in contact with the raw material to be distilled.

The retort may be run either independently, heated by water-gas from outside, or with simultaneous solar heating through the black-body, in which case part of the charcoal used for the production of water-gas becomes available for other purposes. Alternatively, the water-gas supply may be adjusted so that it is roughly constant; this will afford distillation gas and power production when needed, but no additional charcoal will be made available for other purposes.

The distillation gas produced is aspirated by a blower and passed through scrubbers into a storage tank, thus ensuring an uninterrupted supply of gas and power. With a tank of suitable size, a considerable peak power demand can be supplied.

THE HOT FOCUS CONCENTRATOR

In order to avoid shading of the hot focus concentrator by the relatively high 5-ton retort and to facilitate the distribution of the focused heat in axial direction it was necessary to choose the large average focal length of 30 metres. This would not be suitable for furnaces with maximum temperatures up to 3,000°C, but was acceptable for our purpose—namely, to supply additional solar heat at a maximum temperature of 1,000°C. Experiments had shown that the greatest thermal power of the distillation gas was achieved with interior temperatures in the retort ranging from 600 to 800°C. (5)

In designing the hot focus concentrator, an attempt was made to combine the advantages of designs developed and tested by French and Indian researchers, (9, 10) even though our industrial purpose did not permit the use of an exact copy of such an apparatus. For this reason, an articulated hot focus concentrator with a mirror surface of 15 metres square (225 m²) was chosen. It was mounted on a movable steel support of 18 metres square, divided into 9 groups of approximately equal size for automatic position control of the 225 individual 1 × 1 m mirror assemblies. Thus, regardless of the sun's position, the rays are reflected to the virtual focus at 30 metres in a horizontal direction from the centre of the central 1 × 1 m plane mirror assembly. In order to utilize fully all of the solar energy available and to avoid mutual shading and interference of the individual mirror assemblies, the support rests on two horizontal bearings, mounted on a large U-shaped steel structure. This structure runs on two pairs of wheels on a circular rail, so that the concentrator support can turn around a horizontal and a second vertical axis, both crossing the centre of the central plane mirror assembly. This provides automatic general orientation of the concentrator support through two pairs of photo-electric cells and servo-motors for azimuth and right ascension position. (9) In order to guarantee exact movement and stability the large U-shaped structure is located on a footstep bearing, mounted in the centre on the same concrete foundation as the circular rail.

A mirror assembly consists of four common plane mirrors 0.8 or, better, 0.6 cm thick and 50 × 50 cm

square. Except in the case of the central mirror assembly, each mirror is subjected to the downward pressure of its single fixing bolt, and to the upward pressure of the three adjustable bearing screws which are located at suitable positions around the metal assembly frame. The four adjoining corners of these mirrors are pressed by the fixing bolts against a synthetic heat-resisting and weatherproof rubber washer (e.g., Viton). The fixing bolts and adjusting screws also have Viton washers to minimize mirror breakage. For every position of the whole 18 × 18 m support there is a corresponding position of each 1 × 1 m mirror assembly. This is set separately for each of the nine mirror groups by illumination at night from the virtual hot focus. (9)

At a point four metres from the virtual focus an 8 × 8 m plane aluminium sheet mirror, set at an angle of 45° to the horizontal centre line, reflects the focalized solar radiation upwards through the opening of the black-body; the diameter of this opening is 1.5 m.

It has been calculated that 32 minutes of the sun's virtual diameter will produce a dispersion of some 150 mm on either side of the superposed images of the individual 1 × 1 m mirror assemblies at the focus. There is also an additional concentrating effect by virtue of the fact that the pressure on the individual mirror assemblies causes them to assume an approximately paraboloidal form. Consequently, an entrance diameter for the black-body of 1.5 m seems sufficient, despite the inaccuracies which are an inevitable concomitant of the large dimensions which the whole installation must necessarily have if maximum power is to be attained. At the base of its cone (above the narrower opening) the black-body is opened out to 2 m diameter in order to avoid excessive reflection from the inside, which is covered with a non-reflecting black material. However, undesirable heating of the aluminium mirror may be expected and provision has therefore been made for forced ventilation, using the hot exhaust air as combustion air. The aluminium mirror is mounted so that it can be swung downwards into a separate cleaning chamber. This also enables the individual mirror assemblies to be illuminated from the virtual hot focus, as described above. When the retort is operating independently of solar radiation, the opening of the black-body must of course be closed off in order to avoid heat losses.

For optimum positioning of the hot focus concentrator and the retort in relation to each other, all sun positions for localities from 0° to 10°S latitude were taken into consideration.

ENERGY YIELDS

Referring to the previously quoted results, the total energy yield from the normal, self-contained distillation of 1 ton of babassu-nut shells amounts to 3,883,500 kcal, of which only 1,296,000 kcal are in the form of distillation gas and practically available for energy production, whereas 2,106,000

kcal from the residual 270 kg charcoal are needed to maintain the distillation process, leaving 50 kg tar, of some 481,500 kcal.

In normal continuous operation throughout the year the power yield from distillation gas would be as follows:

$$300 \text{ days} \times 8 \text{ charges} \times 5 \text{ tons} \times 1,296,000 \text{ kcal} = 15,552 \times 10^6 \text{ kcal/year.}$$

If a figure of 20 per cent over—all efficiency is assumed for a small gas turbine plant compressing gas and combustion air for production, this represents some 3,500,000 kilowatt-hours. However, if the calculation is based on the actual 2,400 working hours common in the industry, the available generator capacity would be only 1,500 kilowatts, representing a load factor of only 27.5 per cent. Given the storage capacity of the tank, a peak demand of some 1,500 kW could be made available, though at normal load factor some 1,000 kW or less would be installed in practice. In any event, this available power far exceeds the demand of such an industry, and some 80 per cent would be available for subsidiary industries and for other industrial and private use in the vicinity of the plant.

SPECIAL ROLE OF SOLAR ENERGY

This rather abundant yield of power is, however, possible only if supplementary charcoal is produced in the plant by additional solar heat, and is used to operate producer-gas trucks to transport raw materials cheaply.

The hot focus concentrator and aluminium plane mirror supply (with an efficiency of some 75 per cent) 170 kW into the black-body; the latter transmits, with an expected loss of about 20 per cent during a 2.5-hour charge, some 292,400 kcal, or just approximately the energy necessary for the distillation of 1 ton of shells, yielding thus some 270 kg of charcoal, 360 m³ of distillation gas and 50 kg tar.

With the normal insolation of 2,600.9 hours per year, direct sunshine is available on the average 7.1 hours per day; this allows, with some two hours' margin, for two 2.5-hour charges per day. Thus in 300 working days solar energy can produce 600 times the quantities given in the previous paragraph, or 162 tons of additional charcoal, 216,000 m³ distillation gas and 30 tons of tar, altogether representing 2,330 million kcal, or 10.6 times the focused solar heat supply of $170 \text{ kW} \times 5 \text{ hrs} \times 300 \text{ days} \times 860 = 216.3 \text{ million kcal}$.

For the transport of the babassu-nuts over an average distance of, say, 30 km for a maximum of nine 5-ton charges per day, using 6-ton producer-gas trucks that consume 0.5 kg charcoal per 6 tons per mile in about eight 60-km journeys, 240 kg coal per day, or 72 tons per year, are needed.

The remaining 90 tons of charcoal per year, representing some 702 million kcal, can be used for steam and supplementary power generation, yielding 162,000 kWh, assuming an over-all efficiency of some 20 per cent. As steam is needed throughout the 24 hours for production of the water-gas used in the heating of the retort, and as steam power is

economically used as the basic load, it would be reasonable in this case to count on 3,000 to 4,000 hours of utilization time at peak load. Thus, the capacity of the steam power plant would be some 40 or 50 kW. When the supplementary steam power production was not needed, the additional supply of solar energy could be limited to approximately 56 per cent, and a mirror surface of some $12 \times 12 \text{ m} = 144 \text{ m}^2$ would be sufficient for the hot focus concentrator.

Experience in larger modern compound power plants has shown that it is also possible to use hot turbine exhaust gases, which still contain around 80 per cent of atmospheric oxygen, as hot combustion air for the boiler surface or for direct heating of the boiler, with a saving, depending on the design, of 8 to 100 per cent of the fuel needed for the steam generating plant. If 60 per cent of the entire generating capacity in large compound plants is produced by the gas turbine, the remaining 40 per cent can be produced by a steam power plant using the heat from the exhaust gases or the gas turbine. (11)

In the case which we are discussing, the 1,500 kW capacity of the gas turbine should be matched by a steam turbine of 1,000 kW, driven by the heat from the gas turbine exhaust gases. Naturally, for these relatively small capacities, greater losses must be expected. Although in similar large compound plants over-all thermal efficiencies of 57 to 62 per cent can be obtained, (11) it seems likely that in smaller plants efficiencies of only 30 to 50 per cent can be attained, which is considerably more than the over-all efficiency of only 20 per cent assumed in this study. At any rate, it can be assumed that in future, even in a smaller plant, such as the 1,500 kW gas turbine under discussion, the heat of the exhaust gases will operate a steam turbine producing 20 to 66 per cent more kWh than a gas turbine plant alone. Thus, the potential capacity of the combined gas and steam turbine plant in combination with the self-contained Delima gas generator assembly with a 5-ton retort, adapted for additional focused solar heat, should amount to some 1,840 to 2,550 kW and a correspondingly increased generation, in kWh, as required by the power demand.

One difficulty in carrying out the project under discussion was the fact that the manufacturers of gas turbines seemed to build units with a minimum capacity of 5,000 kW. According to recent information, however, some American companies are developing gas turbines of as little as 50 hp (12, 13). The only type now on the market that is suitable for our project is the "Saturn" 1,070-hp gas turbine manufactured by the Solar Aircraft Company. It comes with generators of 600 to 800 kilowatts and has already been installed as an industrial continuous-

duty prime mover with a thermal efficiency of 22 per cent. The manufacturer claims that this efficiency can be increased to approximately 70 per cent if exhaust heat is utilized. This may be right in certain circumstances, and would confirm the soundness of the preceding considerations.

COMPARISON WITH DIESEL-ELECTRIC EQUIPMENT

Though we have endeavoured to ascertain the complete investment cost for the suggested solar heat gas-electric plant, the data are so far incomplete. Nevertheless, it seemed useful to show the investment and operating cost of a competitive Diesel-electric plant, as compared with the 1,500 kW equipment calculated under "Energy yields" above.

Such a Diesel-electric plant could be composed of two 1,000-hp units at a price of some \$72,000 each. With accessory equipment, total investment would be about \$200,000.

The comparable operation costs would be as follows:

(a) Diesel oil for power production, $3.5 \text{ million kWh} \times 0.23 \text{ kg/kWh} = 805,000 \text{ kg}$, which at the current price in São Luiz of 13 cruzeiros per kg amounts to about 10.6 million cruzeiros, or approximately \$53,000 a year;

(b) Diesel oil for the transport of the babassu nuts, approximately 300 days of eight 60-km round trips, equalling 144,000 km, requiring 0.13 kg of oil per km, or a total of 18,000 kg, amounting to Crs 246,000, or \$1,230 per year;

(c) Total Diesel oil consumption for Diesel power and Diesel truck operation would amount to some \$54,230 per year.

The projected solar heat gas-electric plant would be more complex but would have practically no operating cost for fuel, resulting in a yearly operating economy of about \$40,000, even if the need for more personnel for the operation is taken into account.

From the incomplete installation cost estimates of the projected solar heat gas-electric turbine plant, it would appear that the total investment cost would not reach the figures quoted above.

SUBSIDIARY DISTILLATION PRODUCTS

The suggested distillation process, using the Delima self-contained gas generator assembly, adapted for additional focused solar energy supply, provides also for the yield of tar, which is well suited for local requirements. It was experimentally used for the paving of roads. A 5-ton retort would supply some 600 tons of tar per year, sufficient for the paving of some 12.5 km of roads 6 m wide.

The tar has proved to be also a good binding agent for pressing briquettes of the rather friable and easily pulverizing residual charcoal from the distillation of babassu-nut shells. These briquettes are suitable for cupola furnaces and many other uses.

Distillation fractions of the tar yielded an excellent liquid solvent which, combined with the residual resin from the same distillation process, gave a good protecting varnish, that could possibly also be used for preserving the backs of the plane mirrors of the hot focus concentrator.

The tar also contains creosote, benzol, xylol, toluol and phenol, of possible interest to subsidiary industries.

The residual charcoal may serve either as fuel for water-gas generation, as activated charcoal for decoloration, etc. and, after special treatment, even as metallurgical coke in electric furnaces, etc. (5)

FINAL OBSERVATION

It might be asked why the supplementary fuel could not be supplied simply by other vegetable or residual material such as old palm trees, etc. This possibility may really exist in the early stages of the industrialization, when the plantation has to be cleared, provided that the vegetable material can be separately carbonized to charcoal suitable for producer-gas trucks. But with increasing organization of the plantation the supplementary material will rapidly become scarce and the additional solar energy supply will be justified at a later stage, when also the local power demand for subsidiary and other industries and uses will increase and the maximum of possible power production will become necessary.

CONCLUSION

We have tried to show that the industrial exploitation of the large babassu-nut vegetation in Brazil, using additional focused solar heat, is not only technically possible, but also economically sound, especially where a larger energy demand for other uses exists or can easily be provided. In general this industrial exploitation is indicated for isolated areas of dense vegetation and sparse population, where fuel and its transport are expensive and other energy sources lacking or too distant to be transported economically.

These areas have generally an impoverished population with irregular or no work, suffering year by year from droughts, and needing continuous, well organized employment. This situation is still more marked in Maranhão, because this State is not included in the "polygon of droughts" (figure 1), benefiting from a special federal assistance programme. This was one of the reasons why this study was especially designed to fit this region.

Therefore this industrial exploitation, which uses most modern technical progress and rationalization methods and is based on further intensive and extensive research, would be not only sound and economic, but also a necessary social assistance to the starving population of these large areas. It would be a means of providing opportunities for regular work and raising the low living standard, thus making for social peace in Brazil.

ACKNOWLEDGEMENTS

The author would like to thank Dr. Ildeu Ramos de Lima, Dr. Jayme Dias da Costa and Dr. Artur Eduardo Barros for their valuable documentation and encouraging suggestions, as well as the manage-

ment of the Empresa Fluminense de Energia Elétrica S/A for their kind help.

[Note. A list of bibliographical references appears on page 212, after the French translation of the summary which follows.]

Summary

The author suggests a more efficient exploitation of the abundant babassu-palm vegetation with its oil-yielding nuts and shells for oil, gas, coal, tar and power production, using additional focused solar heat in the patented, self-contained, stationary, vertical gas-generator system Delima, initially designed for that purpose, but without use of solar energy, and counting with small energy production units of 50, 100, or 200 hp with the possibility of later adding further units. For the State of Maranhão with the highest density up to 3,000 babassu palms per hectare a complete electrification plan has been elaborated, suggesting 145 local gas-electric power stations of very small capacities in these areas of low population density, far from conventional energy sources.

These industrial centres need energy, produced *in situ*, for nut-cracking machines, oil presses and illumination, as well as for the transport of large quantities of raw material. The potential yield of the babassu-nut shells is 3,883,500 kcal per ton, plus a pyrogenous liquid of no practical value, representing 30 per cent of the weight. This limits these industries to an economic range of action, in which the transport problem can be solved by the use of producer-gas trucks running on the residual coal from the distillation of the babassu-nut shells. Experimentally, it was shown, however, that the quantity of residual charcoal was just sufficient for the production of the water-gas, necessary to maintain the distillation process. Therefore it was suggested that the relatively small but essential supplementary heat for additional coal and steam production for the water-gas generation should be supplied by solar heat focused in a metallic cone, the black-body, mounted with its opening downward into the lower centre of the gas-generating vertical and cylindrical retort of the patented, self-contained gas-generator assembly Delima. The black-body is supported by four large vertical and radial steel sheets, the outer ends of which are welded to the inside wall of the inner steel cylinder of the retort, providing better heat transmission and amplifying the heat transmission surface in contact with the raw material to be distilled. This is charged into the retort through a double safety opening in the insulated top of the retort.

Generally the retort will be operated by the self-contained process, and heated from outside by the combustion of water-gas of some 2,600 kcal./m³, generated from the incandescent residual charcoal, which is periodically supplied from the deepest part of the retort to a radial stoker where combustion air and a quantity of overheated steam equal to

some 5 per cent or the weight of the charcoal, is introduced. Thus the water-gas is generated and burned between the retort cylinder and a second outer cylinder with refractory and insulating material.

When direct sunshine is available (on the average, more than 7 hours per day in São Luiz, Maranhão) and focused on the interior walls of the black-body, a corresponding quantity of charcoal can be saved in the generation of water-gas. Especially during the austral summer season, or an accelerated, forced gas distillation with 9 instead of the normal 8 charges per 24 hours may be used for a larger yield of gas and energy, when more power is needed.

The focusing of solar heat uses an articulated hot focus concentrator with a mirror surface of $15 \times 15 \text{ m} = 225 \text{ m}^2$ on a movable steel structure $18 \times 18 \text{ m}$, divided into 9 approximately equal parts for the purpose of automatic position control of the 225 individual $1 \times 1 \text{ m}$ mirror assemblies, so that, whatever the position of the sun, the reflected rays point to a virtual focus at 30 m from the centre of the central plane mirror assembly. To avoid mutual shading and interference of the individual mirror assemblies the whole concentrator is mounted on a large steel structure, so that it can move around a horizontal and a vertical axis crossing the centre of the central plane mirror assembly and serve for automatic general orientation of the structure by two pairs of photo-electric cells and servo-motors. All the other individual plane mirror assemblies are also made of four $50 \times 50 \text{ cm}$ plane mirrors, submitted, however, to mechanical tension so that the whole approximates paraboloidal form, thereby limiting excessive dispersion. Four metres from the virtual focus an $8 \times 8 \text{ m}$ aluminium sheet, plane mirror, set at an angle of 45° , reflects the radiation upward into the opening of the black-body, which is 1.5 m in diameter at the entrance and widens to 2 m inside in order to avoid excessive heat losses due to radiation.

The normal energy yield from distillation gas with eight 5-ton charges per 24 hours and 300 working days results in some 15 billion kcal or 3.5 million kWh per year, calculating with a 20 per cent over-all efficiency of the thermo-electrical equipment of some 1,500 kW, and assuming a load factor of only 27.5 per cent, corresponding to 2,400 working hours per year. This supply of energy greatly exceeds the demand of such an industry, and some 80 per cent of the energy is made available for subsidiary industries and other industrial or private uses in the vicinity of the gas and power generating plant.

This rather abundant yield will be possible, however, only when relatively little additional heat is supplied for saving residual char coal for the producer-gas truck operation and the necessary steam production for the water-gas generation. The articulated hot focus concentrator, combined with the aluminium plane mirror, supplies some 170 kW to the black-body, which transmits some 292,400 kcal during a 2.5 hours' charge, or just approximately the energy necessary for the distillation of one ton of raw material. This results in an economy of at least 540 kg, on the average, from the two charges per day, operated with additional solar energy, or 162 tons of coal per year. The transport of raw material for the 5-ton retort [by 16-ton producer-gas trucks requires some 72 tons of coal per year. The remaining 90 tons of coal, representing 702 million kcal, can be used for steam and supplementary power generation of some 162,000 kWh by a 40- or 50-kW steam turbine unit. But as soon as convenient gas turbines of less than 5,000 kW, or, say, 1,500 kW are available, the capacity of the steam turbine and its corresponding production, in kWh, could be increased

by another 20 to 66 per cent of the capacity of the gas turbine, provided that as has been done successfully in larger combined gas and steam turbine plants, the hot exhaust combustion gases were introduced into the steam boiler furnace as part of the combustion air. Thus with over-all thermal efficiencies of some 30 to 40 per cent for these smaller plants, the resulting potential of the combined gas and steam turbine plant in combination with the self-contained gas generator assembly Delima with a 5-ton retort, adapted for additional focused solar heat supply, would represent some 1,840 to 2,550 kilowatts with correspondingly amplified generation in kilowatt-hours.

By comparison with the high installation and operation costs of an equivalent Diesel power plant, especially at the recently increased prices, it is estimated that the suggested solution would be competitive and sound for raising the low living standard of the generally impoverished and starving population of these tropical areas of Brazil, which suffer from the severe seasonal droughts.

PRODUCTION DE GAZ PAR LA DISTILLATION DESTRUCTIVE RÉALISÉE AU MOYEN DE L'ÉNERGIE SOLAIRE EN COMBINAISON AVEC UN GÉNÉRATEUR A GAZ AUTONOME ET UN RÉSERVOIR POUR LA FOURNITURE CONTINUE DE GAZ ET DE FORCE MOTRICE

Résumé

On recommande une exploitation plus intense des abondantes ressources végétales que représentent les palmiers dits babassu (*orbignya speciosa*) avec leurs noix qui donnent de l'huile et leurs coquilles qui produisent de l'huile, du gaz, du charbon, du goudron et de la force motrice. Pour ce faire, on suggère un appoint de chaleur solaire concentrée dans un générateur à gaz autonome vertical stationnaire Delima conçu initialement pour cette fin mais sans recours à l'énergie solaire. On envisage de petites unités de 50, 100 et 200 HP avec possibilité de développement ultérieur par l'addition d'autres unités. Pour l'État de Maranhão (Brésil), dont la densité maxima atteint 3 000 palmiers babassu par hectare, on a même mis au point un plan complet d'électrification envisageant l'établissement de 145 petites centrales locales du type à groupe électrogène avec moteur à gaz de faible capacité dans les régions où la densité de population est faible, qui sont loin des sources classiques d'énergie.

Ces centres industriels ont besoin d'énergie produite sur place pour les machines à écraser les noix, les presses à huile, l'éclairage et le transport de grandes quantités de matières premières. Les coquilles de noix de babassu ont un rendement potentiel de l'ordre de 3 883 500 kilocalories par tonne, et fournissent également un liquide pyrogène sans valeur pratique, correspondant à 30 p. 100 du poids des coquilles. Ceci limite ces industries à un rayon d'action écono-

mique dans lequel le problème du transport peut être résolu par des camions à gazogène utilisant le résidu charbonneux de la distillation de la coquille de la noix de babassu. On a démontré expérimentalement, cependant, que le résidu charbonneux suffisait tout juste à la production du gaz à l'eau nécessaire pour que la distillation se poursuive. On a donc suggéré la fourniture de l'appoint de chaleur, relativement faible mais essentiel à la production du supplément de charbon et de vapeur nécessaire à la production de gaz à l'eau, sous forme d'énergie solaire concentrée par un cône métallique. Le « corps noir » doit être monté de telle sorte que son ouverture inférieure s'engage dans la partie basse de la région centrale de la cornue verticale de production de gaz, de forme cylindrique, du générateur à gaz autonome breveté Delima. Ce corps noir est soutenu par quatre grandes tôles métalliques verticales radialement disposées, soudées en leur autre extrémité à la paroi interne du cylindre intérieur en acier de l'alambic. Ceci assure une meilleure transmission de la chaleur et amplifie la surface de transmission de chaleur qui est en contact avec la matière première à distiller, que l'on introduit dans l'alambic par une double ouverture de chargement prévue dans le toit réfractaire de ce même distillateur.

Généralement parlant, l'alambic fonctionne de façon indépendante ou autonome, à condition d'être chauffé de l'extérieur par la combustion du gaz à

l'eau qui donne 2 600 kilocalories par mètre cube, produites par le charbon résiduel porté au rouge et amené progressivement de la partie la plus profonde de la cornue à un chargeur radial dans lequel on introduit l'air de combustion et la vapeur surchauffée dans la proportion de 5 p. 100, en poids, de ce charbon. Le gaz à l'eau est donc produit et brûlé entre le cylindre de la cornue ou alambic et un deuxième cylindre extérieur, doté de garnitures réfractaires et calorifuges.

Lorsque l'exposition directe au soleil est possible (en moyenne plus de sept heures par jour à São Luiz, Maranhão), avec concentration sur le corps noir, on peut économiser une quantité correspondante de charbon par la production de gaz à l'eau, particulièrement pendant la saison d'été australe, ou encore accélérer la distillation du gaz en employant neuf charges au lieu de huit par 24 heures pour débiter plus de gaz et d'énergie quand il le faut.

Pour concentrer l'énergie solaire, on emploie un concentrateur articulé à foyer chaud ayant une surface de miroir de $15\text{ m} \times 15\text{ m} = 225\text{ m}^2$, monté sur une structure mobile en acier de $18\text{ m} \times 18\text{ m}$ subdivisée en neuf parties approximativement égales dans le but de se prêter à la disposition automatique de 225 miroirs carrés d'un mètre de côté de telle sorte que, quelle que soit la position du soleil, les rayons réfléchis donnent un foyer virtuel à 30 mètres du centre du groupe de miroirs plans. Pour éviter l'ombre et l'accumulation de saletés sur les miroirs, la totalité du concentrateur est montée sur une grande structure en acier, de manière à pouvoir se déplacer autour d'arbres horizontaux et verticaux passant par le centre du groupe des miroirs plans. Ceci permet l'orientation générale automatique de la structure au moyen de deux paires de cellules photo-électriques et des servo-moteurs appropriés. Tous les autres groupes individuels de miroirs plans sont généralement composés de quatre miroirs plans de $50\text{ cm} \times 50\text{ cm}$ qui ont été soumis à des efforts mécaniques de manière à prendre une forme à peu près parabolique, pour réduire tout excès de dispersion. A quatre mètres sur l'avant du foyer virtuel, on trouve un miroir ordinaire en tôle d'aluminium de $8\text{ m} \times 8\text{ m}$ incliné à 45° , qui projette le rayonnement vers le haut par l'ouverture du corps noir qui a 1,5 mètre de diamètre à son entrée et s'évase pour arriver à 2 mètres de manière à éliminer les pertes excessives dues à la réflexion. Le débit normal énergétique du gaz distillé, avec huit charges de 5 tonnes par 24 heures et 300 jours de travail, est de l'ordre de 15 milliards de kilocalories ou 3,5 millions de kilowattheures par an, si on prend un rendement global de 20 p. cent du système thermo-électrique de 1 500 kilowatts environ, en admettant que le facteur de charge ne dépasse pas 27,5 p. 100, ce qui correspond à 2 400 heures de travail par an. Ces disponibilités énergétiques dépassent largement

la demande d'une industrie de ce genre et 80 p. 100 environ de cette énergie resterait donc disponible pour des industries auxiliaires, d'autres industries et des applications privées, au voisinage de la centrale de production de gaz et d'énergie.

Ce débit assez abondant ne sera toutefois possible que lorsqu'un léger excédent de chaleur sera fourni pour épargner le charbon résiduel en vue de l'exploitation des camions à gazogène et de la production de vapeur nécessaire pour la génération du gaz à l'eau. Le concentrateur articulé à foyer chaud, combiné avec le miroir plan en aluminium fournit environ 170 kilowatts au corps noir, qui transmet environ 292 400 kilocalories au système pendant la consommation d'une charge durant deux heures et demie environ, soit approximativement l'énergie nécessaire pour distiller une tonne de matières premières. Ce concentrateur assure ainsi une économie de 540 kilogrammes au moins sur les deux charges quotidiennes (en moyenne) complétées par l'appoint d'énergie solaire, soit environ 162 tonnes de charbon par an. Le transport de matières premières pour la cornue de cinq tonnes, par camions à gazogène de six tonnes, exige environ 72 tonnes de charbon par an, et les 90 tonnes de charbon qui restent représentent 702 millions de kilocalories qui peuvent être utilisés à la production de vapeur et d'énergie supplémentaire, soit environ 162 000 kilowattheures à fournir par une turbine à vapeur de 40 ou 50 kilowatts. Dès que possible, des turbines à gaz de moins de 5 000 kilowatts, par exemple de 1 500 kilowatts, seront mises en service et la capacité de la turbine à vapeur, ainsi que sa production mesurée en kilowattheures, pourrait être augmentée de 20 à 66 p. 100 de la capacité de la turbine à gaz mentionnée ci-dessus si, dans des usines où les turbines à gaz et à vapeur se combinent avec succès pour donner de plus grandes installations, les gaz chauds de la combustion et de l'échappement sont introduits dans le foyer du générateur de vapeur avec l'air de combustion. De la sorte, avec des rendements thermiques globaux de 30 à 40 p. 100 pour ces petites usines, la puissance d'une centrale à turbines combinant le gaz et la vapeur, en liaison avec le générateur à gaz autonome Delima et une cornue de cinq tonnes se prêtant à la fourniture d'un appoint de chaleur solaire concentrée, représenterait environ 1 840 à 2 550 kilowatts avec une augmentation correspondante du nombre de kilowattheures produits.

Par comparaison avec les prix élevés d'installation et d'exploitation d'une centrale équivalente à diesel, particulièrement si on tient compte des augmentations de prix récentes, on estime que la solution recommandée pourrait faire concurrence aux autres et qu'elle serait indiquée pour relever le niveau de vie des populations généralement pauvres et affamées de ces régions tropicales du Brésil, qui souffrent des graves sécheresses saisonnières.

REFERENCES

- (1) Brazil. O aproveitamento do babaçu (Exploitation of the babassu nut). Rio de Janeiro, Conselho Nacional de Economia, 1953.
- (2) J. Ribamar Teixeira Leite *et al.* Industrialização da casca do côco babaçu. (Industrial exploitation of the babassu-nut shell). Rio de Janeiro, Ministerio de Viação e Obras Públicas, Departamento Nacional de Iluminação e Gás, 1953.
- (3) I. Ramos de Lima. Conjunto destilador de frutos oleaginosos (Distillation unit for oil-yielding products). Revista do Clube de Engenharia (Rio de Janeiro), No. 290 (1960).
- (4) I. Ramos de Lima. Plano para eletrificação do Estado do Maranhão (Electrification plan for the State of Maranhão).
- (5) I. Ramos de Lima. O babaçu como fonte energética (The babassu nut as a source of energy). Revista do Clube de Engenharia, Nos. 214, 216 & 217 (1954).
- (6) Communication from Dr. Ildeu Ramos de Lima.
- (7) Figures supplied by Serviço de Meteorologia, Ministério da Agricultura, Rio de Janeiro.
- (8) C. Bayma. A usina de Quelrú (The plant at Quelrú). Correio da Manhã, 14 March 1945.
- (9) F. Trombe. Structure des machines utilisant l'énergie solaire (Structure of solar energy units. In French, with a summary in English.) Wind and solar energy, proceedings of the New Delhi symposium. Arid zone research. UNESCO, Paris, Ref. No. : NS. 55.III.7.AFS. 304 pp.
- (10) A. L. Gardner. Articulated and semi-articulated low-cost hot-focus solar energy concentrators. (L'utilisation de l'énergie solaire. En anglais, avec résumé en français.) Op. cit.
- (11) A. E. Barros. As turbinas a gás na indústria da energia elétrica (Gas turbines in electric energy industry). Revista Eletricidade I No. 9 (1960).
- (12) Anon. G. E. Turbinas ultra-leves para vários usos (G. E. ultra-lightweight turbines for various uses). Revista do Clube de Engenharia, No. 291 (1960).
- (13) Solar Aircraft Co. Small gas turbines. Mechanical world and engineering record (Manchester, England), No. 8 (1960).

METAL HYDRIDE FUEL CELLS AS ENERGY STORAGE DEVICES

R. C. Werner

Associate Director of Research and Development

and

T. A. Ciarlariello

MSA Research Corporation

Callery, Pennsylvania (United States)

INTRODUCTION

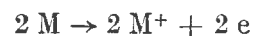
Recent advancements in thermally regenerative ionic hydride fuel cells indicate that these cells have the potential of serving both as an energy conversion device and as an energy storage device. In the thermally regenerative cells, a fuel and an oxidizer react electrochemically in a fuel cell to produce electric power, heat, and an ionic compound. The product formed in the cell is then heated and dissociated to the fuel and oxidizer. The fuel and oxidizer are separated, cooled, and then recycled to the fuel cell. Since the fuel and oxidizer are being continuously produced, there is no net requirement for external fuel. The unit as a whole then absorbs heat at a high temperature, rejects heat at a low temperature and produces electric power. This is a direct heat energy to electric power conversion process that does not rely on mechanical equipment. Such fuel cells have been tested as batch fuel cells with research progressing at the moment on various thermally regenerative cycles. It is the purpose of this paper to discuss the present status of the development of such cells and to consider the concept of such devices receiving energy from the sun, converting the energy into stored chemical energy and continuously producing electrical energy. Comparison with other conversion and storage devices will be limited because of the still early development stage of the subject devices.

CONVERSION SYSTEMS

In looking for a suitable system, it was desirable to find one where the free energy of formation at the cell temperature is large and rapidly becomes smaller with increasing temperatures. Such a system would produce a high voltage at the cell but would have a low regeneration temperature, suitable for conventional construction materials. To produce electrochemical power, the cell reactions should proceed by ionic means. It is also desirable for the products formed by regeneration to consist of different phases to allow easy separation.

Finally, a system using low molecular weight elements would provide for low weight, high capacity power storage.

Several systems were considered using the above criteria and the ionic hydride systems appeared to be the best. The anode reactions within the cell would be:



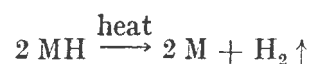
The cathode reaction would be:



The two ions combine in the electrolyte as follows:



The hydride formed dissolves in the electrolyte and in the metal phase. The hydride is then transported to the regenerator, heat is added, and the hydride dissociates as follows:



The dissociation products are cooled and, on returning to the fuel cell, become the cell reactants.

PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES

The cell and regenerator temperatures can vary over wide ranges and are limited only by the melting point of the electrolyte and metal. Table 1 indicates some of the physical properties of the metals and the hydrides which can be considered. Table 2 gives some thermodynamic properties of certain hydrides.

The theoretical voltage variation with temperature may be estimated from figure 1, which assumes that all the reactants and products are in their standard states. Actually, if the electrolyte is unsaturated with the hydride, then a higher cell potential will be obtained.

The dissociation pressure of the hydride in the regenerator may be estimated from figure 2. However, because of the solubility of the hydride in the molten

Table 1

Physical properties of some metals and their hydrides

Chemical	Melting point of metal °C	Boiling point of metal °C	Melting point of hydride °C
LiH	179 ^a	1 317 ^a	680 ^c
NaH	97.8 ^a	883 ^a	(d) 800 ^b
KH	63.7 ^a	760 ^a	(d) ?
RbH	39.0 ^a	688 ^a	?
CsH	28.5 ^a	705 ^a	?
CaH ₂	810 ^b	1 200 ± 30 ^b	(d) 675
SrH ₂	800 ^b	1 150 ^b	?
BaH ₂	850 ^b	1 140 ^b	?

Definition: (d) indicates decomposition temperature.

SOURCES:

^a R. N. Lyon (ed.), *Liquid-metals handbook*, NAVEXOS (Executive Office of the Secretary of the Navy) publ. No. 733 (Washington, Office of Naval Research, 1952. 269 pp.);

^b J. H. Perry, *Chemical Engineers' handbook* (New York, McGraw-Hill, 1950; 1942 pp.);

^c Anon., "Lithium-hydride", *Technical Data*, Bulletin 102 (Philadelphia, Foote Mineral Company, 1957).

metal and the metal in the molten hydride, the actual pressure will be lower.

SYSTEM DESCRIPTION

In the concept to be presented in this paper, where storage capacity is to be combined with cell operation, a system is proposed which is still in the development stage. It is therefore necessary to make some assumptions and estimates of performance to present a whole system.

Table 2

Thermodynamic properties of some hydrides

Chemical (at solid state)	ΔH_f° kcal/mole 25° C	ΔG_f° kcal/mole 25° C	E° Volts 25° C	Calculated decomposition tempera- ture ^a $H_2 = 1 \text{ atm}$ ° C	Theoretical efficiency $\Delta G_f^\circ / \Delta H_f^\circ$ (per cent)
LiH . . .	-21.61	-16.72	0.73	850	77.4
NaH . . .	-13.7	-9.3	0.40	425	67.9
KH . . .	-13.6	-8.9	0.39	430	65.4
		(est.)			
RbH . . .	-12.8	-8.1	0.35	444	63.3
	(est.)	(est.)			
CsH . . .	-12 ^a	-7.3 ^a	0.32	479	60.8
CaH ₂ . .	-45.1	-35.8	0.78	984	79.4
SrH ₂ . .	-42.3	-33.0	0.72	840	78.0
		(est)			
BaH ₂ . .	-40.9	-31.5	0.68	730	77.0

Definitions:

ΔH_f° is the standard molal enthalpy of formation;

ΔG_f° is the standard molal free energy of formation.

SOURCES:

T. A. Ciarlariello and R. C. Werner, "Fuel cells based on nuclear reactors", *Chemical Engineering Progress* (New York), vol. 57 (1961), pp. 42-45, and F. D. Rossini *et al.*, "Selected values of chemical thermodynamic properties of hydrocarbons and related compounds" (Washington, National Bureau of Standards, Circular No. 500, 1952), except where specified otherwise by the following exception:

^a D. T. Hurd, *An Introduction to the Chemistry of the Hydrides* (New York, John Wiley, 1952; 331 pp.).

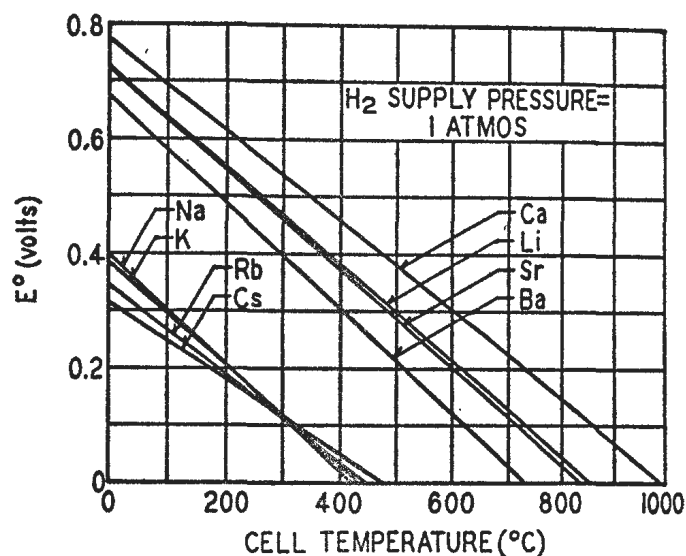


Figure 1

Standard output potential of cell vs temperature for various metal hydrogen combinations

Figure 3 is a diagrammatic sketch of what a system might look like. The system consists of a solar concentrator, a regenerator, a hydrogen storage chamber, a fuel cell, a voltage converter and a hydride storage chamber for use during regeneration. Temperature regulator shutters are used on the

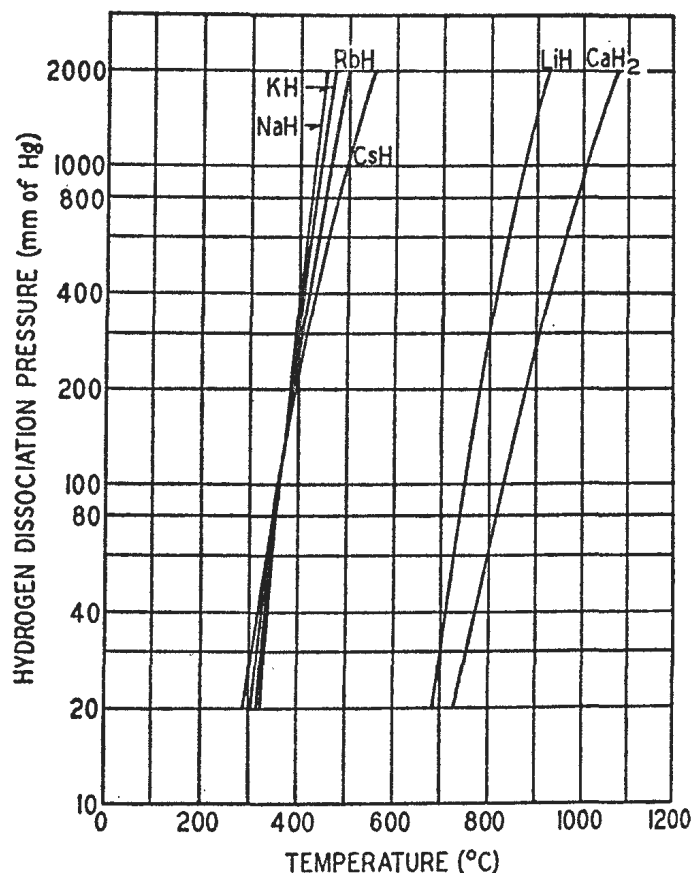
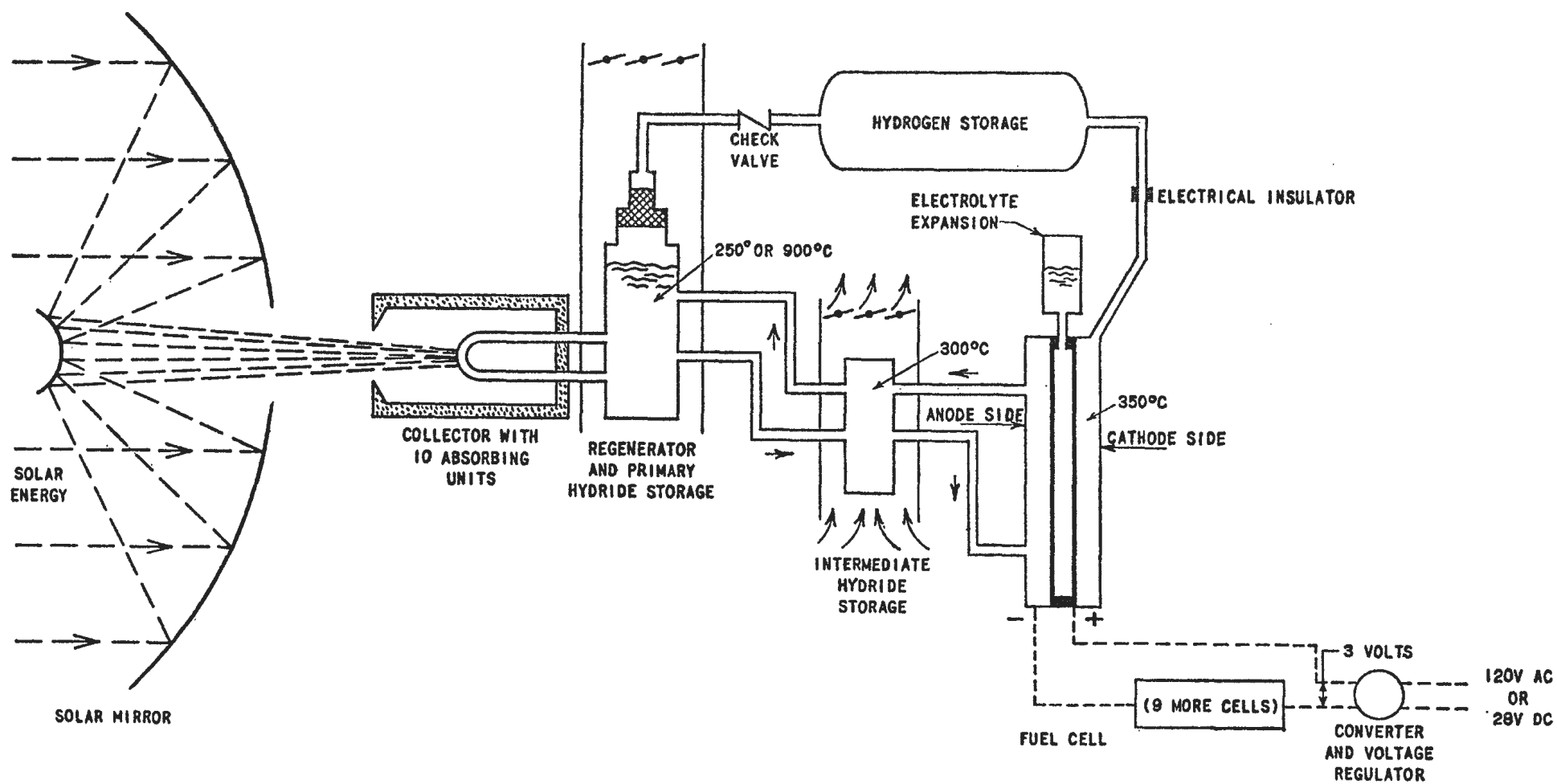


Figure 2

Dissociation pressure of various pure hydrides vs temperature



R-1246

Figure 3

Concept of using an ionic hydride fuel cell as an energy storage and converter device

hydride storage chamber, and on the regenerator to permit cooling from ambient air when necessary. In order to prevent electrical short circuits, the anode and cathode chambers must be insulated from each other within the cell and from the chambers or other cells; therefore, each cell must have its own regenerator. However, one solar mirror may be used with all of the heat collectors located in the focus area. Only a few cells in series are used since it is more desirable to step up the low voltage through use of static or rotary converter devices than it would be to add more cells. The converter also provides a convenient means of generating AC power from the DC power of the cell. It probably will be more desirable to repeat the system with more collectors than trying to get all of the power requirements out of one unit.

Night operation

In the cell, during night operation, hydrogen and the metal are consumed, producing power, heat, and hydride. The hydride dissolves in the liquid metal phase and the liquid metal stream circulates by natural convection through the regenerator. During this portion of the operating cycle, the regenerator is losing heat, thus cooling the liquid metal stream and precipitating the hydride in the regenerator.

Day operation

During the day operation of the cell, the solar mirror is orientated to collect and concentrate the solar energy on the heat collectors. The solar energy melts the precipitated hydride, raises the hydride to the dissociation temperature and causes it to dissociate. The hydrogen rises, passes through a one-way valve and increases the pressure in the hydrogen storage chamber. The metal formed on dissociation is retained and returned to the cell during night operation.

The electrochemical reaction in the cell produces both heat and electric power with the cell temperature being controlled by varying the rate at which the waste heat is rejected. The hydride produced in the cell during regeneration is stored in the hydride storage chamber.

SYSTEM PARAMETERS

In order to size the system just described and to obtain some idea of expected performance, the following assumptions are made as the basis for further consideration :

System	Lithium-hydrogen
Size	{ 10 kW 1 kW for each of 10 cells
Solar collector available	6 hours per day
Fuel cell	
Temperature	350°C
Material efficiency	90 per cent

Current density	200 ma/cm ² /0.1 volt
Output voltage	0.3 volts per cell
Hydride output	Saturated at temperature
Hydrogen storage	{ 400 mm of mercury min. pressure
Regenerator temperature	{ 900°C regenerating 250°C cooling
Hydride storage chamber. temperature	300°C
Storage capacity of system	48 hours
Electrical converter efficiency . .	80 per cent at 3-volt input

For the 10-kW output the cells must provide 12.5 kW of power or each cell will produce 1.25 kW at a terminal potential of 0.3 volts. The open circuit voltage of each cell is 0.385 with 0.085 volts being lost due to polarization and IR drop.

For a 48-hr storage capacity and the 90 per cent material efficiency, the quantities of lithium and hydrogen required per cell is 57.6 and 8.38 kg respectively.

The maximum available hydrogen pressure was taken as 1,500 mm of mercury absolute. The hydrogen storage chamber then becomes 70,300 litres per cell with the pressure varying between 1,500 and 400 mm of mercury during the 48-hr storage period.

To store the produced hydride in the regenerator, it was assumed that one volume of lithium per volume of hydride at the 250°C would be required, thus requiring 224 litres per cell at 900°C. The dissociation energy required was calculated at 156,100 kcal per cell at 900°C for the 48-hr storage, whereas the total heat required to heat the lithium and the hydride from 250 to 900°C before dissociation is 116,420 kcal. The thermal efficiency of this operation is estimated at 57.2 per cent. A further 10 per cent loss of heat through the thermal insulation and heat transfer surfaces is also assumed. The over-all efficiency at this point is 13.8 per cent. By far, the greatest loss is due to the heat energy remaining in the hot regenerator at the end of the regenerating period. In batch operation this energy is lost, and better methods of achieving regeneration should be considered.

The solar mirror must transfer 300,000 kcal of solar radiation during regeneration to provide the 48-hr storage requirement of 50,000 kcal per hour for each regenerator. A heat flux of 221,000 kcal/hr/m² can easily be handled by the lithium-lithium hydride mixtures resulting in 0.185 m² of projected surface being required for each regenerator. The solar mirror will be approximately 29 metres in diameter to transfer the 500,000 kcal/hr at 900°C required over the 6-hr period by all ten cells. If regeneration can be handled in 6 hours each day then a mirror only 20 metres in diameter could handle the job; or, if a mirror were required by each of the 10 cell units, the diameter would be 6.5 metres each. The over-all efficiency based on total intercepted solar energy is approximately 8 per cent.

COMPARISON WITH OTHER DEVICES

A comparison of the concept presented in this paper with other similar devices must, of necessity, be quite superficial because of the early development on the ionic hydride system. Based on the heat absorbed at the regenerator, the present lithium-hydrogen system should be around 13.8 per cent efficient and contain a 48-hr storage capacity. On a continuous regenerator basis this efficiency would be higher.

For a thermal electric system, the present efficiency for actual devices is around 5 per cent of heat absorbed. Devices are being designed for around 9 to 11 per cent efficiency with 15 per cent efficiency the expected future limit. Adding an energy storage device to these systems would lower their efficiency.

Solar cells have also been operating around the 10 per cent efficiency figure for total solar energy

intercepted. The addition of storage devices would also lower this efficiency. This compares with the expected 8 per cent of the lithium-hydrogen system.

An estimate is not made of the investment cost per kW or price per kWh for the lithium-hydrogen system presented. Such estimates could easily be off by a factor of 3 with present knowledge.

PRESENT STATUS

Several laboratory models have been constructed and tested. These investigations centre mostly around the electrolyte composition, hydrogen electrode development and system arrangements. Such information was used as the basis for the "System parameter" section. No models have been produced for life-time studies. Practical units appear to be 2 to 3 years away, depending upon the development effort.

Summary

Recent advancements in thermally regenerative ionic hydride fuel cells indicate that these cells may soon become practical. The process of thermally decomposing the reaction products to form the fuel and oxidizer required by the fuel cell makes the unit both an energy storage and an energy conversion device. The cost of operation should be low, as any source of heat may be used. The fuel and oxidizer are charged initially to the unit and then used over and over again.

A study of the physical and chemical properties of metal hydride, and especially the alkali and alkaline metal hydrides, has indicated that there is a possible hydride system for any heat source above 600°C.

In the ionic hydride cell, the metal or anode, on entering the molten salt electrolyte, gives up an electron to make the electrode negative. The hydrogen on entering the electrolyte at the cathode removes electrons, making this second electrode positive. The metal and hydrogen ions combine in the electrolyte to form the hydride, with the hydride dissolving in the liquid metal phase.

In the regenerator, the ionic hydride is heated to the dissociation temperature, forming hydrogen gas and liquid metal. The various streams are then separated, cooled and returned to the appropriate portion of the fuel cell.

The over-all cycle is a heat to power conversion cycle and the over-all thermodynamic efficiency would be limited by the Carnot cycle efficiency based on the temperatures of operation of the cell and regenerator.

When the ionic hydride system is operating as a storage device, the regenerator is producing more reactants than the cell is consuming. In the charged state the gaseous position of the reactants is stored external to the cell. In the discharged state the reaction products are stored within the cooled regenerator. The temperature required during regeneration, around 900°C for the lithium hydride system, falls well within the range available from solar concentration.

The efficiency of 13.8 per cent for the ionic hydride cycle should be better than the efficiency of thermoelectric devices operating between the same temperatures because, in the ionic hydride unit, the thermal conductivity path is independent of the electrical path, while in the thermoelectric device the two are normally not separated. An additional advantage is that the hydride cycle will allow storage of energy by electrochemical means.

Several laboratory models have been constructed and tested. Practical units for earth surface application are 2 to 3 years away, depending upon the development effort.

LES CELLULES A HYDRURES MÉTALLIQUES
EN TANT QU'ACCUMULATEURS D'ÉNERGIE

Résumé

Les progrès récemment réalisés dans le domaine des cellules à combustible employant les hydrures de certains ions métalliques à régénération thermique

indiquent que ces cellules pourront bientôt recevoir des applications pratiques. Le procédé par lequel on décompose thermiquement les produits de la

réaction pour obtenir le combustible et le carburant qui sont nécessaires à la cellule, font de ce dispositif un accumulateur d'énergie tout autant qu'un système de conversion de l'énergie. Les frais d'exploitation doivent logiquement être modiques, pour autant qu'on peut se servir de toute source de chaleur. Le combustible et le carburant sont chargés au départ et utilisés par la suite autant de fois qu'on le souhaite.

Une étude des propriétés physiques et chimiques des hydrures métalliques et plus particulièrement des hydrures des bases et des métaux alcalins a révélé qu'un système d'hydrures peut exister pour toute source de chaleur qui donne plus de 600 °C.

Dans les cellules à hydrure d'un ion, le métal, qui est à l'anode, abandonne un électron, rendant ainsi cette électrode négative, quand elle entre dans le bain électrolytique constitué par un sel. L'hydrogène, en pénétrant dans l'électrolyte à la cathode extrait des électrons, ce qui rend cette électrode positive. Les ions métal et hydrogène se combinent dans l'électrolyte pour former l'hydrure et ce dernier se dissout dans la phase métal fondu.

Dans le régénérateur, l'hydrure ionique est porté à sa température de dissociation, si bien qu'il libère de l'hydrogène sous sa forme gazeuse et un métal liquide. Les divers courants sont séparés, refroidis et renvoyés à la partie voulue de la cellule à combustible.

Le cycle global est une conversion de chaleur en force motrice et le rendement thermodynamique général serait limité par le rendement en cycle de

Carnot basé sur les températures de fonctionnement de la cellule et du régénérateur.

Quand le système à hydrure ionique fonctionne en dispositif d'accumulation ou de mise en réserve, le régénérateur produit plus d'éléments capables de réagir les uns sur les autres que la cellule n'en consomme. A l'état électriquement chargé, la partie gazeuse de ces éléments est mise en réserve à l'extérieur de la cellule. A l'état déchargé, les produits de la réaction sont mis en réserve dans le régénérateur refroidi. La température exigée pour la régénération, soit environ 900 °C pour le système à hydrure de lithium, tombe bien dans la gamme qui correspond à ce qui peut se faire avec la concentration solaire.

Le rendement de 13,8 p. 100 pour le cycle à hydrure ionique doit être supérieur au rendement des dispositifs thermo-électriques fonctionnant entre les mêmes températures parce que, dans le dispositif à hydrure ionique, les voies de conduction thermique sont indépendantes des voies électriques, tandis que, dans le dispositif thermo-électrique, elles ne sont normalement pas séparées. Un avantage supplémentaire réside dans le fait que le cycle à hydrure se prête à l'accumulation de l'énergie par des moyens électrochimiques.

On a réalisé et mis à l'essai plusieurs modèles de laboratoire. Les dispositifs pratiques, pour les applications à la surface de la terre, sont encore à deux ou trois ans de leur date de réalisation, suivant les efforts qui sont déployés en vue de leur perfectionnement.

WHERE TO BUY UNITED NATIONS PUBLICATIONS ADRESSES OÙ LES PUBLICATIONS DE L'ONU SONT EN VENTE

AFRICA/AFRIQUE

CAMEROON: LIBRAIRIE DU PEUPLE AFRICAÏN
La Gérante, B. P. 1197, Yaoundé.
ETHIOPIA/ÉTHIOPIE: INTERNATIONAL
PRESS AGENCY, P. O. Box 120, Addis Ababa.
GHANA: UNIVERSITY BOOKSHOP
University College of Ghana, Legon, Accra.
MOROCCO/MAROC: CENTRE DE DIFFUSION
DOCUMENTAIRE DU B.E.P.I.,
8, rue Michaux-Bellaire, Rabat.
SOUTH AFRICA/AFRIQUE DU SUD:
VAN SCHAIK'S BOOK STORE (PTY.), LTD.
Church Street, Box 724, Pretoria.
**UNITED ARAB REPUBLIC/
RÉPUBLIQUE ARABE UNIE:**
LIBRAIRIE "LA RENAISSANCE D'ÉGYPTÉ"
9 Sh. Adly Pasha, Cairo.

ASIA/ASIE

BURMA/BIRMANIE: CURATOR,
GOVT. BOOK DEPOT, Rangoon.
CAMBODIA/CAMBODGE:
ENTREPRISE KHMÈRE DE LIBRAIRIE
Imprimerie & Papeterie, S. à R. L., Phnom-Penh.
CEYLON/CEYLAN: LAKE HOUSE BOOKSHOP
Assoc. Newspapers of Ceylon, P. O. Box 244,
Colombo.
CHINA/CHINE:
THE WORLD BOOK COMPANY, LTD.
99 Chung King Road, 1st Section, Taipeh, Taiwan.
THE COMMERCIAL PRESS, LTD.
211 Honan Road, Shanghai.
HONG KONG/HONG-KONG:
THE SWINDON BOOK COMPANY
25 Nathan Road, Kowloon.
INDIA/INDE:
ORIENT LONGMANS
Bombay, Calcutta, Hyderabad, Madras
& New Delhi.
OXFORD BOOK & STATIONERY COMPANY
Calcutta & New Delhi.
P. VARADACHARY & COMPANY
Madras.
INDONESIA/INDONÉSIE: PEMBANGUNAN, LTD.
Gunung Sahari 84, Djakarta.
JAPAN/JAPON: MARUZEN COMPANY, LTD.
6 Tori-Nichome, Nihonbashi, Tokyo.
KOREA (REP. OF)/CORÉE (RÉP. DE):
EUL-YOO PUBLISHING CO., LTD.
5, 2-KA, Chongno, Seoul.
PAKISTAN:
THE PAKISTAN CO-OPERATIVE BOOK SOCIETY
Dacca, East Pakistan.
PUBLISHERS UNITED, LTD.
Lahore.
THOMAS & THOMAS
Karachi.
PHILIPPINES: ALEMAR'S BOOK STORE
769 Rizal Avenue, Manila.
SINGAPORE/SINGAPOUR:
THE CITY BOOK STORE, LTD., Collyer Quay.
THAILAND/THAÏLANDE: PRAMUAN MIT, LTD.
55 Chakrawat Road, Wat Tuk, Bangkok.
VIET-NAM (REP. OF/RÉP. DU):
LIBRAIRIE-PAPETERIE XUÂN THU
185, rue Tu-do, B. P. 283, Saigon.

BELGIUM/BELGIQUE: AGENCE
ET MESSAGERIES DE LA PRESSE, S. A.
14-22, rue du Persil, Bruxelles.
CZECHOSLOVAKIA/TCHÉCOSLOVAQUIE:
ČESKOSLOVENSKÝ SPISOVATEL
Národní Třída 9, Praha 1.
DENMARK/DANEMARK:
EJNAR MUNKSGAARD, LTD.
Nørregade 6, København, K.
FINLAND/FINLANDE:
AKATEMINEN KIRJAKAUPPA
2 Keskuskatu, Helsinki.
FRANCE: ÉDITIONS A. PÉDONE
13, rue Soufflot, Paris (Ve).
**GERMANY (FEDERAL REPUBLIC OF)/
ALLEMAGNE (RÉPUBLIQUE FÉDÉRALE D'):**
R. EISENSCHMIDT
Schwanthaler Str. 59, Frankfurt/Main.
ELWERT UND MEURER
Hauptstrasse 101, Berlin-Schöneberg.
ALEXANDER HORN
Spiegelgasse 9, Wiesbaden.
W. E. SAARBACH
Gertrudenstrasse 30, Köln (1).
GREECE/GRÈCE:
LIBRAIRIE KAUFFMANN
28, rue du Stade, Athènes.
ICELAND/ISLANDE:
BÓKAVERZLUN SIGFÚSAR
EYMUNDSSONAR H. F.
Austurstraeti 18, Reykjavík.
IRELAND/IRLANDE: STATIONERY OFFICE
Dublin.
ITALY/ITALIE:
LIBRERIA COMMISSIONARIA SANSONI
Via Gino Capponi 26, Firenze,
& Via D. A. Azuni 15/A, Roma.
LUXEMBOURG: LIBRAIRIE J. TRAUSCH-
SCHUMMER
Place du Théâtre, Luxembourg.
NETHERLANDS/PAYS-BAS:
N. V. MARTINUS NIJHOFF
Lange Voorhout 9, 's-Gravenhage.
NORWAY/NORVÈGE:
JOHAN GRUNDT TANUM
Karl Johansgate, 41, Oslo.
PORTUGAL: LIVRARIA RODRIGUES & CIA.
186 Rua Aurea, Lisboa.
SPAIN/ESPAGNE:
LIBRERIA BOSCH
11 Ronda Universidad, Barcelona.
LIBRERIA MUNDI-PRENSA
Castelló 37, Madrid.
SWEDEN/SUÈDE: C. E. FRITZE'S
KUNGL. HOVBOKHANDEL A-B
Fredsgatan 2, Stockholm.
SWITZERLAND/SUISSE:
LIBRAIRIE PAYOT, S. A.
Lausanne, Genève.
HANS RAUNHARDT
Kirchgasse 17, Zürich 1.
TURKEY/TURQUIE:
LIBRAIRIE HACHETTE
469 Istiklal Caddesi, Beyoglu, Istanbul.
**UNION OF SOVIET SOCIALIST REPUBLICS/
UNION DES RÉPUBLIQUES SOCIALISTES
SOVIÉTIQUES:** MEZHODNARODNAYA
KNYIGA, Smolenskaya Ploshchad, Moskva.
UNITED KINGDOM/ROYAUME-UNI:
H. M. STATIONERY OFFICE
P. O. Box 569, London, S.E.1
(and HMSO branches in Belfast, Birmingham,
Bristol, Cardiff, Edinburgh, Manchester).
YUGOSLAVIA/YOUGOSLAVIE:
CANKARJEVA ZALOŽBA
Ljubljana, Slovenia.
DRŽAVNO PREDUZEĆE
Jugoslovenska Knjiga, Terazije 27/11,
Beograd.
PROSVJETA
5, Trg Bratstva i Jedinstva, Zagreb.
PROSVETA PUBLISHING HOUSE
Import-Export Division, P. O. Box 559,
Terazije 16/1, Beograd.

LATIN AMERICA/ AMÉRIQUE LATINE

ARGENTINA/ARGENTINE: EDITORIAL
SUDAMERICANA, S. A., Alsina 500, Buenos Aires.
BOLIVIA/BOLIVIE: LIBRERIA SELECCIONES
Casilla 972, La Paz.
BRAZIL/BRÉSIL: LIVRARIA AGIR
Rua México 98-B, Caixa Postal 3291,
Rio de Janeiro.
CHILE/CHILI:
EDITORIAL DEL PACÍFICO
Ahumada 57, Santiago.
LIBRERIA IVENS
Casilla 205, Santiago.
COLOMBIA/COLOMBIE: LIBRERIA BUCHHOLZ
Av. Jiménez de Quesada 8-40, Bogotá.
COSTA RICA: IMPRENTA Y LIBRERIA TREJOS
Apartado 1313, San José.
CUBA: LA CASA BELGA
O'Reilly 455, La Habana.
**DOMINICAN REPUBLIC/RÉPUBLIQUE
DOMINICAINE:** LIBRERIA DOMINICANA
Mercedes 49, Santo Domingo.
ECUADOR/ÉQUATEUR:
LIBRERIA CIENTIFICA, Casilla 362, Guayaquil.
EL SALVADOR/SALVADOR: MANUEL NAVAS Y CIA.
1a. Avenida Sur 37, San Salvador.
GUATEMALA: SOCIEDAD ECONOMICA-
FINANCIERA
6a. Av. 14-33, Ciudad de Guatemala.
HAITI/HAÏTI:
LIBRAIRIE "À LA CARAVELLE", Port-au-Prince.
HONDURAS: LIBRERIA PANAMERICANA
Tegucigalpa.
MEXICO/MEXIQUE: EDITORIAL HERMES, S. A.
Ignacio Mariscal 41, México, D. F.
PANAMA: JOSE MENENDEZ
Agencia Internacional de Publicaciones,
Apartado 2052, Av. 8A, Sur 21-58, Panamá.
PARAGUAY: AGENCIA DE LIBRERIAS
DE SALVADOR NIZZA
Calle Pte. Franco No. 39-43, Asunción.
PERU/PÉROU: LIBRERIA INTERNACIONAL
DEL PERU, S. A. Casilla 1417, Lima.
URUGUAY: REPRESENTACION DE EDITORIALES,
PROF. H. D'ELIA
Plaza Cagancha 1342, 1° piso, Montevideo.
VENEZUELA: LIBRERIA DEL ESTE
Av. Miranda, No. 52, Edf. Galipán, Caracas.

MIDDLE EAST/MOYEN-ORIENT

IRAQ/IRAK: MACKENZIE'S BOOKSHOP
Baghdad.
ISRAEL/ISRAËL: BLUMSTEIN'S BOOKSTORES
35 Allenby Rd. & 48 Nachlat Benjamin St.,
Tel Aviv.
JORDAN/JORDANIE: JOSEPH I. BAHOUS & CO.
Dar-ul-Kutub, Box 66, Amman.
LEBANON/LIBAN:
KHAYAT'S COLLEGE BOOK COOPERATIVE
92-94, rue Bliss, Beyrouth.

NORTH AMERICA/ AMÉRIQUE DU NORD

CANADA: THE QUEEN'S PRINTER
Ottawa, Ontario.
**UNITED STATES OF AMERICA/
ÉTATS-UNIS D'AMÉRIQUE:**
SALES SECTION, UNITED NATIONS, New York.

OCEANIA/Océanie

AUSTRALIA/AUSTRALIE:
MELBOURNE UNIVERSITY PRESS
369 Lonsdale Street, Melbourne, C.1.
NEW ZEALAND/NOUVELLE-ZÉLANDE:
UNITED NATIONS ASSOCIATION OF
NEW ZEALAND, C. P. O. 1011, Wellington.

[62B1]

Orders and inquiries from countries where sales agencies have not yet been established may be sent to: Sales Section, United Nations, New York, U.S.A.,
or to Sales Section, United Nations, Palais des Nations, Geneva, Switzerland.

Les commandes et demandes de renseignements émanant de pays où il n'existe pas encore de bureaux de vente peuvent être adressées à la Section des ventes,
ONU, New York (É.-U.), ou à la Section des ventes, ONU, Palais des Nations, Genève (Suisse).