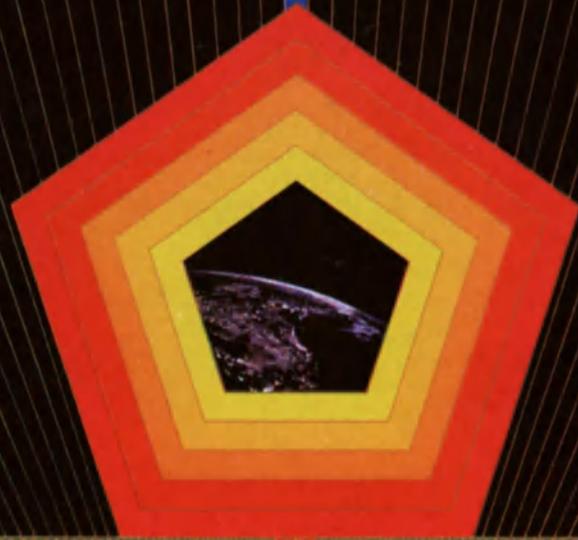


JUILLET 1981 - 4,50 FF

# Le Courrier de l'unesco



Maîtriser l'énergie



**TRÉSORS  
DE L'ART  
MONDIAL**

164

Inde

### **Un adorateur du Soleil**

De tout temps et partout, le Soleil a fasciné l'humanité et inspiré des traditions, des cultes ou des philosophies. Ce motif circulaire, représentant une fleur de lotus épanouie, est dédié à l'astre solaire, source de toute vie. Le personnage central est sans doute un adorateur du Soleil. Ce bas-relief, conservé au Musée indien de Calcutta, provient du linteau d'une porte de la stoupa de Bharhut, en Inde (2<sup>e</sup> siècle avant J.-C.).

Photo © Graudon, Paris

## PUBLIÉ EN 25 LANGUES

Français	Italien	Turc	Macédonien
Anglais	Hindi	Ourdou	Serbo-Croate
Espagnol	Tamoul	Catalan	Slovène
Russe	Persan	Malais	Chinois
Allemand	Hébreu	Coréen	
Arabe	Néerlandais	Kiswahili	
Japonais	Portugais	Croato-Serbe	

Une édition trimestrielle en braille est publiée en français, en anglais et en espagnol.

Mensuel publié par l'UNESCO  
Organisation des Nations Unies  
pour l'Éducation,  
la Science et la Culture

Ventes et distributions :  
Unesco, place de Fontenoy, 75700 Paris  
Belgique : Jean de Lannoy,  
202, avenue du Roi, Bruxelles 6

ABONNEMENT — 1 an : 44 francs français ; deux ans : 75 francs français. Paiement par chèque bancaire, mandat, ou CCP 3 volets 12598-48, à l'ordre de : Librairie de l'Unesco. Retourner à Unesco, PUB/C, 7, place de Fontenoy - 75700 Paris.

Reliure pour une année : 32 francs.

Les articles et photos non copyright peuvent être reproduits à condition d'être accompagnés du nom de l'auteur et de la mention « Reproduits du Courrier de l'Unesco », en précisant la date du numéro. Trois justificatifs devront être envoyés à la direction du Courrier. Les photos non copyright seront fournies aux publications qui en feront la demande. Les manuscrits non sollicités par la Rédaction ne sont renvoyés que s'ils sont accompagnés d'un coupon-réponse international. Les articles paraissant dans le Courrier de l'Unesco expriment l'opinion de leurs auteurs et non pas nécessairement celle de l'Unesco ou de la Rédaction. Les titres des articles et les légendes des photos sont de la rédaction.

Bureau de la Rédaction :  
Unesco, place de Fontenoy, 75700 Paris, France

Rédacteur en chef :  
Jean Gaudin

Rédacteur en chef adjoint :  
Olga Rodel

Secrétaire de rédaction : Gillian Whitcomb

Rédacteurs :  
Edition française :  
Edition anglaise : Howard Brabyn (Paris)  
Edition espagnole : Francisco Fernandez-Santos (Paris)  
Edition russe : Victor Goliachkov (Paris)  
Edition allemande : Werner Merkli (Berne)  
Edition arabe : Abdel Moneim El Sawi (Le Caire)  
Edition japonaise : Kazuo Akao (Tokyo)  
Edition italienne : Maria Remiddi (Rome)  
Edition hindie : Krishna Gopal (Delhi)  
Edition tamoule : M. Mohammed Mustafa (Madras)  
Edition hébraïque : Alexander Broïdo (Tel-Aviv)  
Edition persane : Samad Nourinejad (Téhéran)  
Edition néerlandaise : Paul Morren (Anvers)  
Edition portugaise : Benedicto Silva (Rio de Janeiro)  
Edition turque : Mefra Ilgazer (Istanbul)  
Edition ourdoue : Hakim Mohammed Saïd (Karachi)  
Edition catalane : Joan Carreras i Marti (Barcelone)  
Edition malaise : Bahador Shah (Kuala Lumpur)  
Edition coréenne : Lim Moon-Young (Séoul)  
Edition kiswahili : Domino Rutayebesibwa (Dar-es-Salaam)

Editions braille : Frederick H. Potter (Paris)  
Editions croato-serbe, macédonienne, serbo-croate, slovène : Punisa Pavlović (Belgrade)  
Edition chinoise : Shen Guofen (Pékin)

Rédacteurs adjoints :  
Edition française :  
Edition anglaise : Roy Malkin  
Edition espagnole : Jorge Enrique Adoum

Documentation : Christiane Boucher

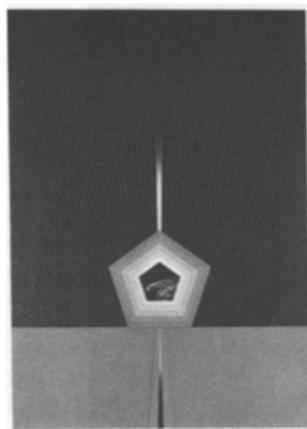
Illustration : Ariane Bailey

Maquettes : Philippe Gentil

Toute la correspondance concernant la Rédaction doit être adressée au Rédacteur en Chef.

pages

4	<b>MAÎTRISER L'ÉNERGIE</b> <i>par Amadou-Mahtar M'Bow</i>
6	<b>LE COCKTAIL ÉNERGÉTIQUE</b> <i>par Enrique V. Iglesias</i>
9	<b>SCÉNARIOS POUR UN SYSTÈME ÉNERGÉTIQUE MONDIAL</b> <i>par Wolfgang Sassin</i>
10	<b>LES MÉTAMORPHOSES DE L'ÉNERGIE</b>
13	<b>LE MONDE POURRA-T-IL PAYER LA NOTE ?</b>
14	<b>INDÉPENDANCE ET DÉVELOPPEMENT</b> Le gisement solaire <i>par Abdou Moumouni Dioffo</i>
17	<b>INVENTAIRE MONDIAL DE L'ÉNERGIE</b> <i>par Zoran Zaric</i>
18	Les combustibles fossiles
21	L'énergie nucléaire
23	L'énergie géothermique
24	L'énergie marémotrice, l'énergie des vagues, l'énergie éolienne
27	L'énergie hydraulique, l'énergie thermique des océans
29	L'énergie solaire
31	Les combustibles solaires
19	<b>FORMER ET INFORMER</b> <i>par James F. McDivitt</i>
20	<b>L'UNIFICATION DES FORMES FONDAMENTALES DE L'ÉNERGIE</b> <i>par Abdus Salam</i>
23	<b>ÉNERGIES NOUVELLES: COÛTS ET CONTRAINTES</b> <i>par Boris M. Berkovsky</i>
29	<b>LE CENTRE SOLAIRE RÉGIONAL DE BAMAKO, MALI</b> Une étude de l'Unesco
30	<b>FREINS SOCIAUX ET CULTURELS</b>
32	<b>L'ESSENCE VERTE DU BRÉSIL</b> <i>par Benedicto Silva</i>
33	<b>INDE: LE BIOGAZ A L'ÉPREUVE DES TRADITIONS</b> <i>par Tushar Kanti Moulik</i>
2	<b>TRÉSORS DE L'ART MONDIAL</b> INDE: Un adorateur du Soleil



## Notre couverture

Ce numéro du *Courrier de l'Unesco*, consacré aux problèmes de l'énergie dans le monde, souligne la nécessité de trouver une nouvelle combinaison de sources d'énergie renouvelables qui rendent l'humanité moins tributaire des combustibles fossiles en voie d'épuisement. C'est là un défi non seulement pour la technologie moderne, mais aussi pour la coopération et la solidarité internationales, car la crise de l'énergie, si elle affecte toutes les nations, impose une charge excessivement lourde aux pays en développement dont l'essor se heurte à la hausse vertigineuse des coûts énergétiques. L'Unesco se prépare à participer à la Conférence des Nations Unies sur les sources d'énergie nouvelles et renouvelables qui se tiendra à Nairobi (Kenya) entre le 10 et le 21 août prochain.

Dessin de couverture Nagai Kazumasa  
© Graphic Design Associate, Tokyo

# Maîtriser

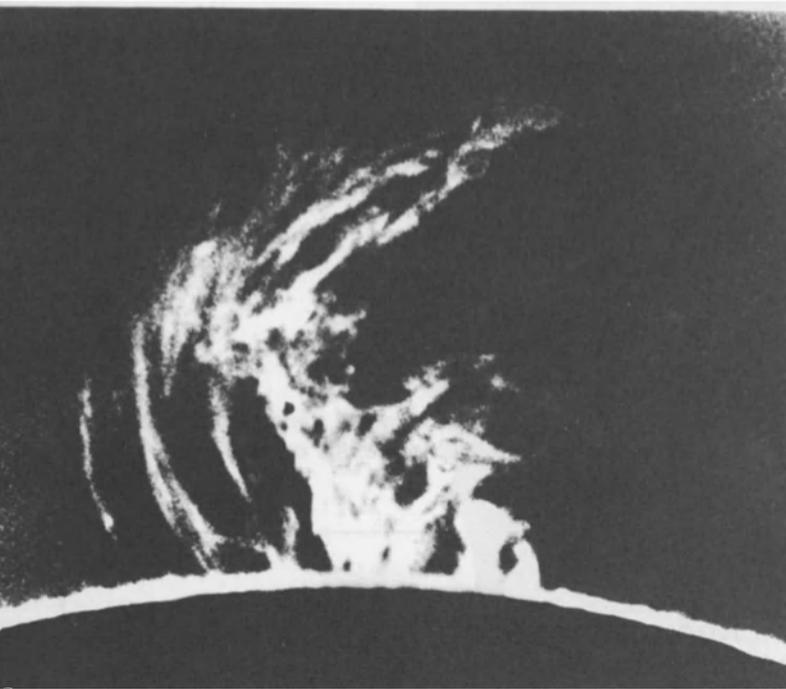


Photo © IPS, Washington, D.C.



Photo J. Bicket © The Image Bank, Paris

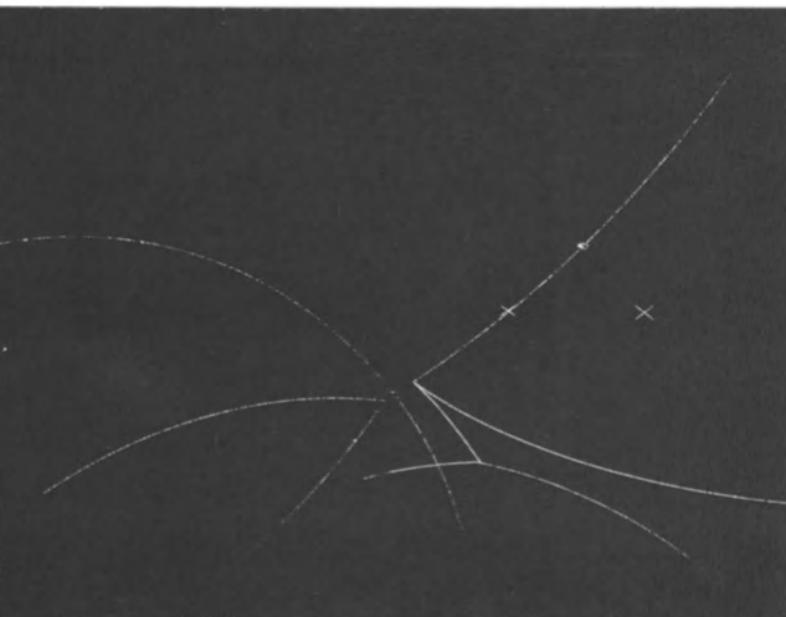


Photo © CERN, Genève

**L'**ENERGIE a toujours été un facteur primordial dans la vie des sociétés. Toute activité implique une dépense d'énergie : aussi, de la traction animale à la fission nucléaire, l'histoire de l'énergie se confond-elle avec celle de l'humanité, dont elle est à bien des égards un des fils conducteurs. La production d'énergie a suivi, à travers les siècles, l'essor de la pensée scientifique. Les types d'énergie disponibles, ainsi que leurs modes d'utilisation, ont eu des influences souvent directes sur la nature même de la société. C'est dire qu'il faut considérer l'énergie, dans une perspective historique, à travers le prisme de la culture au sens le plus large.

Ainsi, l'utilisation massive du charbon, associée à l'invention de la machine à vapeur, et aux progrès de la chimie et de la sidérurgie, a-t-elle rendu possible, à partir du 19<sup>e</sup> siècle, la première révolution industrielle qui allait transformer les sociétés essentiellement agraires d'Europe, puis d'Amérique. De même, la découverte de l'électricité a profondément marqué la vie des hommes et des femmes sur tous les continents par ses applications multiples, qu'il s'agisse de l'éclairage, de la mécanisation ou de la communication et favorisé la formation des grands centres urbains contemporains. L'exploitation accélérée, à partir du 20<sup>e</sup> siècle, d'autres combustibles fossiles — pétrole, gaz naturels — et, plus près de nous, le développement de l'hydroélectricité d'abord et de l'énergie nucléaire ensuite, ont permis aux sociétés industrialisées de poursuivre, sur leur lancée, la véritable mutation qu'elles ont connue et d'où est né le monde moderne, avec ses espoirs et ses contradictions.

Si, aujourd'hui, les problèmes de l'énergie se posent avec une acuité qui justifie la tenue, à l'échelle internationale, d'une Conférence des Nations Unies sur les sources d'énergie nouvelles et renouvelables, c'est qu'il n'apparaît désormais plus possible de satisfaire les besoins mondiaux, qui ne cessent de croître, en continuant à exploiter dans des conditions inchangées un nombre trop limité de ressources énergétiques. La communauté internationale se trouve ainsi placée devant un défi : opérer sans tarder les changements structurels — économiques, sociaux et technologiques — qu'exige la transition vers de nouvelles sources d'énergie.

En effet, comme le montre ce numéro du *Courier de l'Unesco*, il n'existe pas, dans les conditions actuelles de la production et de la vie de plusieurs sociétés, de source énergétique unique qui puisse continuer à satisfaire pour une période très longue tous les besoins, ni de nouvelles ressources susceptibles de prendre le relais complet de celles qui existent. Tel est le bilan d'une situation mondiale qui a été trop longtemps caractérisée par l'exploitation intensive, pour des raisons économiques liées notamment au sous-paiement de l'énergie, de ressources non renouvelables, comme le pétrole, et donc menacées d'épuisement à plus ou moins long terme. L'étude des solutions de rechange doit viser à accroître la production d'énergie, mais en situant cet effort dans un cadre plus large. Il ne paraît plus possible d'envisager l'avenir sans prendre en considération toute la consommation mondiale, ainsi que la nécessité d'une reconversion de l'ensemble de l'économie de l'énergie avec toutes les conséquences qui peuvent en résulter pour l'environnement et pour la société.

Un tel projet intéresse tous les pays, industrialisés et en développement. Les problèmes qu'il soulève se poseront certes différemment selon les nations, mais toutes ont intérêt à ce que la transition se fasse de manière concertée et sans heurts graves. Il importe notamment de créer des sources nouvelles d'énergie, moins coûteuses et susceptibles

# l'énergie

par Amadou-Mahtar M'Bow  
Directeur général de l'Unesco

d'être exploitées presque partout. Pour les pays en développement, le problème est d'une importance vitale. La situation de déséquilibre croissant qu'ils connaissent actuellement ne leur permet guère de mobiliser les ressources financières nécessaires. Il leur faut donc trouver des ressources nouvelles, mais surtout accéder aux connaissances et aux techniques dont la maîtrise est indispensable à leur progrès — grâce notamment à une meilleure circulation de l'information. Pour ce faire, ces pays ont besoin de participer en tant que partenaires de plein droit à la prise de décision économique au niveau mondial. La transition vers des sources diversifiées d'énergie est en grande partie liée à l'instauration de nouvelles règles et de nouveaux mécanismes pour atténuer les tensions de l'économie mondiale et mettre en œuvre un ordre économique international plus juste, dans un esprit de solidarité et de concertation.

L'Unesco intervient dans cette réflexion et dans cette action internationales. Outre que ses activités tendent, dans leur ensemble, à favoriser l'émergence de ce nouvel ordre, elle est à même, par ses compétences particulières, de contribuer au renforcement de la coopération scientifique internationale qui est indispensable au progrès des connaissances et à la libre circulation du savoir. Elle peut aussi aider les pays à élaborer, pour tenter de résoudre les problèmes de l'énergie, des politiques nationales qui tiennent compte de tous les facteurs en jeu, que ceux-ci aient trait tout aussi bien à la science, à la technique qu'à l'éducation, à l'information ou au domaine socio-culturel.

La libre circulation de l'information scientifique et technique et les échanges des données d'expériences acquises dans des cadres sociaux, économiques et culturels variés, peuvent contribuer de façon décisive à une mise en exploitation plus rapide des sources d'énergie nouvelles et renouvelables, notamment dans les pays en développement. Aussi l'Unesco travaille-t-elle actuellement à la création d'un système international d'information concernant les sources d'énergie, dont l'utilisation nécessite des données dans de multiples domaines — sciences physiques, écologie, sciences de la vie, sciences de l'ingénieur, science économique — mais aussi l'accès à la documentation sur la production, la planification et la formation à tous les niveaux, depuis l'enseignement universitaire jusqu'à la vulgarisation en milieu rural. Ce système intéressera donc une large gamme d'utilisateurs allant du chercheur au planificateur, de l'ingénieur à l'éducateur, sans oublier le grand public dont l'adhésion est essentielle, quand il s'agit de réaliser des économies d'énergie ou d'adopter des techniques nouvelles. La mise en place d'un tel réseau d'information est, bien entendu, indissociable d'une intensification des activités de recherche, d'enseignement, de formation et de vulgarisation que l'Unesco s'attache à promouvoir à travers son programme.

Soucieuse aussi de replacer les problèmes de l'énergie dans un cadre qui permette d'en saisir toute la complexité, l'Unesco s'est efforcée d'identifier les nombreux facteurs autres que techniques (en particulier, de nature socio-culturelle) qui influent sur l'exploitation des différentes sources d'énergie. Les attitudes sociales, différentes d'un pays à l'autre, peuvent avoir des effets non négligeables sur les possibilités et la rapidité du changement.

On ne saurait non plus négliger les problèmes d'environnement consécutifs à un recours croissant au charbon et à l'énergie nucléaire. Ce sont certains effets à court terme sur la santé publique ou sur les conditions du travail, ou les conséquences directes sur le milieu

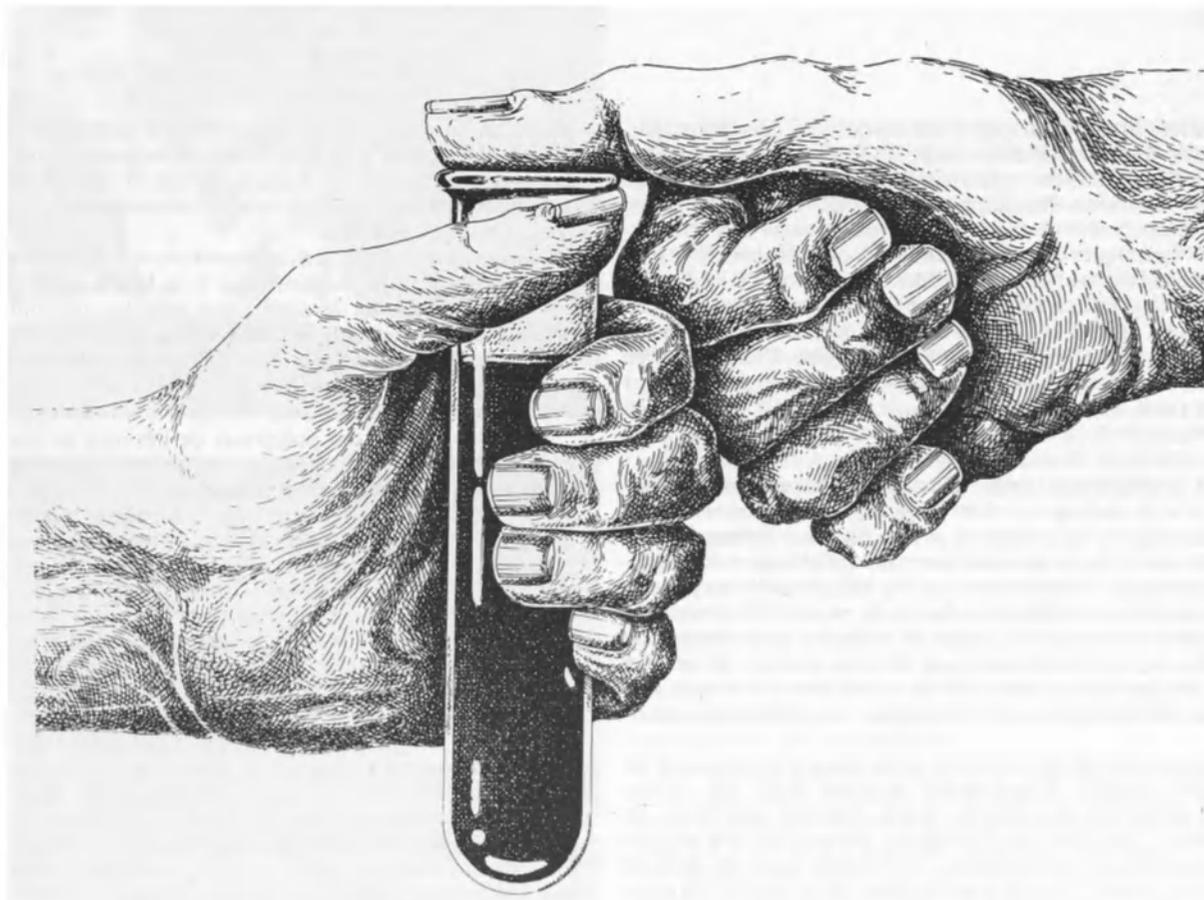
physique, qui ont essentiellement retenu l'attention, au détriment des conséquences à plus long terme socio-économiques et mésologiques, pour lesquelles on dispose souvent de très peu de données et qui, pour être pleinement éclaircies, nécessitent une action internationale mieux concertée.

Par ces études et ces activités touchant les problèmes de l'énergie, l'Unesco se propose de contribuer à la fois aux efforts de chaque pays pour assurer son développement dans les voies qui lui sont propres et à ceux que déploie la communauté internationale, en cette fin du 20<sup>e</sup> siècle, pour parvenir à une gestion équilibrée et plus équitable des ressources de la planète, considérées comme le patrimoine de tous les peuples, et des générations présentes et à venir.

Mais une analyse des problèmes de l'énergie ne peut s'abstraire d'une réflexion historique sur le rapport entre les niveaux successifs d'utilisation de l'énergie par l'homme et l'évolution des concepts scientifiques qui la rendent possible. L'énergie mécanique, due au labeur humain et au travail animal, a longtemps représenté dans l'histoire de l'humanité, et représente encore pour de nombreux peuples, la forme la plus importante d'énergie ; c'est à elle qu'on doit le premier développement de l'agriculture et la civilisation citadine. Grâce à l'essor des sciences physiques et leur application à l'interprétation des phénomènes de la nature, le sens du mot énergie s'est graduellement élargi ; à la mécanique se sont ajoutées la thermodynamique et l'électrodynamique permettant ainsi un premier saut d'importance dans l'échelle de la production énergétique et faisant passer du kilowatt au mégawatt, impulsant ainsi la première révolution industrielle. Le niveau d'abstraction suivant, celui de la théorie des quanta, a correspondu au passage d'un nouveau seuil : celui de l'emploi de l'énergie de fission nucléaire. Cette découverte, associée à la mise au point des ordinateurs, a conduit à la deuxième révolution industrielle, à partir de laquelle l'énergie se mesure en gigawatts et non plus en mégawatts. D'autres seuils seront assurément franchis à mesure que progresseront les recherches fondamentales sur la structure de la matière et que seront développées les techniques susceptibles d'assurer réellement l'élimination et le recyclage des déchets radioactifs. La fusion nucléaire constitue un domaine prometteur puisque les quantités d'énergie dégagées sont encore plus considérables que celles qui peuvent être produites jusqu'ici et la matière première en est très abondante.

Ces percées successives du savoir, que l'ingéniosité humaine utilise aussitôt à des fins pratiques, relèvent certes du génie individuel, celui des grands savants de tous les temps dont l'œuvre constitue autant de jalons dans l'histoire de la pensée scientifique. Mais, de même que les progrès accélérés accomplis depuis quelques décennies ont été rendus possibles par la lente accumulation, de relais en relais, à travers le temps et l'espace, du savoir universel, l'innovation scientifique et technique, qu'elle soit en premier ressort le fait de la création individuelle ou collective, ne peut, étant donné la complexité du monde d'aujourd'hui, être mise à profit pour le bien de tous sans une étroite coopération entre tous les milieux où elle prend naissance et trouve ses applications. Or cette coopération intellectuelle est précisément un domaine d'action privilégié de l'Unesco. En la favorisant, en resserrant toujours davantage les liens entre les scientifiques du monde, l'Unesco, dans le domaine de l'énergie comme ailleurs, prépare aussi l'avenir, un avenir où l'homme sera assez savant pour libérer des forces à la mesure de ses immenses besoins, assez sage pour les maîtriser. ■

# Le cocktail énergétique



Dessin © Atlantic Richfield Co., Los Angeles

par Enrique V. Iglesias

**L'**ÉNERGIE concerne fondamentalement tous les hommes. Elle imprègne le devenir des sociétés, touchant aussi bien la vie quotidienne des familles que la politique mondiale, l'économie internationale et les stratégies de développement des nations. Son importance s'est encore accrue de façon significative dans les années récentes en raison de ce qu'on a appelé — non sans ambiguïté — la crise mondiale de l'énergie. Cette crise, trois éléments importants permettent de la comprendre et de situer le problème dans la bonne perspective.

---

**ENRIQUE V. IGLESIAS**, de l'Uruguay, est Secrétaire général de la Conférence des Nations Unies sur les sources nouvelles et renouvelables d'énergie qui se tiendra à Nairobi du 10 au 21 août prochain. Depuis 1972 il est secrétaire exécutif de la Commission économique des Nations Unies pour l'Amérique latine.

Premier élément : les combustibles fossiles, si longtemps à la base de nos équilibres énergétiques modernes, et dont on comprit, au début des années 70, qu'ils se trouveraient épuisés dans un avenir peu éloigné. Pour la première fois, la découverte de réserves se faisait à un rythme moins rapide que la croissance de la consommation. En tout réalisme, et selon des estimations scientifiques, l'humanité se trouvait ainsi devant la perspective d'un épuisement des ressources que nos enfants pourraient déjà connaître.

Le second élément de la crise vient du fait que, pour la première fois dans l'histoire, une transition énergétique s'accompagnera de coûts économiques plus élevés. Jusqu'à ces années récentes, nous avons vécu une période d'énergie bon marché, les prix du pétrole étant maintenus très bas. Désormais il faudra payer plus cher pour avoir de l'énergie. C'est un nouveau défi et dont l'ampleur reste inconnue.

Enfin, cette crise de l'énergie a touché l'humanité de manière très inégale. Affectant à la fois les pays industrialisés et les pays en développement, elle a eu sur ces derniers un contrecoup bien particulier. Pour leur développement économique et leur modernisation, ces pays auront en effet à payer l'énergie beaucoup plus cher que les pays industrialisés. Cela pose sans aucun doute à la communauté internationale un problème d'équité et de solidarité qui devrait stimuler la coopération internationale.

Les Nations Unies ont pour raison d'être la coopération internationale dans la recherche de solutions aux problèmes communs à toute l'humanité. Elles se trouvent donc dans la meilleure position qui soit pour discuter et susciter des initiatives dans le domaine de l'énergie.

Aussi, en décembre 1978, l'Assemblée générale a-t-elle invité tous les gouvernements à une conférence qui se tiendra à Nairobi du 10 au 20 août 1981. Il s'agissait d'élaborer une action concertée pour promouvoir le développement et l'utilisation de sources d'énergie nouvelles et renouvelables répondant à tous les besoins futurs en énergie. Cette action s'inscrira dans le cadre de toutes celles qui visent à accélérer le développement des nations du tiers-monde. Les mesures à prendre seront énoncées dans un des documents fondamentaux de la conférence : le Programme d'action qui se négocie en ce moment entre tous les participants — gouvernements et institutions des Nations Unies.

Un fait doit être souligné, dont l'importance politique est considérable. La transition énergétique qui nous attend exige que, pour la première fois dans l'histoire humaine, les choix à faire soient étudiés et discutés par l'ensemble de la communauté internationale. Cela ouvre la voie aux initiatives que pourra prendre la conférence en vue d'un nouvel éventail énergétique mondial : une gamme nouvelle utilisant des sources d'énergie multiples, diversifiées, dans un contexte de sécurité et de paix.

Cette transition énergétique à venir comporte cinq éléments qu'il peut être utile de rappeler. Première elle est inévitable. Dans l'éventail énergétique actuel, la consommation du pétrole continue à tenir une place notable, même si son importance relative est destinée à décroître avec la fin du siècle. La demande en pétrole sera forte dans le monde industrialisé : son accroissement devrait être d'environ 50 %, soit quatre

à cinq fois la demande actuelle du monde en développement, lequel a besoin lui aussi d'accéder à des sources d'énergie s'il veut accélérer sa croissance.

Ceci aura lieu quelles que soient les politiques : de conservation ou d'investissements. Un moment viendra, au cours du prochain siècle, où le pétrole perdra encore plus d'importance dans la consommation énergétique du monde : une nouvelle combinaison d'énergies deviendra indispensable. A ce défi, qu'ils ne pourront éviter, pays industrialisés et pays en développement auront à faire face ensemble.

Second élément : la transition est viable. Car on ne peut pas dire aujourd'hui que le monde manque de sources d'énergie. Le problème n'est pas là. Il réside dans la rarefaction possible de certains combustibles, surtout les combustibles liquides. En plus d'une occasion, les experts ont montré que les ressources en énergie existaient. Pour eux, le véritable problème consiste à investir dans les ressources technologiques et dans la production. Il n'y aura plus, disent-ils, une seule forme d'énergie de remplacement comme dans le passé, mais toute une gamme.

En troisième lieu, cette transition énergétique sera beaucoup plus complexe que celles du passé. Complexité due surtout au fait que l'on a maintenu de façon artificielle des combustibles fossiles à des prix très bas pendant des décennies et que l'ajustement en cours vient d'un processus aux ramifications nombreuses. A court terme, les problèmes posés par les balances de paiements, par les notes à payer pour l'énergie, et par l'inflation importée de l'étranger affecteront de façon particulière les pays en développement qui n'ont pas pu procéder aux ajustements nécessaires en augmentant leurs exportations ; ils accroissent en fait leur endettement.

Il y a toutefois plus important encore. La transition obligera en effet à consacrer à l'énergie une proportion toujours plus élevée des sommes disponibles pour l'investissement. La compétition deviendra donc féroce entre l'investissement énergétique et les autres. Elle pourrait même conduire certains pays en développement à cesser virtuellement d'investir dans l'énergie ; ce qui représenterait une menace sérieuse pour leur avenir économique.

La transition énergétique a pour quatrième caractère de montrer des degrés d'urgence variables. Il apparaît qu'elle ne se

manifestera pas de la même façon dans le secteur moderne et dans le secteur traditionnel de l'économie mondiale. Pour le secteur moderne, elle représente un grand défi technologique : il s'agit de trouver l'accès à des sources d'énergie diversifiées. Et l'histoire peut rendre optimiste : les réussites de l'humanité en matière d'énergie dans les dernières décennies ne laissent guère de place au pessimisme. Le monde, en particulier son secteur moderne, trouvera toujours le moyen de réussir la transition énergétique. La situation apparaît bien différente pour le secteur traditionnel, situé pour l'essentiel dans les pays en développement. Dans beaucoup de ces pays, les zones rurales en sont toujours au bois de chauffage et au charbon de bois ; elles n'ont pas encore accompli leur première transition énergétique.

Enfin, je pense qu'un cinquième aspect de cette transition est le rôle fondamental qu'y jouera l'efficacité dans l'emploi de l'énergie. Les pays industrialisés l'ont bien vu qui, ces dernières années, ont accompli de louables efforts contre le gaspillage énergétique. Il reste toutefois beaucoup à faire pour utiliser l'énergie primaire de façon plus efficace. Quand les experts nous disent que 15 % seulement de l'énergie primaire sert finalement à ce pour quoi elle est produite, et que 70 à 80 % en sont perdus en cours de route, la marge d'amélioration possible apparaît évidemment importante. Ceci ne concerne pas seulement les pays industrialisés, mais aussi les pays en développement.

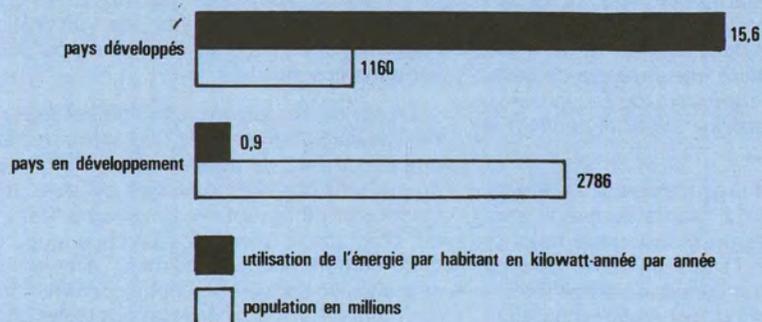
Ainsi l'objectif premier de la conférence sera-t-il d'examiner les solutions possibles, compte tenu des cinq caractéristiques de la transition. Mais un autre de ses buts, et tout aussi important, sera d'examiner le problème dans le contexte des pays en développement et de leurs besoins. Ici apparaît la nécessité d'étudier une stratégie du développement, ce qui donne à la transition énergétique une dimension nouvelle.

Dans un tel contexte, les sources d'énergie nouvelles et renouvelables peuvent jouer un rôle important. Toutefois il est fondamental que les pays du tiers-monde puissent mieux accéder à toutes les formes d'énergie s'ils veulent accélérer leur développement ; ce qui va dans le sens d'une répartition plus équitable des richesses économiques entre les pays.

Une chose est sûre : les modes de développement actuels ne pourront se maintenir ni dans les pays industrialisés ni dans le tiers-monde sur la base des systèmes énergétiques existants. Des études récentes l'ont montré : s'il y a eu en général une forte corrélation positive entre le niveau de développement d'un pays et l'énergie qu'il utilise, on peut envisager des stratégies de développement nécessitant moins d'énergie qu'autrefois. Il faut mettre en œuvre pour tous les pays des systèmes fondés sur une diversité et une autosuffisance plus grandes, et sur un meilleur rendement dans l'utilisation des sources d'énergie. Ce pourrait être plus facile pour les pays en développement : pour eux, l'éventail des choix est plus ouvert. Ils ne sont pas embarrassés d'infrastructures industrielles trop anciennes.

Pour tous les pays, résoudre le problème dans le cadre d'une stratégie du développement et d'une politique de l'énergie qui leur soient propres représente à la fois l'exercice d'un droit souverain et la réponse à un défi sans égal. Pour la communauté internationale, c'est un défi à la responsabilité et à la

### Répartition de la population mondiale et de l'utilisation de l'énergie en 1975



D'après l'IIASA



► solidarité que d'aider les pays en développement à acquérir l'énergie supplémentaire nécessaire à l'accélération de leur croissance économique et sociale ; il faut en trouver le moyen.

Comment attirer l'attention sur ce besoin ? Comment faire comprendre qu'il faut entreprendre la transition énergétique dans les pays en développement de façon neuve et qui, en même temps, leur assure l'apport en énergie nécessaire ?

Il faut d'abord, à mon avis, souligner qu'un pays ne peut étudier sa stratégie énergétique pour elle-même. L'énergie est à l'évidence pour toute nation un élément central de la stratégie globale de développement. Second point important : quand, dans les pays en développement, les stratégies énergétiques sont ainsi intégrées à une politique d'ensemble, elles peuvent servir au développement économique et social. Il faudra beaucoup d'imagination pour définir de telles stratégies ; pour en faire non pas de

simples additions au processus de développement, mais un véritable moteur de croissance utilisant les ressources naturelles, celles du travail, celles des technologies locales.

Orientons donc l'intérêt général pour l'augmentation de l'énergie disponible vers une panoplie d'énergies diversifiées et durables — en particulier vers celles qui assurent à l'humanité un courant de ressources renouvelables dans l'avenir. Un tel effort complètera utilement une stratégie de développement qui contribuera de façon active au progrès économique et social pendant la phase de transition.

Deux niveaux d'urgence seront à considérer. A court terme, il faudra donner la priorité aux déshérités du monde rural touchés en particulier par l'épuisement du bois de chauffage. A moyen terme, on devra renforcer vigoureusement la recherche technologique, de façon à réduire le temps de pénétration des énergies nouvelles et renouvelables

dans l'éventail énergétique — que ce soit dans les pays développés ou en développement.

Il faudra stimuler la coopération internationale, notamment par le transfert de ressources financières aux pays en développement, soutenir les recherches en énergie, le transfert de technologie et l'investissement, et il faudra supprimer les obstacles qui empêchent d'accroître et de diversifier l'approvisionnement en énergie en particulier dans ces pays.

En fin de compte, la conférence de Nairobi devrait permettre de faire démarrer un puissant effort de coopération à l'intérieur du système des Nations Unies qui aura une responsabilité essentielle dans la réalisation du programme d'action. Je crois que, si cette conférence peut vraiment stimuler les capacités de coopération et de coordination, elle rendra le système des Nations Unies plus efficace dans la réponse aux besoins des Etats membres.

Enrique V. Iglesias

# Scénarios pour un système énergétique mondial

par Wolfgang Sassin

**L**A multiplication des liens d'interdépendance entre les nations s'accompagne inévitablement de problèmes nouveaux qui risquent, faute d'être maîtrisés à temps, de s'aggraver et de cristalliser les tensions internationales. Quand on en arrive à une telle situation, chacun tente d'y faire face du mieux qu'il peut, isolément. Tous les moyens disponibles servent alors à renforcer la position nationale, la volonté de rechercher en commun une solution durable s'évanouit, et le problème devient — dans le meilleur des cas — un obstacle supplémentaire à la poursuite du développement, à l'échelle mondiale et nationale.

C'est dans ce sens que semble évoluer le problème énergétique du début des années 70. Il a pour origine le passage rapide d'un approvisionnement national à un approvisionnement planétaire, lié à des réserves de pétrole géographiquement très localisées. La forte augmentation, dans le même temps, de la consommation mondiale d'énergie, a été un facteur déterminant. Au moment de la première crise pétrolière, le Golfe — modeste tache sur la planisphère — couvrait près de 20 % des besoins énergétiques mondiaux. Les pays de l'OPEP approvisionnaient principalement les pays industrialisés de l'Europe occidentale, les Etats-Unis et le Japon. Aujourd'hui, huit ans après le premier embargo pétrolier et le contrôle de l'OPEP sur le prix du

pétrole, trois constatations au moins s'imposent : 1) la consommation de pétrole plafonne plus ou moins à son niveau de 1973/74 ; 2) pour l'instant, aucune source d'énergie n'a pu se substituer au pétrole qui, jusqu'en 1973, était un facteur de production bon marché stimulant l'expansion ; 3) nous sommes entrés dans une phase de ralentissement de la croissance économique mondiale, qui s'accompagne de crises structurelles graves et pose des problèmes de plus en plus aigus en matière de division internationale du travail.

Depuis quelques années, les efforts pour trouver des solutions nationales s'intensifient. Certains pays industrialisés, contraints d'envisager des taux de croissance beaucoup plus modestes, et, par la hausse des prix d'économiser l'énergie, semblent relativement bien placés pour ne pas accroître, voire pour réduire à terme, leur dépendance à l'égard de sources d'approvisionnement incertaines. D'autres pays, principalement du tiers-monde, comptent sur un renforcement de la prospection dans leur sous-sol encore inexploré et sur le recours accru aux technologies nouvelles, qui permettront de mettre en valeur des ressources énergétiques jusqu'alors inaccessibles, d'un point de vue tant économique que technique. C'est le cas principalement de la biomasse, de l'énergie hydraulique et du solaire, grâce auxquelles les populations rurales des pays en déve-

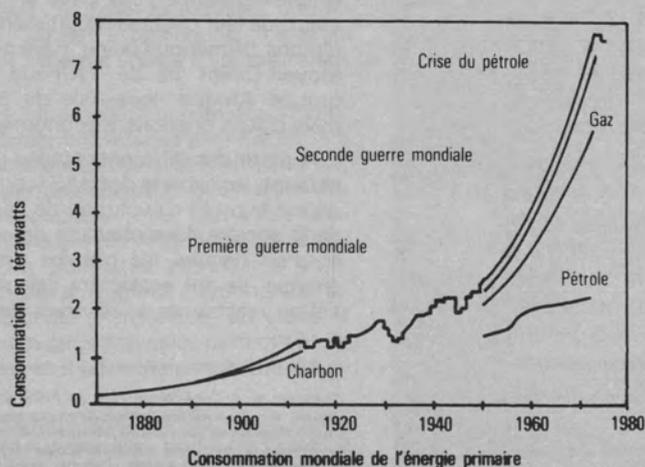
loppement s'efforcent de couvrir, par des techniques traditionnelles actuellement peu efficaces, leurs besoins en énergie.

Quant à savoir si ces efforts dispersés suffiront, au bout du compte, à résoudre le problème de l'énergie, c'est une autre question. Il n'est pas douteux que de nombreux pays vont rester longtemps tributaires de l'étranger. C'est probablement là un des points faibles de toute politique énergétique nationale, mais nullement le plus significatif. L'énergie a été et demeure un facteur déterminant du développement industriel. Si l'énergie reste trop rare et trop chère pour ceux qui en ont besoin, le problème des approvisionnements — même dans l'hypothèse où ceux-ci pourraient être répartis équitablement entre les demandeurs sur les marchés libres — fera forcément obstacle au développement et, dans un monde bâti sur la division internationale du travail, cela serait néfaste pour l'économie de tous les pays. Cette déduction s'appuie sur de nombreux indices. Aussi toute appréciation des efforts déployés à l'échelon national ou local en matière d'énergie doit-elle se situer dans une perspective globale prenant en compte l'avenir.

L'histoire nous montre qu'il faut de nombreuses décennies pour passer d'une source d'énergie à une autre. Ainsi, le remplacement du bois par le charbon, puis du charbon par le pétrole et le gaz a-t-il demandé plus d'un demi-siècle. Ces mutations se sont opérées dans des conditions favorables : croissance économique rapide et diminution constante des prix de revient des nouvelles formes d'énergie.

A l'avenir, le simple maintien d'un approvisionnement suffisant sera, à bien des égards, plus difficile. Tout d'abord, la population mondiale progresse actuellement à un

Le grand intérêt porté aux questions d'énergie vient de ce que le pétrole et le gaz, sources d'énergie les plus importantes actuellement, ne sont pas renouvelables. Le diagramme ci-dessous résume l'histoire de la consommation d'énergie dans les cent dernières années. La consommation totale a augmenté en moyenne de 5 % par an, excepté au moment des grandes crises : guerres mondiales, récession des années 30, crise pétrolière actuelle. On notera que cette forte croissance, alimentée autour de 1900 par le charbon, l'a été dans les deux dernières décennies essentiellement par le pétrole et le gaz. Ces derniers fournissent aujourd'hui 73 % de l'énergie primaire consommée dans le monde.



Graphique © IIASA, Laxenburg

**WOLFGANG SASSIN**, de la République fédérale d'Allemagne, a été récemment nommé directeur adjoint du Programme des systèmes énergétiques de l'Institut international pour l'analyse des systèmes appliquée (IIASA) de Laxenburg (Autriche). Physicien de formation, il participe à ce programme depuis 1975.

L'IIASA est un organisme non gouvernemental de recherche pluridisciplinaire créé en 1972 par les académies des sciences et les organisations scientifiques équivalentes de 12 pays. Son but est de regrouper des scientifiques du monde entier pour qu'ils travaillent ensemble à des problèmes d'intérêt général, en particulier ceux qui résultent du développement scientifique et technologique. L'Institut compte actuellement parmi ses membres 17 organisations nationales en : Autriche, Bulgarie, Canada, Tchécoslovaquie, Etats-Unis, Finlande, France, Hongrie, Italie, Japon, Pays-Bas, Pologne, Royaume-Uni, République démocratique allemande, République fédérale d'Allemagne, Suède et Union soviétique.

rythme sans précédent : depuis la première crise pétrolière, quelque 400 millions d'êtres humains ont vu le jour sur notre planète, et leurs besoins matériels vont bientôt être perceptibles. Même dans l'hypothèse d'une très forte réduction du nombre moyen d'enfants par famille, la population du globe va presque doubler en cinquante ans. Etant donné la proportion des enfants et des jeunes qui atteignent l'âge de procréer, il est d'ores et

déjà certain que l'accroissement démographique sera beaucoup plus important dans les pays du tiers-monde qu'ailleurs. L'intégration de ces nouvelles générations dans l'économie entraînera, par une réaction en chaîne, une explosion des besoins matériels au cours des vingt prochaines années. Or, la mise en place des infrastructures nécessaires demande des investissements à très forte intensité d'énergie, de sorte que même si

l'on peut compter sur des meilleures installations techniques à haut rendement énergétique et sur une baisse du taux de croissance économique par habitant, il faudrait que l'offre d'énergie augmente très sensiblement dans les prochaines décennies.

Cette perspective montre que le fait de n'avoir pratiquement pas développé, ces dernières années, le potentiel mondial d'approvisionnement en énergie, a été une erreur, même si certains pays, essentiellement les pays industrialisés riches, adoptent maintenant des mesures de conservation de l'énergie. Cette stagnation a des causes multiples. Les pays pétroliers traditionnels, insistant sur le caractère limité de leurs réserves, ont mis un frein à leur production ; ailleurs, les capacités de production ont diminué ; malgré la hausse du pétrole et du gaz autour de 1973/74, la part du charbon n'a pas progressé de façon sensible ; les programmes électronucléaires, depuis une dizaine d'années, ont presque tous pris d'importants retards ; enfin, même l'approvisionnement en bois de chauffage se heurte, dans beaucoup de pays en développement démunis, à des contraintes matérielles : certaines parties du tiers-monde connaissent, en matière d'approvisionnement non commercial en énergie, une crise dans ce secteur.

L'Institut international pour l'analyse des systèmes appliquée (IIASA) de Laxenburg (Autriche) a réalisé, à partir des éléments précédents, une étude approfondie qui porte sur les possibilités de développement, à l'échelle mondiale, des différentes sources d'énergie et sur l'équilibre à long terme entre l'offre et la demande d'énergie (1). L'idée était d'aborder ces problèmes sous l'angle mondial, en dépassant l'échelon national, la somme des possibilités, pour chaque pays, d'équilibrer son bilan énergétique par des importations, devant trouver une contrepartie dans des excédents à exporter ailleurs. Une telle méthode suppose que l'on s'en tienne aux facteurs déterminants pour le système "global". Elle impose aussi des hypothèses simplificatrices sur le comportement des différents pays à l'intérieur de ce "système fini de l'économie mondiale". Le découpage du monde (plus de 160 pays) en sept régions a été une étape décisive. Les nations industrialisées, classées d'après leur régime économique et l'abondance de leurs réserves énergétiques, forment trois groupes : les pays à économie de marché d'Amérique du Nord, les pays à économie planifiée — Union soviétique et Europe orientale — et les pays de l'OCDE moins l'Amérique du Nord, c'est-à-dire l'Europe occidentale, le Japon, l'Australie et la Nouvelle-Zélande. Les pays en développement, de leur côté, se répartissent en quatre régions : Amérique latine, pays pétroliers du Moyen-Orient et de l'Afrique du Nord, groupe Afrique noire-Asie du Sud-Est, et pays d'Asie orientale à économie planifiée.

A partir des différents stades de développement, les experts de l'IIASA ont essayé de définir le profil d'évolution de l'économie et de la société dans chacune de ces régions, et d'en déduire les besoins probables en énergie. Ils ont également calculé le potentiel en ressources et réserves de combusti-

## Les métamorphoses de l'énergie

**Q**UAND on parle d'énergie, on ne précise pas toujours de quelles sortes d'énergie il s'agit. Cela ne simplifie pas le problème. Il est donc important, pour comprendre ce qu'est ce système dans le monde, d'en bien distinguer les différents stades, jusqu'à celui de l'utilisation.

L'énergie primaire est l'énergie tirée de la nature : l'eau qui franchit un barrage, le charbon à la sortie de la mine, le pétrole, le gaz naturel, l'uranium naturel. L'énergie primaire ne peut que très rarement fournir de l'énergie finale — celle que l'on livre au consommateur. Le gaz naturel est une des rares formes d'énergie à pouvoir être utilisée comme énergie finale, ce qui en fait un combustible privilégié chaque fois qu'il est disponible.

L'énergie primaire est généralement transformée en énergie secondaire. Celle-ci se définit par les multiples applications qu'elle peut avoir : l'électricité et l'essence en sont les principaux exemples. Des formes d'énergie moins utiles (c'est pourquoi leur part dans le marché diminue) comprennent le charbon de bois, le charbon trié et classé, le bois à brûler coupé et fendu. Pour ne pas trop demander au consommateur, il faut convertir l'énergie de façon à pouvoir aisément la transporter, la distribuer et l'utiliser de diverses manières. On s'est orienté vers des réseaux, pour des raisons évidentes : en particulier les réseaux d'électricité, de gaz et de chauffage de secteur. Les commodités de stockage et de transport ont conduit à s'orienter aussi vers les combustibles liquides. L'essence et le gaz-oil en sont les meilleurs exemples.

Il y a plusieurs façons de transformer l'énergie primaire en énergie secondaire. Par exemple, les centrales électriques produisent de l'électricité, et parfois de la chaleur pour le secteur. Les raffineries transforment le pétrole en combustibles liquides plus adaptés : essence, carburant pour les avions à réaction, gaz-oil ou naphte. Parfois l'usine de conversion est le point terminal d'un réseau. Ainsi pour l'énergie nucléaire : la conversion chimique, l'enrichissement isotopique et la fabrication du combustible y précèdent tous la centrale elle-même. Parfois la conversion ne demande que des machines simples : c'est le cas pour les centrales hydro-électriques ou les éoliennes. De toute façon, il y a des pertes par conversion au cours de la transformation de l'énergie primaire en énergie secondaire ; et des pertes par transmission lorsqu'on envoie cette énergie au consommateur. Il ne faudrait pas voir ces pertes comme de simples déchets : elles représentent une autre forme d'efficacité. C'est cette utilisation d'énergie pour transformer et transmettre de l'énergie qui permet au consommateur une utilisation finale efficace.

A la fin viennent donc la transformation de l'énergie secondaire en énergie finale — l'énergie fournie à un moteur, un poêle, un ordinateur, ou à une ampoule électrique — et de l'énergie finale en énergie utile : celle qui se trouve réellement dans un objet, celle qui est concrètement utilisée. Comprendons-le : en fournissant son service — une pièce bien éclairée, par exemple — l'énergie est davantage qu'un produit à consommer. Elle améliore en effet l'usage des autres ressources. Elle est une "valeur ajoutée" au travail, au capital, et surtout aux compétences.

Source : *Energy in a Finite World*, 1981, Institut international pour l'étude des systèmes appliqués. Laxenburg, Autriche

(1) *Energy in a Finite World (Vol. 1: Paths to a Sustainable Future; Vol. 2: A Global System Analysis)*, rapport du Groupe pour le Programme des systèmes énergétiques de l'Institut international pour l'analyse des systèmes appliqués (IIASA) ; directeur du Programme : Wolf Hafele. Ballinger Publishing Company, Cambridge, Massachusetts.

	Consommation individuelle exprimée en thermies par jour	Alimentation	Domestique et tertiaire (1)	Industrie et agriculture	Transport	Total
	Homme primitif	2				2
	Chasseur	3	2			5
	Agriculteur primitif	4	4	4		12
	Agriculteur évolué	6	12	7	1	26
	Homme "industriel"	7	32	24	14	77
	Homme "technologique"	10	66	91	63	230

(1) Le secteur tertiaire comprend notamment les activités de bureau (bureaux d'études, assurances, administrations), le commerce, l'enseignement, les services.

Dessins Jacques Vincent. Le Courrier de l'Unesco

bles fossiles, la date et les rythmes maximaux de mise en valeur de sources d'énergies nouvelles et renouvelables. Ces estimations s'appuient, dans chaque cas, sur des hypothèses quant aux succès futurs des projets de prospection, de recherche et de développement. En additionnant les chiffres relatifs à tous les pays et régions du monde, on obtient le potentiel global en ressources éventuellement récupérables, ce qui permet de quantifier les efforts à déployer au cours des prochaines décennies pour réussir. Compte tenu des moyens techniques existants et des coûts actuels de production de l'énergie, seul un tiers environ des ressources fossiles éventuellement récupérables est accessible.

Des calculs approximatifs montrent déjà que certaines des sept régions ne seront pas en mesure de satisfaire elles-mêmes leurs besoins énergétiques, car leurs ressources classiques épuisables — telles que pétrole, gaz naturel, charbon économiquement exploitable — sont trop modestes, et elles n'auront pas le temps de mettre assez vite en valeur des sources d'énergie nouvelles ou renouvelables, comme les schistes bitumineux, les sables asphaltiques, l'énergie nucléaire et l'énergie solaire sous toutes ses formes.

On est donc amené à penser que l'hypothèse fondamentale retenue par l'IIASA — à savoir le libre accès aux réserves d'énergie, le critère principal étant la couverture des coûts de production — est tout à fait justifiée. Hormis quelques limitations en ce qui concerne les gisements pétrolifères traditionnels, toutes les régions du monde partagent les réserves énergétiques du globe et ont des techniques nouvelles permettant de les exploiter et d'en transformer la production.

Malgré cette hypothèse optimiste d'une coopération universelle pour résoudre le problème de l'énergie, des analyses plus pré-

cises montrent que l'énergie restera, au cours des cinquante prochaines années, une contrainte pesant sur le développement économique du monde.

Les besoins en énergie sont tels que la question du choix, en définitive, ne se pose pas : toutes les sources doivent être mises en valeur. Les consommateurs, de leur côté, doivent aussi veiller à utiliser plus rationnellement l'énergie. C'est la relation inhabituelle et inquiétante entre l'importance pré-

visible des efforts qu'il conviendra de déployer pour obtenir de l'énergie et les perspectives limitées de croissance économique qui a conduit les auteurs de l'étude à élaborer, à côté d'un scénario initial de croissance "forte", un scénario de croissance "faible". Si le premier révisait déjà en baisse les objectifs économiques admis jusqu'alors — surtout dans les pays en développement —, le second réduit substantiellement les besoins mondiaux en éner-

UTILISATION ACTUELLE MONDIALE ET EVALUATION FUTURE DE CHACUNE DES SOURCES D'ENERGIE NOUVELLES ET RENOUVELABLES		
Energie	Utilisation actuelle en milliards (10 <sup>9</sup> ) de kWh	Utilisation en l'an 2000 en milliards (10 <sup>9</sup> ) de kWh
Solaire	2-3	2 000-5 000
Géothermique	55	1 000-5 000
Eolienne	2	1 000-5 000
Marémotrice	0,4	30-60
Des vagues	0	10
Thermique des mers	0	1 000
Biomasse	550-700	2 000-5 000
Bois de chauffage	10 000-12 000	15 000-20 000
Charbon de bois	1 000	2 000-5 000
Tourbe	20	1 000
Animaux de trait	30 (en Inde)	1 000
Schistes bitumineux	15	500
Sables asphaltiques	130	1 000
Hydraulique	1 500	3 000

Source : Forum du Développement, Nations Unies, 1981

gie, du fait qu'il table sur un recul marqué de la croissance.

Aucune étude, aussi complète soit-elle, ne peut prédire l'avenir. Des analyses sérieuses peuvent toutefois nous éclairer sur la nature des décisions à prendre pour l'avenir politique et pour celui de la société. Le choix qui sera fait dépendra dans une large mesure du système de valeur dominant, mais il sera également influencé par la quantité et la qualité des informations disponibles sur la situation réelle et sur les conséquences possibles de mesures déjà prises ou de la non-adoption d'autres mesures. En ce sens, les scénarios "fort" et "faible" de l'IIASA décrivent des évolutions futures qui, au départ, sont possibles. Ils donnent une idée des limites supérieures du processus de développement économique global. Ces limites sont déterminées par les ressources énergétiques naturelles de la planète et par l'état actuel des technologies permettant de les récupérer. Deux grandes conclusions peuvent être tirées.

Dans les deux scénarios, d'une part, la mise en place à l'échelle mondiale d'un système d'approvisionnement en énergie demande des efforts importants, mais qui restent, si l'on en croit les projections de l'activité économique des régions considérées, dans des limites raisonnables. En termes d'investissements, ils représenteront une charge à peu près équivalente. Autrement dit, il est techniquement possible de rendre disponible une quantité suffisante d'énergie pour entretenir des taux de croissance économiques élevés, étant entendu que les conditions préalables doivent être remplies assez tôt. Une croissance faible n'aide en rien à résoudre le problème de l'énergie.

D'autre part, si la mise en place des capacités d'approvisionnement nécessaires ne bénéficie pas d'une coopération suffisante, les dépenses globales ne peuvent que dépasser le montant prévu par les scénarios de l'IIASA. Les efforts, compréhensibles du point de vue national, que déploie chaque pays pour faire durer ses réserves énergétiques rentables et valoriser celles qui sont inexploitées, ou encore conserver pour l'avenir une marge de sécurité, conduisent au total à une aggravation du problème global. D'autres pays sont par là même contraints de se tourner plus rapidement vers des énergies de substitution moins abondantes et plus coûteuses. Dans les faits, les difficultés politiques, sociales et institutionnelles imposeront toujours le recours à de telles stratégies pragmatiques. Il faudrait cependant éviter d'entrer dans ce cycle infernal : la mobilisation accélérée, en n'importe quel point du globe, de sources d'énergie de substitution encore insuffisamment développées, risque de venir renforcer les thèses préconisant des solutions nationales et locales. Autre écueil à éviter, une énergie trop chère risque de favoriser la stagnation économique. Le développement des sources de substitution demande plus de capital et de main d'œuvre que l'exploitation traditionnelle du pétrole et du gaz. Le passage à des énergies nouvelles plus chères ne ferait que grever davantage une économie déjà stagnante.

La relève du défi énergétique prend de plus en plus la forme d'une course contre la montre. Pour la gagner, les prouesses techniques et scientifiques ne suffisent pas. Il faut d'abord utiliser avec efficacité les ressources existantes, tirer parti des possibilités offertes par les technologies de pointe et

faire bon usage des sommes considérables nécessaires à l'exploitation du potentiel théoriquement récupérable. Cela suppose une étroite coopération politique et économique entre pays producteurs et pays consommateurs d'énergie. En outre, chaque nation doit prendre conscience que la garantie d'un approvisionnement stable demandera plus d'efforts que ne l'indiquent les analyses à court terme des situations locales. Mais même si ces conditions sont remplies, la contrepartie obtenue — la stabilité — ne sera pas un bien consommable. On doit plutôt voir dans la hausse des coûts requise pour accroître le volume des investissements énergétiques à caractère stabilisateur, une charge financière à partager à l'échelle du monde.

Mais en la matière, la volonté politique, si elle est nécessaire, n'est pas suffisante : il faut aussi, des aménagements techniques et institutionnels pour répartir cette charge. Au niveau international, les études de l'IIASA mettent en évidence trois domaines critiques, qui ont en commun les caractéristiques suivantes : un déséquilibre qui s'accroît de plus en plus vite entre l'augmentation des besoins énergétiques et les possibilités d'approvisionnement ; un manque très net d'information sur les facteurs de nature à empêcher ou au contraire à favoriser la découverte de nouvelles solutions techniques ; et l'insuffisance des efforts consacrés à ces solutions techniques.

Ces trois domaines, d'une importance stratégique pour la stabilisation du système énergétique mondial, sont :

- le développement de processus et procédés appropriés qui doivent déboucher, d'ici à trente ans, sur une industrie, opérationnelle à l'échelle mondiale, d'hydrocarbures liquides de synthèse. Etant donné la part que devront représenter les combustibles synthétiques dans le bilan énergétique mondial, il faudrait des programmes de production dépassant l'ensemble des programmes nucléo-énergétiques de ces trente dernières années.

- l'approvisionnement en énergie des zones urbaines à croissance rapide des pays en développement — La forte consommation d'énergie demande des installations de transformation et de distribution à haut rendement, que le potentiel des sources renouvelables situées à proximité ne suffit en général pas à alimenter. Ces zones urbaines en développement, tout comme les pays industrialisés dépourvus de ressources, sont tributaires de l'existence d'un système énergétique international opérationnel.

- l'interaction entre une mobilisation du potentiel en sources d'énergies renouvelables dans les zones rurales des pays en développement et les systèmes climatiques et écologiques. Considérées sous l'angle du rendement énergétique, les sources renouvelables, telles la biomasse, l'énergie hydraulique, l'énergie éolienne et l'énergie des mers ont, dans bien des cas, sur les systèmes naturels, des effets d'une ampleur supérieure à ceux des sources d'énergie fossile. Pour préserver une utilisation responsable des terres dans les régions habitables du globe, il faut analyser les résultats d'activités comme l'agriculture extensive, la transformation croissante des conditions hydrologiques et l'utilisation des sources d'énergies renouvelables "naturelles", et en étudier les conséquences climatiques et écologiques. A ce propos, il est urgent d'établir un état mondial de l'écologie des régions naturelles non altérées, afin de prévenir les atteintes futures à l'environnement et leurs répercussions.

Des efforts internationaux résolus, s'attaquant aux problèmes qui viennent d'être évoqués — et dont la liste est loin d'être exhaustive — feraient mieux prendre conscience que le problème de l'énergie est un défi lancé à tous les pays de la planète. Une telle sensibilisation apparaît comme un préalable indispensable aux compromis politiques qui s'imposeront si l'on veut aboutir à des mesures constructives, et non se contenter de gérer des ressources classiques qui vont s'amenuisant.

Wolfgang Sassin

### Deux scénarios de l'offre d'énergie primaire mondiale, 1975-2030 (en terawatt-année par année)

Sources primaires (1)	SCENARIO DE CROISSANCE FORTE		SCENARIO DE CROISSANCE FAIBLE		
	1975	2000	2030	2000	2030
PETROLE	3,62	5,89	6,83	4,75	5,02
GAZ	1,51	3,11	5,97	2,53	3,47
CHARBON	2,26	4,95	11,98	3,93	6,45
LWR*	0,12	1,70	3,21	1,27	1,89
EBR**	0,00	0,04	4,88	0,02	3,28
EN. HYDRAUL.	0,50	0,83	1,46	0,83	1,46
EN. SOLAIRE	0,00	0,10	0,49	0,09	0,30
AUTRE	0,21	0,22	0,81	0,17	0,52
<b>TOTAL (2)</b>	<b>8,21</b>	<b>16,84</b>	<b>35,65</b>	<b>13,59</b>	<b>22,39</b>

\* Réacteur à eau ordinaire.

\*\* Réacteur sursurgénérateur rapide.

1. Production de combustibles primaires ou déjà soumis à des processus de transformation ou de raffinage.
2. Les totaux des colonnes peuvent être inexacts car les chiffres ont été arrondis.

Tableau W Sassin



Photo © Wetmore-S.P.L. Cosmos, Paris

---

## Le monde pourra-t-il payer la note ?

---

Le monde a-t-il la capacité productive et les institutions, le capital financier et les ressources matérielles ainsi que la discipline nécessaire pour réussir à se doter d'un système d'énergie constamment renouvelable ? Que signifie le fait de lancer des programmes d'équipement énergétiques à l'échelle de la planète et de construire en même temps des usines produisant des millions de tonnes de béton et d'acier pour bâtir ces nouvelles et colossales installations ? Cela exigera à la fois du temps et des investissements, surtout de capitaux. Il faudra aussi surmonter des obstacles institutionnels de toute sorte et à tous les niveaux. Avant tout, cela demande une productivité mondiale nettement supérieure à celle d'aujourd'hui et un niveau bien plus élevé des échanges interrégionaux dans tous les domaines : travail, compétences, techniques, connaissances, énergie, biens, alimentation, etc.

Quant aux investissements de capitaux que cela représente, il suffit, pour en avoir une idée, de savoir que même le scénario d'une "croissance faible", de l'IIASA, prévoit, pour répondre aux besoins d'énergie entre 1975 et 2030, une augmentation, de 20 à 30 fois environ, de la réserve mondiale de capitaux. C'est

pourquoi il est si important que les 8 milliards environ d'habitants qui vivront sur la Terre en 2030, loin d'être pauvres, soient au contraire encore plus riches qu'aujourd'hui. Cette richesse ne signifie pas qu'ils auront soudain découvert un trésor de ressources matérielles jusqu'alors complètement ignoré, mais qu'ils auront appris à utiliser de façon plus efficace, plus habile et plus productive, les ressources limitées déjà existantes. Ce processus est continu et cumulatif.

Plus notre productivité sera forte — c'est-à-dire plus l'usage que nous ferons de nos ressources actuelles en énergie, travail, capitaux et connaissances, sera avisé — et plus nous serons en mesure de faire en sorte que la possibilité d'un système d'énergie constamment renouvelable devienne une réalité. Parvenir à ce résultat signifie franchir une nouvelle étape : dissocier l'approvisionnement des ressources d'énergie mondiale du problème des ressources tout court. Etape sans doute comparable à celle franchie par nos lointains ancêtres lorsqu'ils sont entrés dans l'ère de l'agriculture domestique. Tel est le défi des temps modernes et nous sommes capables de le relever.

Source : *Energy in a Finite World*, 1981, IIASA, Laxenburg

# Indépendance et développement : le gisement solaire

par Abdou Moumouni Dioffo

**L**ES pays en développement d'Afrique, d'Asie et d'Amérique du Sud sont favorisés, dans l'ensemble, en ce qui concerne les ressources énergétiques renouvelables — énergie solaire, énergie éolienne, énergie du gradient thermique des mers tropicales, énergie de photosynthèse des forêts tropicales. C'est là un atout important qui peut permettre, dans l'avenir, la mise en œuvre d'une politique énergétique globale garantissant l'indépendance de ces pays dans le cadre d'une complémentarité bien comprise.

Mais l'utilisation de l'énergie solaire dans les zones favorables suppose des choix technologiques dont il importe de bien mesurer au préalable les répercussions, directes ou indirectes, dans de multiples domaines de la vie nationale : économie, répartition démographique, aménagement du territoire, choix d'un modèle de développement industriel pouvant infléchir, à la longue, le développement socio-culturel même de la nation.

Qu'il s'agisse des applications thermiques de l'énergie solaire, ou de la production

d'énergie mécanique ou électrique, le choix de tel ou tel type d'installations, considérées comme les plus susceptibles d'induire le progrès économique, social et culturel, a tout d'abord des implications économiques évidentes. Selon que les installations solaires sont importées ou produites localement en tout ou partie, les effets sur l'économie du pays varient : dépenses de devises ; dépendance économique vis-à-vis des pays fournisseurs ; impuissance face aux coûts des investissements ; incertitude quant à la rentabilité de l'équipement dans les conditions locales d'utilisation.

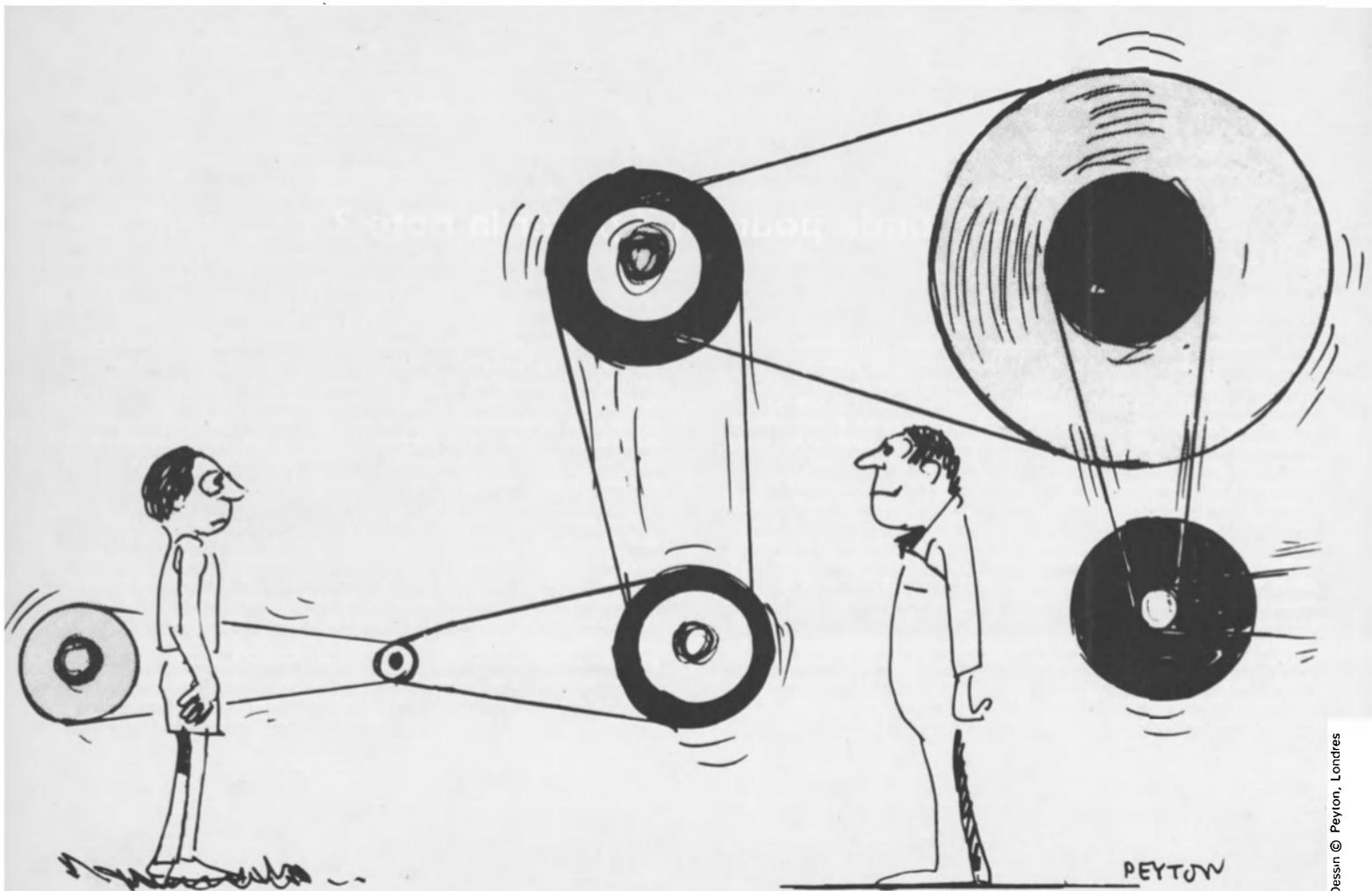
Les implications démographiques sont, en règle générale, difficilement perçues au départ. Pourtant, si les installations solaires des zones rurales (exhaure de l'eau, mouture du grain, fourniture d'électricité pour l'éclairage et les équipements socio-culturels, etc.) sont centralisées, on peut s'attendre à une concentration de population autour des points équipés. Le risque est d'aboutir, à travers une option technologique réputée neutre, à une société centralisée, sur le modèle de celle des pays industrialisés, avec toutes

les conséquences socio-culturelles qui en découlent.

De même, l'adoption d'une technologie basée sur les installations solaires de grande puissance (100 kW à plusieurs MW) ne peut que déboucher sur une autre forme de concentration : celle des activités économiques et industrielles qui se regrouperont autour des localités équipées d'installations productrices d'énergie. Le type de société qui s'instaurera alors risque fort d'être une copie de la "société de consommation", avec des valeurs éthiques tout à fait étrangères à la culture nationale et présentant une menace réelle pour l'identité culturelle des peuples des pays en développement.

Enfin, au plan de l'aménagement du territoire, tout un ensemble de facteurs doivent être pris en considération pour assurer le développement équilibré de tous les sec-

**ABDOU MOUMOUNI DIOFFO**, physicien du Niger, a été directeur de l'Office de l'énergie solaire (ONERSOL) de son pays depuis 1969. L'année dernière, il a été nommé recteur de l'université de Niamey (Niger).





Un distillateur solaire portable conçu et fabriqué par l'Office de l'énergie solaire (ONERSOL) de Niamey, au Niger. Les petits distillateurs solaires, d'une capacité inférieure à 200 000 litres d'eau par jour, ont un rôle important à jouer dans diverses régions de l'Afrique de l'ouest, comme la zone littorale de la Mauritanie, le nord du Mali et du Niger où l'eau disponible est saumâtre. Cependant, il est peu probable, actuellement, que des appareils solaires de dessalinisation, pour de plus gros besoins, puissent rivaliser avec ceux utilisant des combustibles traditionnels.

Photo Stambolis © Unesco Extrait de *Solar Energy for educational buildings*, étude faite sous les auspices de l'Unesco/Unicef, Helio-technic Press, Londres

teurs de l'économie (agriculture, élevage, industries agro-alimentaires, industrie des matériaux de construction) ; l'exploitation rationnelle des ressources naturelles dans le respect de l'environnement (limitation et suppression des surpaturages, de la dégradation des terres arables, de la destruction du couvert végétal), et la répartition géographique rationnelle des différentes industries.

Plus encore que le type de procédé technique ou même que la taille des installations, c'est donc le modèle de développement technologique global qui devra être pris en compte par les autorités chargées de définir une stratégie et une politique nationale tendant à donner sa place à l'énergie solaire dans la gamme des sources d'énergie disponibles à l'échelle du pays. L'enjeu est considérable, puisque l'option technologique retenue peut perpétuer la dépendance des pays en développement, maintenus dans la position de consommateurs d'une science et d'une technologie importées, ou, au contraire, favoriser un développement scientifique et technologique endogène. En particulier, la livraison "clefs en mains" d'installations solaires et le prétendu "transfert de technologie" dont on affuble ce genre d'opérations commerciales sont en réalité un piège dont il faut bien prendre conscience si l'on veut que les décisions soient prises en fonction des priorités du développement national et non d'impératifs commerciaux étrangers aux véritables intérêts de la population.

Les pays en développement d'Afrique, d'Asie et d'Amérique Latine bénéficient de conditions naturelles favorables à l'utilisation de l'énergie solaire mais n'ont pas toujours, en raison de leur retard scientifique et technologique, de techniques propres en matière d'installations solaires. Défavorisés quant aux conditions climatiques, les pays industrialisés, en revanche, disposent des bases industrielles nécessaires à la mise au point d'installations solaires. C'est donc d'une coopération authentique entre les uns et les autres que dépend l'utilisation efficace de l'énergie solaire au profit des millions d'habitants des zones rurales du monde en développement. Cette coopération doit s'étendre aussi bien au domaine de la

recherche scientifique et technologique qu'à celui de la production industrielle.

Dans le monde en développement, le niveau et les orientations de la recherche sur l'énergie solaire varient considérablement d'un pays à l'autre. Malgré l'intérêt porté à ce domaine, l'activité des institutions de recherche plafonne souvent faute de moyens humains et financiers. L'isolement des chercheurs jouant par surcroît, les conditions sont réunies pour la "prise en charge" des institutions nationales par des organismes ou firmes étrangères sous couvert d'assistance technique ou de coopération bilatérale. La seule solution effective réside dans une intensification de la coopération scientifique et technologique entre pays en développement d'une même région, ou même de régions différentes. Alors et alors seulement, la question d'une coopération entre pays en développement et pays industrialisés peut être abordée sur des bases saines tenant compte des intérêts de chacun.

C'est seulement après la "crise du pétrole" qu'un grand nombre de pays industrialisés ont lancé d'importants programmes de recherche sur l'énergie solaire. Ceux-ci, pour la plupart, ne visent pour l'instant que des objectifs très limités (énergie d'appoint pour le chauffage domestique et industriel, production d'électricité d'appoint, par exemple). En fait, leur but plus ou moins avoué est de trouver des solutions de remplacements énergétiques à long terme en raison de l'épuisement des réserves mondiales de pétrole et, à court terme, de mettre à profit le marché que représentent les pays en développement pour mettre au point des installations solaires dans des conditions économiques très lucratives. En effet, le financement de la recherche et de la production industrielle serait, dans ces conditions, pratiquement assuré (sinon subventionné) par les pays en développement eux-mêmes.

Aussi est-ce à un changement radical d'approche qu'il faudra procéder pour instaurer une coopération scientifique et technologique véritable entre les deux groupes de pays. Il en va de l'intérêt des uns comme des autres, car l'acuité des problèmes mondiaux d'énergie, le rôle de l'énergie solaire

dans l'avenir plus ou moins lointain, ses possibilités à court et à moyen termes dans de nombreux pays en développement, constituent autant de raisons d'aborder sérieusement les problèmes qui se posent.

La coopération industrielle entre pays industrialisés et pays en développement pour la production d'installations solaires soulève également des problèmes nombreux et complexes, à l'image de la situation actuelle de l'économie mondiale. Celle-ci, on le sait, correspond à une division internationale du travail qui relègue les pays en développement dans le rôle de producteurs de matières premières agricoles et minières et engendre, sur le plan du commerce international, un échange inégal perpétuant la dépendance économique des pays en développement à l'égard des pays industrialisés ; c'est ainsi que les différentes industries de base en matière d'utilisation de l'énergie solaire sont, à l'heure actuelle, le quasi-monopole des pays développés : métallurgie du fer et des métaux ferreux, de l'aluminium, du cuivre et autres métaux non ferreux ; verrerie et matières plastiques transparentes ; isolation thermique d'origine minérale ou organique. Pourtant, les matières premières correspondantes proviennent principalement des pays en développement ou y sont même abondantes. Dans la plupart des cas, elles subissent déjà un traitement partiel avant leur exportation vers les pays industrialisés (alumine de Guinée et du Ghana traitée sur place et au Cameroun ; cuivre du Zaïre, de la Zambie ; produits pétroliers du Nigéria, d'Algérie et du Moyen-Orient).

Pour renforcer l'auto-suffisance du monde en développement, l'implantation des industries de produits finis et semi-finis correspondants doit être envisagée dans les nombreux pays producteurs de matières premières, à condition qu'une coopération industrielle s'instaure à l'échelle mondiale, dans l'intérêt bien compris de tous. Dans les conditions actuelles de crise énergétique, l'utilisation du potentiel hydroélectrique sous-exploité des pays d'Afrique, d'Asie et d'Amérique latine offre en effet une solution idéale pour le traitement complet de nombreux minerais exploités dans ces régions.

La base serait alors toute trouvée pour le développement d'industries légères indispensables à la production des différents composants d'installations solaires (constructions métalliques et mécaniques, mécanique de précision, composants électroniques, etc.), la complémentarité des industries nationales garantissant leur essor commun.

La nouvelle division internationale du travail qui découlerait d'une telle orientation bénéficierait à l'économie mondiale tout entière et permettrait, en abaissant sensiblement les prix de production de transport et de revient, d'intensifier et d'accélérer l'utilisation de l'énergie solaire, dans la mesure où les installations pourraient être construites sur leur lieu d'exploitation. Les conséquences prévisibles, sous l'angle de la nouvelle structure de la consommation d'énergie à l'échelle mondiale, devraient en principe contribuer à l'adoption unanime d'un tel ensemble de mesures.

**Abdou Moumouni Dioffo**



Photo Stambolis © Unesco. Extrait de *Solar Energy for educational buildings*, étude faite sous les auspices de l'Unesco/Umicef, Heiotechne Press, Londres

Ci-dessus, un panneau de cellules photovoltaïques, installé dans la cour d'une école du Niger, fait fonctionner le récepteur de télévision éducative. A droite, la tour Maine-Montparnasse, dans le centre de Paris.

Photo Andanson © Sygma, Paris



# Inventaire mondial de l'énergie



L'éclair, par Roy Lichtenstein.

Photo © Sotheby Parke-Bernet and Co., Londres

par Zoran Zarić

**L**ES quatre milliards et demi d'êtres humains que compte notre planète utilisent quelque 10 000 000 000 000 de watts d'énergie, soit 2,2 kilowatts par personne (un simple radiateur électrique en consomme, a-t-on calculé, 1 kW).

Pour comprendre le problème de l'énergie, il est important de faire d'abord une distinction entre la puissance et l'énergie. Techniquement, la puissance est le rythme auquel un travail est accompli ou une énergie utilisée. Un radiateur électrique de 1 kW consomme de l'énergie au rythme de 1 kilowatt-heure, soit 24 kWh par jour :  $24 \times 365 = 8\,760$  kWh par an. Le taux moyen de l'énergie utilisée sur la planète est donc de 19 272 kWh par habitant, l'équivalent d'une consommation permanente de 2,2 kW.

Si l'on parle de la consommation globale de l'énergie, les chiffres en watts ou même en kilowatts ont tendance à devenir très importants. Aussi les scientifiques emploient-ils le système suivant d'abréviation :

1 kilowatt (kW) = 1 000 ou  $10^3$  watts

1 Mégawatt (MW) = 1 000 000 ou  $10^6$  watts

1 Gigawatt (GW) = 1 000 000 000 ou  $10^9$  watts

1 Térawatt (TW) = 1 000 000 000 000 ou  $10^{12}$  watts.

La consommation totale d'énergie dans le monde est actuellement de 10 Térawatts (TW). Les mêmes préfixes peuvent s'appliquer à d'autres unités que les watts : ainsi 1 Gigatonne (GT) représente 1 000 000 000 de tonnes. Si l'énergie électrique se mesure habituellement en watts, certains combustibles fossiles comme le charbon et le pétrole le sont plus commodément en tonnes. L'énergie contenue dans une tonne de charbon brut est de 8 139 kWh ; l'énergie d'une tonne de pétrole est de 11 964 kWh.

Bien que la consommation moyenne d'énergie par habitant soit de 2,2 kW, l'énergie n'est pas utilisée uniformément dans le monde. Si la consommation, aux États-Unis, s'élève à environ 10 kW par habitant, dans les autres pays industrialisés elle varie de 2 à 7 kW. Le reste du monde, soit les trois quarts de l'humanité, consomme moins de 2 kW, en moyenne quelque 450 watts. Près de 400 millions de personnes vivent en consommant moins de 100 watts. Autrement dit, la consommation d'énergie suit d'assez près l'ordre économique mondial.

Selon les prévisions les plus sûres, en l'an 2000 la population atteindra 6 milliards 700 millions d'habitants qui consommeront chacun en moyenne 3,06 kW, soit une consommation totale d'énergie de 20,5 TW, un peu plus du double de celle d'aujourd'hui. Cinquante ans plus tard, en 2050, la planète comptera 10 milliards 500 millions d'êtres humains consommant chacun en moyenne 5,28 kW, soit une consommation totale de 55,4 TW, cinq fois et demi celle d'aujourd'hui.

D'où proviendra toute cette énergie ?

**ZORAN ZARIĆ**, spécialiste yougoslave en thermodynamique, est membre de l'Académie serbe des sciences et des arts et président de l'Association yougoslave pour l'énergie solaire. Il a été pendant plusieurs années secrétaire général du International Centre for Heat and Mass Transfer, qui coopère étroitement avec l'Unesco dans le domaine de l'énergie.

Cet article s'inspire du manuscrit d'un livre de Zoran Zarić intitulé provisoirement *Energie pour l'avenir* et que l'Unesco publiera en 1982.

# Les combustibles fossiles



**L**ES combustibles fossiles sont de la matière végétale décomposée. Leur énergie provient de certaines liaisons chimiques et découle, à l'origine, de l'énergie solaire que les plantes ont fixée il y a des millions d'années grâce à la photosynthèse. Les combustibles fossiles se composent, en majeure partie, de carbone, associé à d'autres éléments. On estime à environ  $10^{16}$  tonnes (10 000 Gigatonnes) la quantité de carbone fossile qui se trouve sous les roches de la Terre. Malheureusement, seule une partie de celui-ci peut être exploité facilement et de façon économique. Il existe quatre sources principales de combustible fossile.

**Le charbon** : on le trouve le plus souvent au nord de l'équateur, notamment au nord du  $30^{\circ}$  degré de latitude nord. Environ 88 pour cent des réserves connues se trouvent en Union soviétique, aux Etats-Unis et en Chine. Il existe également d'importants gisements en Europe Centrale.

Jusqu'à présent, le monde a consommé environ 130 gigatonnes de charbon. Les ressources exploitables et connues en charbon s'élèvent à 600 gigatonnes (environ quatre fois plus que ce qui a déjà été utilisé). Toutefois, les prévisions pour l'avenir sont optimistes : la Terre renfermerait jusqu'à 10 000 gigatonnes de charbon, dont on pense pouvoir exploiter 2 500 gigatonnes.

Dans le monde entier, on utilise généralement par an 2,6 gigatonnes environ de charbon. En 1980, la consommation globale d'énergie produite à partir de l'ensemble des combustibles était égale à 10 GT environ d'équivalent en charbon — aussi le charbon couvre-t-il aujourd'hui 26 pour cent environ de nos besoins globaux en énergie. Il y a cinquante ans, il fournissait la quasi totalité de notre énergie et, il se peut qu'il fournisse bientôt une bien plus grande part de notre énergie qu'actuellement. On étudie maintenant les moyens de transformer le charbon en gaz naturel et en hydrocarbure liquide et de l'utiliser avec le maximum d'efficacité.

**Le pétrole** est sans nul doute le combustible fossile le plus utile, du fait, surtout, qu'il est facilement transportable. Plus de la moitié des réserves connues se trouvent au Moyen-Orient et, jusqu'à présent, le monde a consommé un tiers environ des réserves connues et exploitables. Certains pays comme les Etats-Unis ont déjà consommé autant de pétrole que ce qu'il en reste à notre connaissance.

D'une façon courante, nous utilisons, à l'heure actuelle, 3 GT environ de pétrole par an. Les réserves connues s'élèvent à 88,4 GT mais il se peut que l'on puisse, dans l'avenir, en exploiter jusqu'à 300 GT. Nous découvrons actuellement de nouvelles réserves à raison d'environ 5 GT par an, rythme plus rapide que celui de notre consommation du même produit. On estime cependant que le niveau maximum de production sera atteint aux environs de 1990 et qu'après cette date la production mondiale de pétrole (et, partant, la consommation) diminuera.

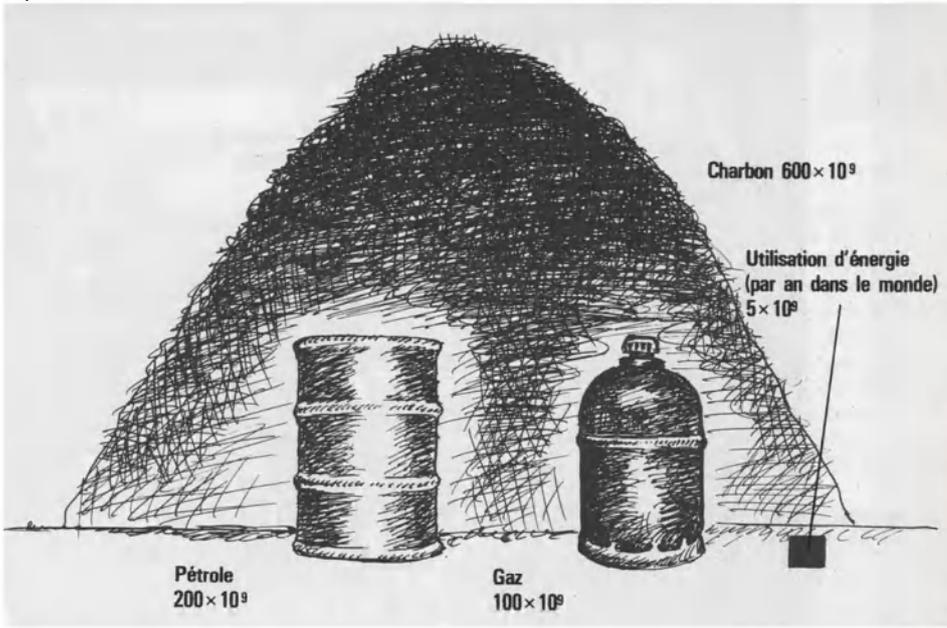
Il est probable que le *gaz naturel* connaîtra un avenir plus durable que le pétrole. Environ 40 pour cent des réserves connues se trouvent dans les pays de l'OPEP, et 30 pour cent en Union soviétique. En réalité, les Etats-Unis et l'URSS consomment à eux deux 70 pour cent de la production mondiale de gaz naturel.

Jusqu'à présent, nous avons consommé environ 40 pour cent des réserves connues. Toutefois, on estime que les ressources exploitables de gaz sont probablement aussi importantes que les ressources en pétrole. Etant donné que nous utilisons actuellement deux fois et demi plus de pétrole que de gaz naturel (une fois encore, en termes d'énergie), le gaz naturel durera beaucoup plus longtemps que le pétrole. On prévoit que la production mondiale atteindra son niveau maximum en 2010, époque à laquelle notre consommation de gaz naturel sera trois fois plus importante qu'aujourd'hui.

**Les schistes bitumineux et les sables asphaltiques** constituent une dernière source de combustibles fossiles. On trouve 70 pour cent des schistes en Amérique du Nord et 25 pour cent en Amérique latine ; la plupart des sables asphaltiques se trouvent au Canada, mais on en trouve également en Amérique du Sud, en Sibérie et au Nigéria. Les réserves sont très importantes — elles sont à peu près comparables aux réserves de gaz naturel — mais le problème est de trouver des moyens de les exploiter.

Ces deux types de gisement doivent être traités à la chaleur pour en extraire le combustible, et celui-ci doit être porté à très haute température de façon à le débarrasser de ses impuretés. Aussi obtient-on un produit coûteux. A titre d'exemple, pour chaque baril de pétrole extrait de schistes bitumineux, il faut traiter 1,7 tonnes de roches puis se débarrasser des déchets.

On estime toutefois que le combustible fossile trouvera son utilisation maximale en l'an 2010, date à laquelle nous en emploierons deux fois plus qu'aujourd'hui.



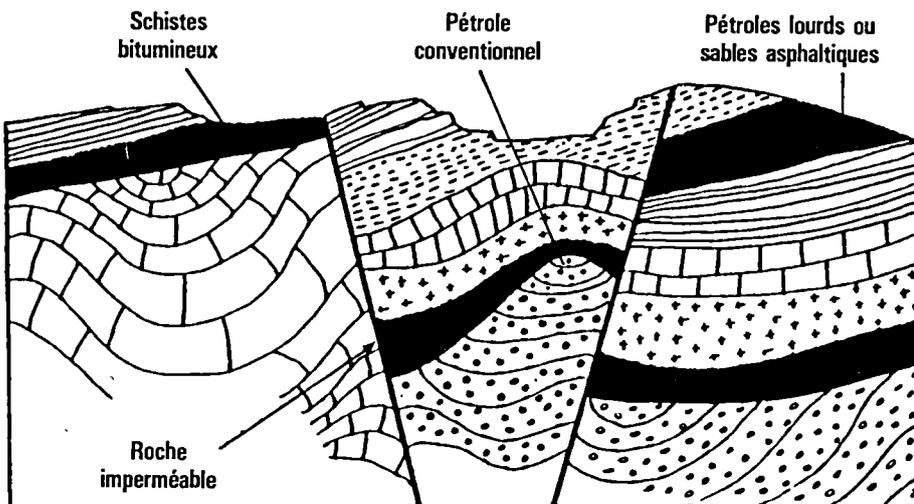
**Total des réserves connues 900×10<sup>9</sup>  
(ou 900 milliards) de tonnes d'équivalent charbon**

Le charbon n'est pas une source nouvelle ou renouvelable mais les réserves de charbon sont énormes en valeur absolue et dépassent de très loin celles de pétrole, de gaz et d'hydrocarbures d'exploitation récente : schistes bitumineux et sables asphaltiques. Normalement, dans un gisement pétrolier, les hydrocarbures bruts imprègnent les interstices des sables sous une couverture de roches imperméables. Lorsqu'on fore un trou à travers celles-ci, le pétrole jaillit, le poids des couches supérieures exerçant une pression sur la masse liquide inférieure. Il arrive cependant que le pétrole, loin d'être liquide, soit très visqueux ou encore qu'il soit enfermé dans des particules si fines qu'il ne peut s'écouler. Dans le premier cas, on parle de sables asphaltiques, dans le second de schistes bitumineux, expressions d'ailleurs l'une et l'autre imprécises.

Un coup d'œil aux réserves connues suffit pour stimuler le désir de recherche. Un seul gisement vénézuélien, situé le long de l'Orénoque, contient une quantité d'huile lourde dépassant les réserves en pétrole de tout le Moyen-Orient. Certains pays en développement, aujourd'hui importateurs de pétrole, possèdent des gisements représentant 1 à 5 milliards de barils. Il s'agit notamment de la Colombie, de la Côte d'Ivoire, de Madagascar et de la Turquie. Les sables asphaltiques du Canada (province d'Alberta principalement) renferment des réserves équivalent à 800 milliards de barils, et c'est encore peu de chose par rapport aux gisements vénézuéliens, estimés à plus de deux mille milliards de barils.

Les réserves de schistes bitumineux sont encore plus importantes. Les pays développés à économie de marché, pris ensemble, ont des réserves équivalent à 2 247 milliards de barils, les Etats-Unis se taillant la part du lion avec 2 100 milliards. Parmi les pays en développement qui importent du pétrole mais qui possèdent aussi des gisements de schistes bitumineux, on peut citer l'Argentine, la Thaïlande et le Maroc (300 millions à 1 milliard de barils chacun), alors que le Brésil possède des réserves correspondant à 800 milliards de barils. L'Union soviétique et le Zaïre recèlent aussi des gisements importants. Les producteurs actuels comprennent la Chine, qui tire 9 % de son pétrole des schistes de Mandchourie et du Kwangsi (la production annuelle de schistes y est de 45 à 70 millions de tonnes). L'Union soviétique traite 35 millions de tonnes de schiste, dont elle extrait 12 millions de tonnes de pétrole.

Source : *Forum du développement*, Nations Unies, 1981



Source : *Energy in a Finite World*, IIASA, Laxenburg

## Former et informer

par James F. McDivitt

**L**ES progrès technologiques dans l'exploitation des sources d'énergie renouvelables et non polluantes n'ont pas entraîné une expansion rapide et généralisée. Pourquoi ? Il existe plus d'une réponse, mais ce que l'on admet partout, c'est que bien des obstacles à cette expansion ne sont pas de nature technique. Des études internationales détaillées entreprises par l'Unesco ressortent un certain nombre de facteurs importants : en particulier le manque d'information pour les spécialistes et le public, et le manque de personnel qualifié pour l'installation et les réparations.

Les nouvelles sources d'énergie ont eu beau provoquer une explosion d'intérêt, aucun effort systématique n'a encore été fait pour répondre au besoin urgent de personnel qualifié. C'est ce que montre une étude de l'Unesco sur la formation dans ce domaine. L'étude concerne quelque 300 institutions, dans 86 pays. Elle montre également que, s'il faut former beaucoup plus de chercheurs, ingénieurs et techniciens dans tous les secteurs de toutes les technologies nouvelles, il est tout aussi nécessaire de prévoir un enseignement pour ceux qui auront à décider dans ces domaines.

Dans bien des cas, c'est le manque d'information qui bloque l'enseignement, l'empêche d'être plus efficace, et empêche le public d'être sensibilisé à la possibilité de choix énergétiques différents. Même dans les pays possédant des réseaux d'information modernes, il est aujourd'hui à peu près impossible d'être au courant des derniers progrès réalisés dans ce domaine. Le volume des publications est trop énorme, les sources d'informations sont trop dispersées. Il y a là un autre domaine où de grands programmes doivent être mis sur pied. L'Unesco a ici un rôle de pionnier.

En 1980, l'Unesco a fait réaliser une étude sur le besoin et la faisabilité d'un système d'information international consacré aux énergies nouvelles. L'étude a été révélatrice : partout on est attentif aux "dangers d'investissements injustifiés fondés sur une information peu sûre. Tous (les utilisateurs) entendent éviter l'enthousiasme excessif de certains milieux pour telle ou telle énergie nouvelle dont les résultats se révéleraient décevants par la suite. Tous ont conscience que leurs choix pourraient être influencés par des pressions commerciales, directes ou indirectes, venues des personnes chargées de promouvoir les matériels et procédés en question".

A la suite de cette étude, la Conférence générale de l'Unesco a approuvé en 1980 le programme d'un tel réseau d'information, à développer chaque fois que possible sur des systèmes et services déjà en place. Ce programme a démarré. La planification de plusieurs projets pilotes est déjà bien avancée.

**JAMES F. MCDIVITT**, géologue canadien, est directeur de la Division de la recherche et de l'enseignement supérieur technologique de l'Unesco.

# L'unification des formes fondamentales de l'énergie

par **Abdus Salam**,  
Prix Nobel de physique 1979

Il y a encore vingt ans, les physiciens croyaient à l'existence de quatre formes fondamentales d'énergie : la force de gravitation ; la force électrique (comprenant le magnétisme) ; l'interaction nucléaire forte, responsable de la puissante attraction entre protons et neutrons — particules constitutives du noyau atomique — et l'interaction nucléaire faible, qui joue un rôle essentiel dans la transformation d'un type de particule subatomique en un autre.

Aujourd'hui, c'est un lieu commun d'affirmer que ces formes d'énergie sont capables de se transformer les unes dans les autres : par exemple, la force de gravitation en électricité (l'hydro-électricité en est une preuve) ou l'interaction nucléaire forte en électromagnétisme (ainsi lorsque l'énergie nucléaire de l'intérieur du soleil devient l'énergie électromagnétique de la chaleur des rayons solaires).

Il y a vingt ans, mes collègues et moi-même avons suggéré que certains indices laissaient penser que l'interaction nucléaire faible était fondamentalement identique à l'électromagnétisme. Il ne s'agissait pas seulement de la transformation d'une forme d'énergie en une autre : nous allions plus loin. Selon nous, il n'y avait pas de différence de base entre l'électricité et les forces nucléaires. Nous disions qu'elles étaient simplement identiques et que cette identité, masquée d'habitude, pouvait apparaître évidente en laboratoire, dans certaines conditions bien précises.

En 1973, notre théorie fut confirmée pour la première fois quand l'Organisation européenne pour la recherche nucléaire (CERN) de Genève démontra expérimentalement l'existence de courants neutres, une des hypothèses essentielles de notre théorie. La preuve décisive fut fournie en 1978 lorsque l'accélérateur linéaire Stanford des Etats-Unis, au cours d'une expérience historique, confirma le second aspect de la théorie — son cœur, pourrait-on dire —, l'unification de la force électromagnétique et de l'interaction nucléaire faible, comme nous l'avions prévu. Ce qui fut corroboré ultérieurement par une expérience réalisée à Novosibirsk par une équipe placée sous la direction du professeur Bar- kov.

La prochaine étape consiste à vérifier si la troisième forme d'énergie (l'interaction nucléaire forte) participe aussi de cette unité. Avec quelques collègues, nous avons établi une formulation théorique et proposé de réaliser, pour vérifier cette hypothèse, des expériences. Celles-ci ont déjà été entreprises aux Etats-Unis, en Europe et en Inde. Si les résultats se révèlent positifs, nous aurons démontré, en quelque trois ans, que toutes les forces nucléaires — et pas seulement l'interaction nucléaire faible — sont identiques à la force électrique qui donne sa cohésion à l'atome. Il restera alors un dernier objectif à atteindre : démontrer l'unité de la force de gravitation et de la force électronucléaire récemment découverte. Pour finir, on découvrira que la force de gravitation, celle qui fait que la pomme tombe de l'arbre et que la lune reste sur son orbite, est un autre aspect de cette unité à laquelle ressortissent la force électrique et les forces nucléaires. ■

*N.D.L.R. — Annoncés lors d'une réunion de la Société européenne de physique qui s'est tenue le 14 juillet, à Lisbonne, les résultats préliminaires d'une expérience réalisée récemment, à une profondeur de 2000 mètres, dans les mines d'or de Kolar en Inde, viennent corroborer la théorie du docteur Abdus Salam et semblent démontrer que trois des quatre forces physiques fondamentales ne forment qu'une seule force électro-nucléaire.*

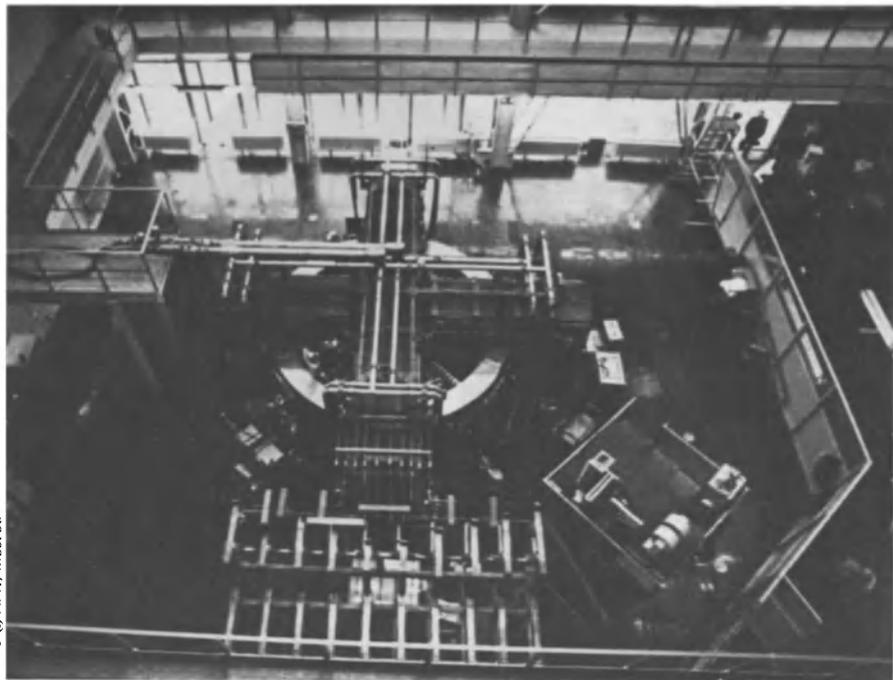
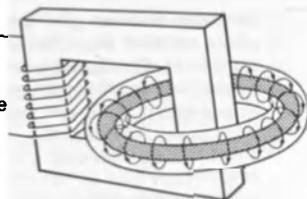


Photo © APN, Moscou

L'installation thermonucléaire soviétique "Tokamak 10" : un pas vers la fusion nucléaire contrôlée, porteuse de beaucoup d'espoirs en matière d'énergie (ci-dessus). Pour obtenir une réaction de fusion contrôlée, il faut porter le matériau de réaction, le plasma, à 100 millions de degrés environ — pendant au moins une seconde. Personne n'y est encore parvenu... Le problème est d'isoler le plasma des parois de l'appareil, qui ne résisteraient pas à une telle température. Avec Tokamak, ceci s'obtient en confinant le plasma dans un champ magnétique. Dans une chambre annulaire, le plasma est entouré de spires qui créent un puissant champ stabilisateur (voir dessin ci-contre). Un second champ magnétique créé par le courant électrique destiné à chauffer le plasma, maintient ce dernier à distance des parois.



Dessin © R S Pease,  
Culham Laboratory, Royaume-Uni

Photo © Scrobogna, Centre international de physique théorique, Trieste



Quand les jeunes scientifiques des pays en développement rentrent dans leur patrie, après avoir fait des études poussées à l'étranger, ils doivent souvent assumer de lourdes tâches d'enseignement qui restreignent leurs possibilités de s'adonner à la recherche. Ils risquent de se sentir coupés des dernières découvertes faites dans leur domaine respectif. Pour offrir à ces hommes et à ces femmes un moyen de rompre cet isolement intellectuel, on a créé à Trieste, il y a une vingtaine d'années, le Centre international de physique théorique. Financé par l'Italie, l'Agence internationale de l'énergie atomique et l'Unesco, le Centre est un lieu où ils peuvent actualiser leurs connaissances, réfléchir, travailler et, surtout, profiter du contact stimulant avec d'autres scientifiques. Il a été fondé à l'initiative du professeur Abdus Salam qui a connu personnellement les frustrations de l'isolement quand, au début des années 1950, il revint dans son pays, le Pakistan, pour enseigner, après avoir travaillé à des questions de physique des hautes énergies à Cambridge et à Princeton. A cette date, le professeur Abdus Salam était le seul spécialiste en physique théorique de son pays. Plus tard, il devait écrire : "L'isolement, dans ma spécialité, comme dans la plupart des domaines de l'activité intellectuelle, signifie la mort." Actuellement le Centre accueille quelque 1 500 physiciens par an en qualité de visiteurs ou de participants aux séminaires qui y ont lieu. Ci-dessus, le professeur Paul Dirac, prix Nobel de physique en 1933, au cours d'une conférence dans l'amphithéâtre du Centre.

# L'énergie nucléaire

**O**N produit de l'énergie nucléaire en transformant la matière en énergie. Pour ce faire, deux moyens sont possibles. Dans le cas de la fission nucléaire, on produit de l'énergie lorsqu'on bombarde de neutrons un noyau qui se divise alors en deux. Dans le cas de la fusion nucléaire — dont, jusqu'à présent, la seule forme connue sur terre est l'explosion thermonucléaire d'une bombe à hydrogène — on réunit deux noyaux légers afin d'en former un plus lourd qui contiendra moins d'énergie. La production d'énergie intervient au cours de ce processus.

## Les réacteurs thermiques

C'est en 1942, sur un terrain de squash de Chicago, que l'on a provoqué la première réaction en chaîne. Depuis lors, plus de 200 réacteurs thermiques nucléaires ont été construits, et ils fournissent au total une puissance d'environ 120 000 mégawatts, l'équivalent de quelque 6 pour cent de la production mondiale d'électricité. Plus d'un tiers de ces réacteurs se trouvent aux Etats-Unis et fournissent 12 pour cent de l'électricité de ce pays.

On escompte qu'en 1985 il y aura 414 réacteurs opérationnels — 196 en Europe, 170 en Amérique du Nord, 43 en Asie et 5 en Amérique latine. A eux tous, ils produiront 307 000 mégawatts.

Il se peut que la production d'énergie nucléaire triple d'ici à la fin du siècle. Il faudra alors 500 000 tonnes environ de combustible nucléaire par an, et l'on aura utilisé quelque 4 millions de tonnes d'uranium depuis l'invention de l'énergie nucléaire. Cela équivaut plus ou moins à la totalité des réserves connues d'uranium économiquement exploitables. Sans l'existence des surrégénérateurs ou des réacteurs de fusion, l'énergie nucléaire connaîtrait, à cette époque, une impasse.

## Les surrégénérateurs

Les surrégénérateurs, qui traiteront le double de matière fissile d'ici 6 à 10 ans, rendent 60 fois plus efficace l'emploi du combustible. Ainsi, grâce à ces derniers, les réserves d'uranium dont on dispose pourraient durer beaucoup plus longtemps. En outre, d'un point de vue technique, il est possible d'utiliser non pas de l'uranium mais du thorium comme principal combustible. Il y a, dans le monde, beaucoup plus de thorium que d'uranium, ce qui pourrait prolonger sensiblement l'emploi des réacteurs de fission.

Les surrégénérateurs sont encore à l'étude. A l'heure actuelle, plusieurs fonctionnent de façon expérimentale mais aucun ne produit d'électricité à des fins commerciales. On prévoit que les premiers réacteurs opérationnels de ce type feront leur apparition au cours des années 80, mais, sur une grande échelle, les surrégénérateurs ne produiront de l'électricité qu'après 1990. D'un point de vue technique, le fonctionnement des surrégénérateurs est compliqué : il leur faut d'importantes quantités de matière fissile, en principe du plutonium obtenu à partir du combustible usé d'un réacteur thermique qui fonctionne à l'uranium. Le plutonium étant l'élément dont on se sert pour fabriquer des armes nucléaires, la perspective de devoir en produire et en stocker de grosses quantités ne laisse pas d'être préoccupante. En 1985, il faudra, chaque année, 100 tonnes environ de plutonium fissile. Ce chiffre atteindra 500 tonnes environ en l'an 2000.

Les surrégénérateurs ont une capacité énergétique beaucoup plus importante que celle des réacteurs thermiques, et l'on doit les refroidir à l'aide de métaux liquides comme le sodium et le potassium. Le sodium liquide est un produit extrêmement dangereux ; il s'enflamme au contact de l'air et explose à celui de l'eau.

## Les réacteurs de fusion

On pense pouvoir faire fonctionner les réacteurs de fusion en faisant fusionner un mélange de deutérium et de tritium, ce qui produit un isotope d'hélium (gaz inerte) et une importante quantité d'énergie. On peut obtenir des quantités illimitées de deutérium à partir de l'eau de mer ; on obtient du tritium en irradiant du lithium — que l'on trouve en abondance — avec des neutrons à l'intérieur même du réacteur de fusion. Ainsi, le réacteur de fusion ne pose pas de problème de combustible. Par ailleurs, le produit utilisé est stable et non fissile, ce qui rend le processus potentiellement moins polluant que ne le seront jamais les réacteurs de fission.

Toutefois, pour obtenir une réaction de fusion, il faut chauffer à environ 100 millions de degrés une très grande quantité de deutérium

et de tritium et conserver ces combustibles suffisamment longtemps pour que la fusion intervienne avant qu'ils ne se refroidissent ou ne fondent et se dissipent dans le milieu ambiant. On a fait cette expérience avec la bombe à hydrogène, mais jamais en laboratoire. Cependant, depuis 1975 environ, la recherche sur la fusion nucléaire s'est considérablement accrue, et l'on y consacre annuellement 1 milliard de dollars environ. La faisabilité scientifique de la fusion nucléaire sera acquise, estime-t-on dans les années 80. Au plan technique, il faudra peut-être attendre 1995 et il se peut que la mise en service, sur une grande échelle, des centrales nucléaires de fusion n'intervienne pas avant la décennie 2005-2015.

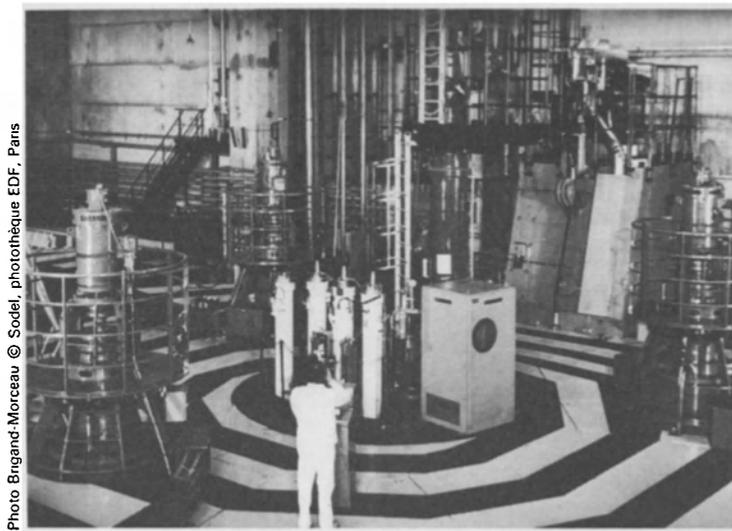


Photo Brémond-Morceau © Sodé, photothèque EDF, Paris

Les questions de sécurité peuvent donner lieu à certaines préoccupations pour tous les réacteurs nucléaires, car aucun réacteur n'est jamais parfaitement étanche. Chacun d'entre eux ajoute donc un petit peu au niveau de fond du rayonnement de l'atmosphère. Il existe en effet un niveau naturel pour ce rayonnement et nous l'avons accru d'environ un tiers : en raison, par exemple, des retombées radioactives suivant les essais nucléaires, des examens aux rayons X en médecine, ou même de la télévision. La télévision en couleurs soumet celui qui la regarde à une dose de rayonnement pouvant atteindre 2 millirems par heure. A titre de comparaison, un réacteur nucléaire n'augmente la dose de rayonnement que de 5 millirems par an pour les populations voisines. Cela représente environ deux ou trois pour cent de rayonnement de fond. On peut donc penser qu'il n'y a pas lieu de s'inquiéter. Reste toujours l'éventualité d'un accident qui libérerait des doses importantes de radiations dans la région environnante. Cependant, les chiffres à cet égard sont rassurants. Au Royaume Uni, on a enregistré, entre 1962 et 1975, quatre décès sur les lieux de travail parmi le personnel de l'industrie nucléaire (aucun n'a été causé directement par des émissions de radioactivité). Au cours de cette même période, 66 membres de ce personnel ont péri dans des accidents de la route.

Pour continuer la comparaison, la probabilité de trouver la mort dans un accident de la route est aujourd'hui d'une sur 4 000. On a calculé que la probabilité d'un grave accident nucléaire était, pour une année, d'une sur 5 milliards. Un tel accident est 1 000 fois moins probable, au moins, qu'un grave tremblement de terre ou la rupture d'un grand barrage.

Toutefois, le problème de l'évacuation des déchets radioactifs n'a pas encore été résolu de façon satisfaisante. Chaque réacteur de 1 000 mégawatts produit environ 9 m<sup>3</sup> de matière fortement radioactive tous les ans. Ces déchets doivent être stockés pendant des dizaines de milliers d'années avant de devenir inoffensifs. On pense que la solution consiste à les enfouir profondément dans des réservoirs étanches, mais les risques que cela comporte restent mal évalués.

C'est pour les surrégénérateurs que la question de la sécurité semble la plus préoccupante. D'abord à cause des plus grandes quantités de combustible utilisées, ensuite parce que ce combustible est un élément utilisable pour la fabrication d'armes nucléaires (il est, en outre, la matière la plus toxique que l'on connaisse) et, enfin, parce que les métaux liquides réfrigérants sont eux-mêmes extrêmement dangereux. Aucun de ces problèmes ne paraît techniquement insoluble, mais ils se posent de façon beaucoup plus sérieuse que pour les réacteurs classiques.

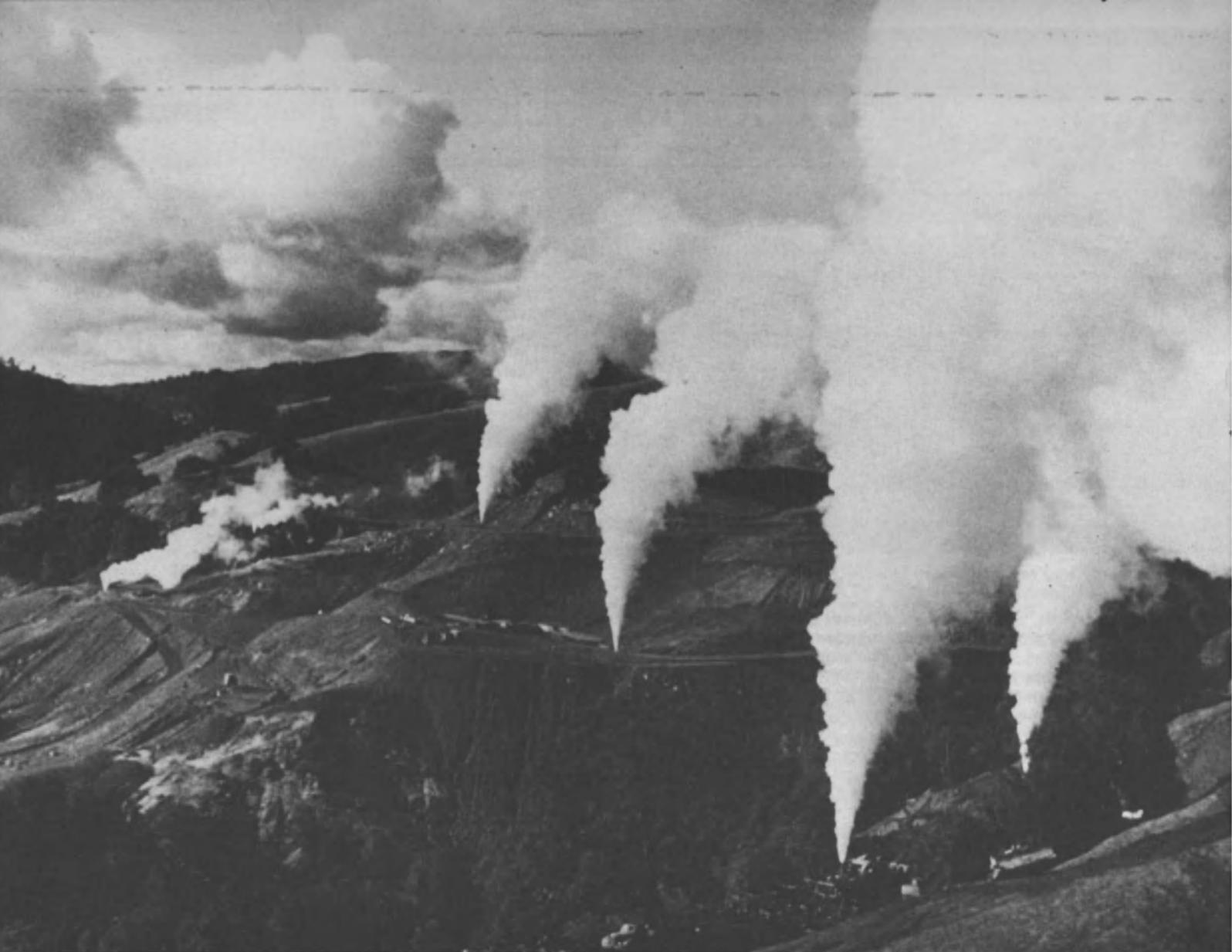
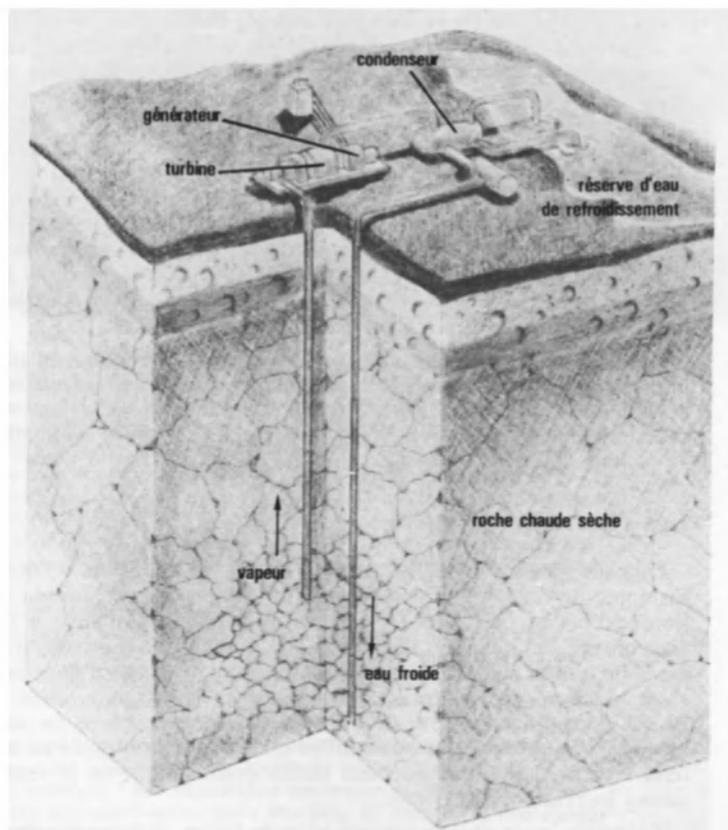


Photo © A. Ten Dam, Paris

L'énergie géothermique provient du réacteur nucléaire de la nature elle-même. Elle émane de la décroissance de radioactivité d'un isotope du potassium et d'autres éléments répandus dans l'écorce terrestre. Ce réchauffement généralisé entraîne, pour chaque kilomètre en profondeur, une élévation de 30 °C de la température. Dans certaines zones, l'activité géologique accentue cet effet et l'élévation de température peut atteindre 80 °C par kilomètre. Lorsque la présence de grès ou d'autres roches poreuses permet aux eaux souterraines de circuler, la chaleur est transmise à ces eaux qui remontent parfois naturellement par des sources ou des geysers ou qu'on peut capter en creusant des puits. Mais comme le poids de la roche fait que l'écorce imperméable a plus de quatre kilomètres d'épaisseur, la vapeur géothermique atteint rarement une température supérieure à 300 °C, ce qui limite le rendement possible de son exploitation. Souvent corrosives, l'eau et la vapeur se prêtent mal à l'emploi dans des turbines classiques. De nouveaux perfectionnements permettront peut-être de surmonter cette difficulté et d'éviter l'emploi des échangeurs coûteux, nécessaires pour transmettre la chaleur à un circuit de vapeur indépendant et propre, capable d'alimenter une génératrice à vapeur du modèle classique. Lorsque l'énergie géothermique ne fournit que de l'eau chaude, on s'en sert pour le chauffage des habitations et l'agriculture, ou encore pour pré-chauffer l'eau des génératrices à vapeur classiques. C'est l'Italie qui a la première exploité l'énergie géothermique pour alimenter en courant le réseau ferroviaire électrifié. La Nouvelle-Zélande, l'Islande, la France et le Japon s'en servent pour le chauffage des locaux. La faille africaine et la bordure du Pacifique offrent également des emplacements favorables à l'exploitation de l'énergie géothermique.

Un procédé qui donne de grands espoirs est celui de l'hydrofracture (au moyen d'explosifs ou d'eau sous pression) de roches sèches et chaudes qui sont beaucoup plus répandues que les terrains géothermiques à roches poreuses. Il consiste à faire descendre par pompage de l'eau dans un puits foré à travers la roche fracturée et à la faire remonter par un second puits. Le problème qui se pose est celui de la durée : au bout de combien de temps se refroidiront les roches, qui mettent ensuite très longtemps à se réchauffer ? Les coûts actuels de l'électricité d'origine géothermique lui permettent de concurrencer les centrales nucléaires et celles qui sont chauffées au mazout.

Ci-dessus, un "champ" de geysers en Californie. A droite, ce graphique montre comment est obtenue la vapeur géothermique.



Dessin © P. Charpiot, Paris

# L'énergie géothermique

**C**HAQUE mètre carré de la surface de la Terre produit en permanence 0,06 watt environ — ce qui est insuffisant pour que l'être humain le perçoive mais suffit, pour que la Terre, dans son ensemble, perde quelque  $2,8 \times 10^{14}$  kWh chaque année. A ce rythme, la Terre se refroidirait jusqu'à atteindre la même température que l'espace en 200 millions d'années seulement. Le fait que notre planète existe depuis 4,5 milliards d'années signifie que l'énergie provient des profondeurs de la Terre. Cette énergie provient du réchauffement produit par les résidus radioactifs de certains isotopes que l'on trouve dans les roches de la croûte terrestre. C'est pourquoi l'énergie géothermique est, en réalité, une autre forme d'énergie nucléaire.

Depuis des centaines d'années, l'homme a exploité la chaleur de la Terre — il suffit de citer les Romains, qui utilisaient de l'eau chaude géothermique pour alimenter leurs thermes. Aujourd'hui, environ 20 centrales géothermiques fonctionnent dans le monde, la capacité de chacune allant de quelques mégawatts à 500 mégawatts. A elles toutes, elles fournissent environ 1,5 gigawatts.

L'énergie géothermique ne peut être utilisée que lorsqu'elle se trouve à une distance raisonnable de la surface terrestre. C'est le cas, le plus souvent, dans les régions volcaniques ou celles à forte activité sismique. Au nombre des pays où l'on utilise aujourd'hui l'énergie géothermique, figurent les Etats-Unis, l'URSS, la Nouvelle-Zélande, le Japon, le Salvador, le Mexique, les Philippines, l'Islande, l'Italie, la France et la Hongrie.

Ces deux derniers pays n'utilisent l'eau chaude ainsi recueillie que pour le chauffage des locaux. La plupart des autres pays utilisent la vapeur d'eau ou l'eau sous pression à très haute température en tant que sources d'énergie destinées à actionner les turbines qui produisent de l'électricité. Ce sont les formes d'exploitation les plus simples de l'énergie géothermique. Toutefois, les roches chaudes de la croûte terrestre contiennent une grande quantité d'énergie. Si l'on parvenait à y injecter de l'eau froide, on pourrait récupérer de l'énergie sous la forme de vapeur d'eau ou d'eau très chaude sous pression. Si cette technique, qui fait encore l'objet de recherches, aboutit, les sources d'énergie géothermique s'en trouveront considérablement accrues.

Les possibilités en matière de production d'énergie géothermique restent énormes, notamment dans le domaine peu connu de la récupération de chaleur à partir des roches chaudes, et par l'utilisation des réserves gigantesques d'eau chaude souterraine, que l'on pourrait employer pour le chauffage des locaux et les cultures en serre. En outre, l'énergie géothermique présente l'avantage de n'avoir que peu d'effets nocifs sur l'environnement. D'un point de vue technique, toutefois, elle constitue une ressource limitée, car l'énergie que contient la croûte terrestre disparaît progressivement au fur et à mesure qu'on la consomme. En moyenne, un puits produit environ 5 MW et sa durée de vie est de 10 ou 20 ans.

## Energies nouvelles : coûts et contraintes

par Boris M. Berkovsky

**O**N ne perçoit pas toujours clairement les causes socio-économiques qui entravent l'utilisation à grande échelle des sources d'énergie non conventionnelles. Il faut souligner que le développement de celles-ci peut avoir, au plan économique et social, des conséquences positives pour certains pays, et négatives pour d'autres.

Les sources d'énergie renouvelables exigent de très forts investissements surtout en raison du coût de l'équipement nécessaire. Ces coûts varient considérablement selon la technologie employée pour chaque type d'énergie, selon les conditions locales, la puissance et les capacités de l'installation génératrice.

Seules les grosses centrales hydro-électriques construites et utilisées dans des conditions favorables peuvent fournir de l'électricité à un coût rivalisant avec celui des centrales à grande capacité utilisant du charbon ou du combustible nucléaire.

Grâce aux générateurs hydro-électriques, uniques en leur genre, installés à Sayano Shushensk, Ust-Ilim, Nourek (voir photo p. 26), et à d'autres centrales, l'Union soviétique a pu doubler sa production d'électricité dans les années 1970. En Syrie, la centrale hydro-électrique de El Soura, construite avec l'aide de l'Union soviétique, fournit plus de 70 % de l'électricité du pays.

Dans un nombre limité de régions, des centrales géothermiques de moyenne capacité peuvent apparaître comme des centres de production d'électricité économiquement viables.

Les autres sources d'énergie renouvelables sont moins économiques que les centrales thermiques et nucléaires. Cela est dû surtout à leur dispersion, à leur manque de continuité, à la nécessité de mettre en place d'autres systèmes énergétiques de soutien, et au risque que présente l'utilisation de technologies et de procédés qui n'ont pas encore fait entièrement leurs preuves.

Les nouvelles technologies proposées se révèlent, quand on les analyse en profondeur, bien plus coûteuses qu'on ne le pensait de prime abord. C'est le cas, par exemple, de l'exploitation de l'énergie solaire dans l'espace ou des différences de température dans les mers tropicales. Pour éclairer, avec un de ces systèmes nouveaux, les habitations d'une ville de dix mille habitants, il faut de dix à quarante mille heures/homme contre 200 à 500 heures/homme pour une centrale classique fonctionnant aux hydrocarbures.

La forte consommation de matériel est un autre obstacle à l'exploitation de l'énergie solaire ou d'autres sources d'énergie nouvelles et renouvelables. Par exemple, pour que les collecteurs d'une centrale solaire puissent capter de l'énergie au rythme de 1 Q par an (en 1975, la consommation mondiale d'énergie a été de 0,25 Q), ils doivent couvrir une superficie de 130 000 km<sup>2</sup>, soit à peu près celle de la Grèce et de la Tchécoslovaquie réunies. Cela signifie donc l'emploi d'une énorme quantité de matériel.

La fabrication des collecteurs d'énergie solaire les plus simples (une feuille de métal noirci, généralement de l'aluminium, avec, à l'intérieur, des tubes où circule un liquide) exige 10 kg d'aluminium par m<sup>2</sup>. Pour couvrir une superficie de 1 km<sup>2</sup>, il faudrait 10 000 tonnes d'aluminium, et soustraire à leur usage normal de vastes zones de terre.

L'aliénation d'immenses espaces terrestres et maritimes est une condition préalable d'une production massive d'énergie solaire et d'énergie océanique. Les spécialistes ont calculé, par exemple, que pour produire 1 Q d'énergie par an en exploitant l'énergie thermique des mers et des océans, les installations nécessaires pour capter et transformer cette énergie couvriraient presque l'ensemble des mers tropicales, ce qui entraverait gravement, bien entendu, le trafic maritime et la pêche.

En outre, l'exploitation des mers tropicales ferait baisser d'un degré centigrade la température des eaux de surface, ce qui pourrait se traduire par une baisse de la température moyenne annuelle des tropiques, modifiant ainsi sensiblement le climat du globe.

Les principaux facteurs qui freinent le développement des sources d'énergie nouvelles et renouvelables sont donc : les coûts initiaux élevés, la forte consommation de matériels, l'aliénation de vastes surfaces de terre ou de mer, le manque de spécialistes, l'absence d'un système spécialisé d'information, les difficultés légales et administratives. Le statut des sources d'énergie non conventionnelles est rarement défini dans les législations actuelles, avec clarté et précision, ce qui suscite des conflits d'intérêts souvent longs à résoudre.

Tous ces facteurs sont inhérents au développement de sources d'énergie non conventionnelles et constituent un obstacle majeur à leur développement sur une grande échelle. Ce problème exige une action globale au niveau des gouvernements, la mise au point et l'exécution de plans et de programmes à long terme, et une ample coopération internationale à laquelle l'Unesco contribuera de façon décisive.

**BORIS M. BERKOVSKY**, savant soviétique spécialisé en thermophysique, dirige le laboratoire pour l'utilisation des ordinateurs en thermophysique et énergétique à l'Institut des hautes températures de l'Académie des Sciences de l'URSS, à Moscou. De 1973 à 1979, il a été responsable, à l'Unesco, du programme concernant les problèmes scientifiques et technologiques de l'énergie. Il a publié plus de cent ouvrages, dont un grand nombre a été traduit en plusieurs langues.



Photo © JAMSTEC - Agence internationale d'énergie, Paris

## L'énergie marémotrice

**L**ES marées du monde entier renferment environ 3 TW d'énergie. Mais on ne peut l'exploiter rentablement que dans certains sites ; il s'agit d'emplacements où l'amplitude des marées est très élevée comme c'est le cas, par exemple, dans certaines parties de la Manche sur les côtes anglaises, en mer d'Irlande et le long des côtes de l'Amérique du Nord et de l'Australie ainsi que dans certaines parties de la Mer Blanche et de la Mer de Barents. En réalité, il existe, dans le monde, quelque 24 sites potentiels propres à l'exploitation de l'énergie marémotrice, aussi peut-on difficilement parler d'une ressource globale.

Pour des raisons d'ordre technique, les usines marémotrices ne fonctionnent qu'à 25 pour cent de leur capacité réelle — le potentiel global maximum n'est donc que de 20 GW alors qu'il pourrait être de 80 GW. On a construit une seule grande usine marémotrice — sur la Rance, en France — d'une capacité de 240 MW et l'on y produit, de façon assez économique, 60 MW environ. Des études sont en cours pour la construction, en France, d'une seconde usine d'une capacité de 12 000 MW et, en Amérique du Nord, dans la Baie de Fundy, d'une usine de 3 800 MW.

## L'énergie des vagues

Les vagues des océans contiennent trois autres TW d'énergie. Dans la Mer du Nord, une vague moyenne renferme une énergie de 40 kW par mètre pendant 30 pour cent du temps, et d'environ 10 kW/m pendant 70 pour cent du temps. Les estimations relatives à la quantité d'énergie que l'on pourrait tirer des vagues sont très variables. L'une d'entre elles avance un chiffre global de 100 GW. Une autre, celui de 120 GW pour le Royaume-Uni à lui seul. Toutefois, ces chiffres restent, pour le moment, purement théoriques, car aucune usine d'énergie des vagues ne fonctionne encore. Plusieurs prototypes expérimentaux ont été construits et sont actuellement testés. Le Royaume-Uni et le Japon sont au premier rang de ce type de recherche.

## L'énergie éolienne

Les vents qui soufflent sur la Terre contiennent une énergie d'environ 2 700 TW et, pendant des milliers d'années, on a utilisé des moulins à vent pour capter une infime partie de cette énergie. Aujourd'hui, l'énergie éolienne suscite un intérêt nouveau, mais deux grands problèmes se posent. Tout d'abord, le vent ne souffle pas régulièrement et il faut donc stocker d'une façon ou d'une autre l'énergie captée, ce qui augmente considérablement le coût. En second lieu, l'énergie éolienne est très clairsemée. En réalité, il faut, pour capter cette énergie, une surface de terre cinq fois supérieure à celle qu'il faut pour capter une quantité égale d'énergie solaire à l'aide de collecteurs solaires — il est vrai, cependant, que la plupart

Des bouées de signalisation marine fonctionnant à l'énergie des vagues ont été inventées par l'ingénieur japonais Yoshio Masuda. Elles sont utilisées au Japon depuis 1965. Le mouvement des vagues sert alternativement à aspirer l'air et à lui faire actionner une turbine basse-pression entraînant un générateur. La petite quantité d'électricité produite suffit à alimenter les lampes de la bouée. On s'efforce actuellement d'appliquer le principe à une production d'énergie plus importante. Des expériences sont faites avec le Kaimei (ci-dessus), mi-bouée, mi-navire, conçu par le Centre japonais de science et de technologie marines. Quant aux radeaux Cockerell (ci-dessous), ils fonctionnent selon un principe différent. Leur inventeur, Sir Christophe Cockerell, est plus connu pour avoir conçu l'hovercraft. Ces radeaux sont des plateformes articulées qui convertissent le mouvement ondulatoire des vagues en énergie. Il s'agit ici de modèles expérimentaux. Les radeaux adaptés aux conditions de l'Atlantique devront être cent fois plus grands.

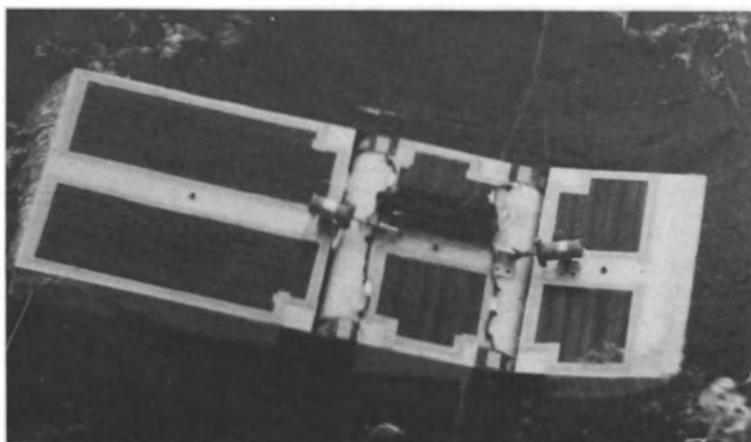


Photo © United Kingdom Atomic Energy Authority

des terres sur lesquelles on construisait des moulins à vent avaient aussi une vocation agricole.

L'énergie éolienne est utile sur une petite échelle pour satisfaire des besoins locaux, mais si l'on veut que sa contribution soit significative, il faut mettre au point des éoliennes d'une puissance de 100 kW et de plusieurs mégawatts. A l'heure actuelle, plusieurs éoliennes sont testées, la plus importante, d'une puissance de 2,5 MW, se trouvant aux Etats-Unis.

Jusqu'à cent mètres d'altitude, on ne trouve qu'un quart des 2 700 TW d'énergie que contiennent les vents. Si l'on ne considère que les surfaces utilisables et les inévitables imperfections du système, on peut compter sur un maximum de 40 TW à condition de construire des éoliennes sur tous les continents. Néanmoins, le dixième de ce chiffre, c'est-à-dire 4 TW seulement, est encore supérieur au potentiel d'énergie hydroélectrique.



Photo Pavlovsky © Sygma, Paris

Ci-dessus : la centrale marémotrice de la Rance (Ille-et-Vilaine, France). A droite : la nouvelle turbine de Block Island (Etat de Rhode-Island, Etats-Unis). Ses pales mesurent 38 mètres d'une extrémité à l'autre. Avec un vent de 28 km/h environ, il est possible de produire l'électricité nécessaire à la consommation d'une cinquantaine de foyers américains. Ci-dessous : éolienne pour le pompage de l'eau dans le district de Gezira, au Soudan.

Photo © NASA, Washington, D C



Photo Eric Schwab, Unesco



Photo P. Mainovsky © APN, Moscou

Pour produire de l'énergie hydro-électrique, on fait passer de l'eau par des turbines génératrices de courant. La quantité produite varie en fonction de la masse et de la vitesse de l'eau qui passe.

Les investissements nécessaires sont élevés mais les frais d'exploitation et d'entretien sont bas; une centrale hydro-électrique peut durer jusqu'à 100 ans, et le coût de sa production échappe pratiquement à l'inflation. Les économies d'échelle réalisables retiennent particulièrement l'attention depuis quelques années. Le potentiel total de la planète s'élève à 2,2 millions de MW, dont 18 % seulement ont été mis en exploitation. La Norvège, le Canada, la Suède, le Brésil et Sri Lanka tirent plus des trois quarts de leur courant de la source hydro-électrique.

Les problèmes sociaux et ceux de l'environnement que soulèvent certains des plus grands projets ont terni cette brillante image de l'hydro-électricité. Bien souvent, on submerge de bonnes terres arables, dont les cultivateurs se trouvent chassés; il risque d'y avoir des épidémies et le climat peut changer.

Depuis peu, on s'intéresse de nouveau, dans les pays en développement, aux petites centrales hydro-électriques, c'est-à-dire à celles

de moins de 10 MW. On peut les construire dans des régions dépourvues d'un réseau de distribution et où la demande de courant n'est pas structurée. Elles peuvent y constituer des foyers d'industrialisation qui permettent aux entreprises d'utiliser les matières premières et les aptitudes locales et encouragent la population à rester dans les campagnes.

La Chine a déjà construit plus de 900 000 de ces petites centrales et la mise en exploitation de milliers de sites est en cours même dans des pays riches tels que la France et la Suède. Dans les pays en développement, des centrales à double effet peuvent fournir le courant destiné aux opérations mécaniques le jour, à l'éclairage et à la cuisine la nuit. Le progrès technique et la normalisation permettront probablement d'en ramener le coût à 20 ou 30 % de ce qu'il est aujourd'hui.

Ci-dessus, une centrale hydro-électrique à Ust'-Ilim, à l'est de la Sibérie. A droite, une petite centrale hydro-électrique dans la province de Yongan, en Chine. Ci-dessous, le barrage de Kariba sur le fleuve Zambèze, à la frontière entre la Zambie et le Zimbabwe, qui fournit 8 millions de kWh d'électricité par an.

Source : Forum du Développement, janvier-février 1981



Photo Li Kayuan © New China Pictures, Pékin

Photo Paolo Koch © Rapho, Paris



# L'énergie hydraulique

Il y a, sur la Terre,  $10^{18}$  tonnes d'eau. Toutefois, 1/2000<sup>e</sup> seulement de cette eau participe au cycle annuel des précipitations, en s'évaporant avant de retomber sous la forme de pluie ou de neige. Cette infime proportion équivaut malgré tout à 500 000 km<sup>3</sup> d'eau. En réalité, 430 000 km<sup>3</sup> d'eau s'évaporent chaque année des océans et 70 000 km<sup>3</sup>, des continents. Lorsque cette eau se précipite, 390 000 km<sup>3</sup> tombent sur la mer et 110 000 km<sup>3</sup> sur les terres. Ainsi, chaque année, 40 000 km<sup>3</sup> d'eau s'écoulent de la terre dans la mer. La hauteur moyenne des continents étant de 800 mètres, il est facile de calculer que le potentiel total d'énergie hydraulique du globe est de 10 TW (ce qui correspond à peu près au total de la consommation mondiale d'énergie).

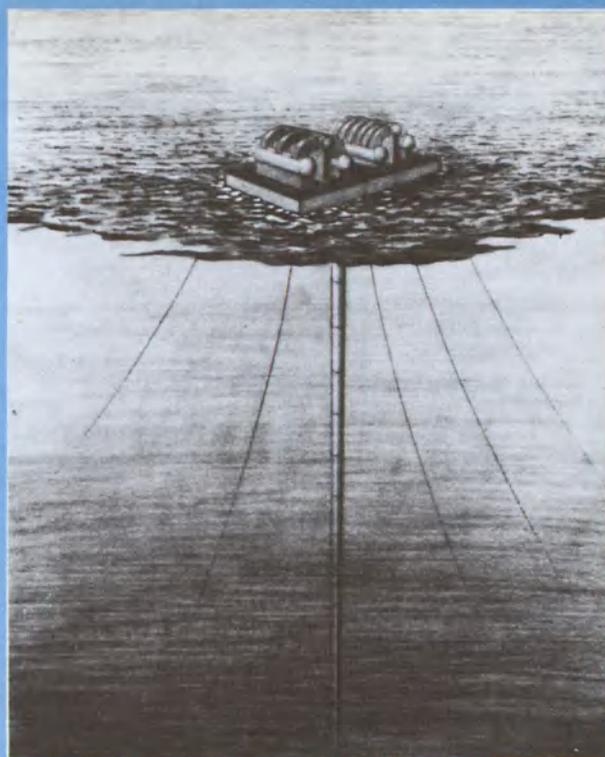
Cependant, une partie seulement — 15 pour cent peut-être — de cette énergie peut être exploitée économiquement, ce qui revient à évaluer le potentiel total à 1,5 TW. En 1975, la production totale annuelle d'énergie hydraulique représentait environ 11 pour cent de ce potentiel. Les possibilités sont donc encore assez grandes — notamment dans les pays d'Afrique et d'Asie où ce potentiel, quoiqu'il soit le plus vaste du monde, est le moins utilisé.

Il y a cinquante ans, 40 pour cent environ de l'électricité mondiale était fournie par l'énergie hydraulique. Aujourd'hui, ce chiffre est tombé à 23 pour cent — mais il reste encore très supérieur à la part d'électricité fournie par l'énergie nucléaire. Dans certains pays de l'Amérique Latine, l'énergie hydraulique satisfait jusqu'à 80 pour cent de la demande en électricité.

A l'heure actuelle, fonctionnent plus de 70 centrales de plus de 1 000 MW. Certaines ont une capacité de 10 000 MW. Mais il en existe des millions qui ne fournissent que quelques kilowatts. L'énergie hydraulique est utile du fait qu'elle provient d'une source renouvelable, et extrêmement efficace car elle produit directement de l'électricité à partir d'une énergie mécanique et non à partir de la chaleur, en outre l'on peut en produire dans des centrales de n'importe quelle dimension.

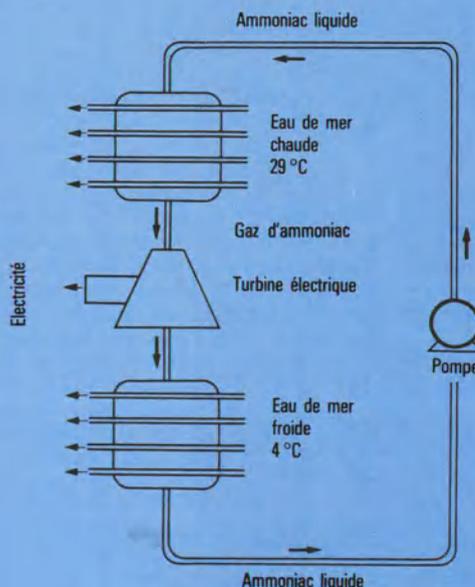
# L'énergie thermique des océans

Les courants marins renferment de 5 à 8 TW d'énergie. Les tentatives visant à en récupérer une partie grâce à l'installation de turbines apparaissent encore quelque peu futuristes. Pourtant, il est certain que la différence de température entre l'eau froide des profondeurs de quelques centaines de mètres et l'eau chaude de la surface des mers assure une énorme source potentielle d'énergie, que l'on estime entre 20 000 et 40 000 TW, et dont on pourrait effectivement récupérer quelque 4 TW. Le moyen d'utiliser cette énergie, qui consiste à actionner une turbine en jouant sur les petites variations de température, est très inefficace. A l'heure actuelle, toutefois, de petites centrales surnommées ETM sont testées et l'on prévoit, un peu après 1985, la construction d'un prototype de 100 MW. Les ETM relayeraient l'énergie produite jusqu'à la terre ou l'utiliseraient en mer pour l'exploitation de minéraux et d'autres ressources.

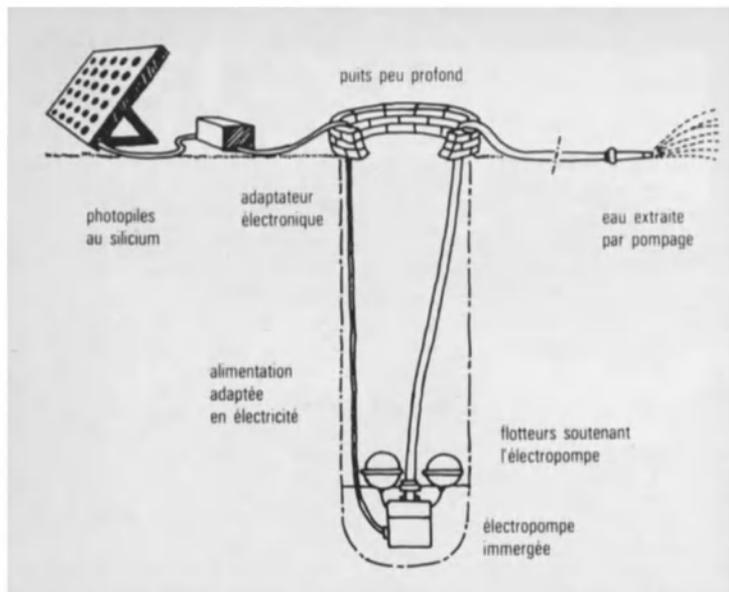


Dessin © CNEOX, Paris

Les océans du monde absorbent près de 70 % de l'énergie solaire qui atteint la terre. La conversion de l'énergie thermique des océans (OTEC) exploite cette énorme réserve d'énergie en utilisant la différence de température entre les eaux de surface chauffées par le soleil et les eaux des profondeurs marines pour actionner des turbines génératrices d'électricité. On expérimente actuellement deux systèmes de l'OTEC : le "cycle fermé" et le "cycle ouvert". Le dessin ci-dessous montre le fonctionnement du premier système. Une pompe fait circuler l'ammoniac, qui a une température d'ébullition très basse, en circuit fermé. L'eau chaude de l'océan réchauffe l'ammoniac (haut du schéma) et le transforme en gaz qui passe à travers une turbine où il se détend et entraîne un générateur. Le gaz en sort rafraîchi, à une pression moindre, et s'écoule par un échangeur de chaleur fonctionnant à l'eau froide ; le gaz redevient liquide et le cycle recommence. Dans un "cycle ouvert" de l'OTEC, l'eau de mer est utilisée comme un fluide de fonctionnement ; sa température d'ébullition baisse en passant par une chambre, où a été fait le vide, maintenue à 3,5 % de la pression atmosphérique normale. Ci-dessus, dessin d'une centrale océanique flottante de type "cycle ouvert" étudiée actuellement par le Centre national pour l'exploitation des océans (CNEOX).



Dessin © R. Meyer, OTEC, Chicago



Dessin *Forum du Développement*, Nations Unies, 1981



Photo © Christian Schlaepfer, *R et D Mexico*, Mexico

Le débat sur l'utilisation de l'énergie solaire tend à s'orienter principalement vers les problèmes d'ordre technique et financier qu'elle soulève. Pourtant, si l'on veut que cette nouvelle source d'énergie soit utilisée largement et avec succès, il faut informer le public pour qu'il comprenne et accepte ce système. Ci-dessous : dans une école de Tiverton (Angleterre), équipée d'installations solaires pour le chauffage des locaux et la production d'eau chaude, ainsi que d'un système de récupération de la chaleur et de réutilisation des eaux de pluie actionné par une éolienne, les installations sont à découvert et peintes de couleurs différentes pour que les élèves puissent voir le fonctionnement du système et contrôler la quantité d'énergie utilisée. Ci-dessus : dessin montrant comment fonctionne une simple pompe à eau actionnée par des cellules photovoltaïques. En haut à droite, inspection de panneaux solaires photovoltaïques destinés à des communautés rurales du Mexique. A droite, une centrale thermique solaire du Sénégal.



Photo *Informations Unesco*

Photo © Devon County Council Photographic Unit, Royaume-Uni



Pour tous les hommes, le soleil va de soi. Sans défaillance, il se lève tous les matins et se couche tous les soirs. Par rapport à l'histoire de l'humanité, on peut le considérer comme éternel : toujours il produira l'énergie qui rend la vie possible sur terre.

Cet objet bien particulier, d'un diamètre de 1 400 000 km, s'est formé à partir d'un nuage gazeux composé surtout d'hydrogène. Il a un "cœur" extrêmement chaud : assez pour permettre la fusion de l'hydrogène et la création d'hélium. Cette fusion produit de l'énergie sous forme de rayonnements électromagnétiques à haute fréquence, lesquels gagnent peu à peu la surface par toute une série de processus radiatifs. Le rayonnement qui atteint en fin de compte la terre vient d'une couche peu épaisse et plutôt opaque à la lumière visible : la photosphère.

L'énergie produite par le soleil exige la combustion ou la

conversion de masse en énergie au rythme de 4 200 000 tonnes par seconde. La masse totale de l'astre atteignant  $22 \times 10^{26}$  tonnes, on peut calculer qu'il continuera à rayonner de l'énergie pour deux milliards d'années encore !

Le rayonnement électromagnétique émis par la photosphère se déplace dans l'espace à la vitesse de la lumière (300 000 km/s), et sous la forme de rayons divergents. Située à quelque 150 millions de kilomètres, la terre n'en intercepte guère que la deux milliardième partie. Toutefois la quantité d'énergie solaire qui l'atteint chaque année est plus de cinquante fois supérieure à l'énergie que pourraient produire toute les réserves démontrées de combustibles fossiles. Elle représente 35 000 fois la consommation énergétique annuelle du monde.

# L'énergie solaire

**L**A quantité moyenne d'énergie solaire qui parvient jusqu'à l'atmosphère terrestre est immense — environ 1,353 kW/m<sup>2</sup>, soit 178 000 TW. Celle qui parvient jusqu'à la surface de la Terre est bien moindre, et la part récupérable de cette énergie est encore inférieure. C'est pourquoi l'on préfère, pour évaluer le potentiel global, ne tenir compte que de l'énergie solaire qui parvient jusqu'aux terres inhabitées et inexploitées. La puissance moyenne annuelle de cette énergie est de 10 000 TW environ — à peu près 1 000 fois la consommation globale courante d'énergie.

L'ensoleillement fournit une énergie d'un maximum de 1 kW/m<sup>2</sup> — et ce, pendant une ou deux heures seulement, vers midi et en plein été. Dans la majeure partie du monde, l'ensoleillement moyen est de l'ordre de 200 W/m<sup>2</sup>. Il semble que l'Afrique et l'Asie soient les continents les plus favorables pour recueillir l'énergie solaire.

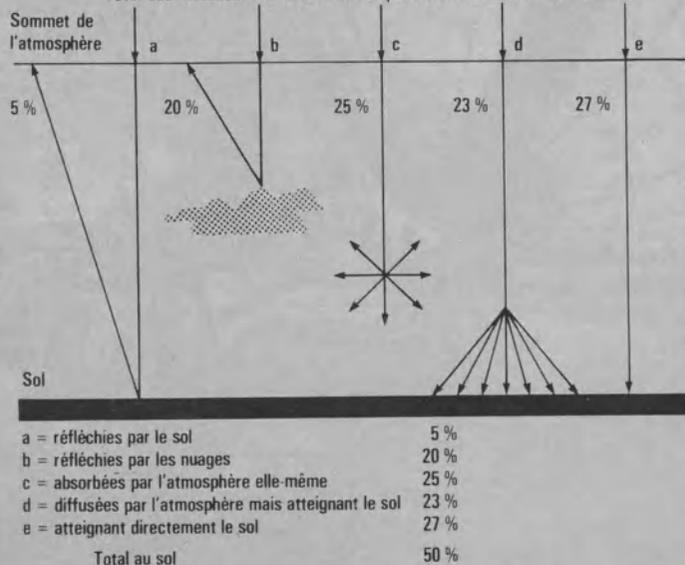
L'énergie solaire, bien que fort disséminée, est extrêmement utile du fait qu'on peut l'employer à moindre coût dans toutes sortes de domaines. Le plus connu est celui du chauffage domestique à l'eau chaude ; en Israël, une famille sur cinq possède un collecteur solaire sur le toit de la maison. L'énergie solaire peut également servir au séchage des récoltes, à la climatisation, au chauffage des locaux, à pomper de l'eau, au dessalement et à la production de très hautes températures ainsi que d'électricité. Jusqu'à présent, la température la plus élevée — environ 4 000 °K — a été atteinte dans un four solaire situé dans les Pyrénées, où des miroirs reflètent l'énergie solaire sur une grande surface et la transmettent à un four.

Il semble que la stratégie la plus prometteuse soit de produire de l'électricité à partir de la lumière solaire. L'une des méthodes consiste à faire en sorte que des miroirs reflètent l'énergie solaire et la transmettent à une chaudière d'où l'on tire de la vapeur d'eau qui actionne une turbine. Aujourd'hui, on procède, sur une petite échelle, à de nombreuses tentatives en vue de construire des "fermes" solaires qui fourniront, de cette façon, plusieurs kilowatts d'énergie électrique. En outre, on note actuellement une douzaine environ de tentatives en vue de construire de grandes centrales solaires dont la production d'électricité atteindrait plusieurs mégawatts, la technique employée étant assez semblable. Une centrale solaire de 10 MW nécessiterait quelque 2 000 réflecteurs d'une surface de 25 m<sup>2</sup> chacun.

Une autre solution consiste à se servir de cellules photovoltaïques qui transforment directement l'énergie solaire en électricité, avec une efficacité typique de 10 à 15 pour cent. De petites centrales d'une puissance de 250 à 1 000 kW ont déjà été construites, mais elles sont coûteuses en raison du prix élevé des cellules, qui peut atteindre 10 dollar/watt, installation comprise. Grâce, cependant, à une production massive et à des recherches plus poussées, on espère réduire ce coût qui pourrait tomber à moins de 0,5 dollars/watt, et il serait alors possible d'électrifier les villages isolés grâce à l'installation de petits complexes photovoltaïques.

## De l'espace au sol terrestre : le passage du rayonnement solaire à travers l'atmosphère

Total des radiations arrivant à l'atmosphère (constante solaire) 100 %



Source : Koengsberger et al., Manual of Tropical Housing and Building, Part I, Climatic Design, 1973, Longman

## Le Centre solaire régional de Bamako, Mali

### Une étude de l'Unesco

**V**ERS 1985, le coût des cellules photovoltaïques (qui transforment directement la lumière solaire en électricité) devrait connaître une baisse sensible, comparable à celle du prix des transistors dans les années 60. Cette prévision est faite dans une "étude de faisabilité" réalisée récemment par l'Unesco pour le Centre solaire régional qui va être créé à Bamako, au Mali.

La décision de fonder ce centre fut prise en octobre 1978 lors d'une réunion des chefs d'Etat des six pays que regroupe la Communauté économique d'Afrique de l'Ouest (CEAO) : la Haute Volta, la Côte d'Ivoire, le Mali, la Mauritanie, le Niger et le Sénégal. Elle montre combien les pays du Sahel sont décidés à résoudre leurs problèmes énergétiques et à accroître leur indépendance technologique.

L'objet de cette étude est de définir l'organisation, le financement et le programme du Centre régional, conçu comme une importante unité pilote de recherche, de formation et de production de matériels solaires. Cette étude est une analyse approfondie de la situation et des besoins énergétiques des six pays de la CEAO, qu'il s'agisse des énergies classiques et des énergies renouvelables, notamment solaire et éolienne.

Parmi ces dernières, la moins coûteuse s'est révélée être l'hydro-électricité ; son utilisation est à recommander, de préférence à la production énergétique locale, chaque fois que la consommation est élevée et que la faible distance justifie l'installation d'un réseau de lignes électriques et de transformateurs. En revanche, quand la consommation est faible et la distance trop grande pour justifier le coût d'installation d'une ligne électrique, les centres locaux d'énergie solaire ou éolienne sont la meilleure solution.

L'étude de l'Unesco montre que le fonctionnement de petites centrales électriques (allant jusqu'à 100 kW) équipées de moteurs Diesel est plus coûteux que celui des installations d'énergie solaire ou éolienne.

En se fondant sur les prix de mai 1979, l'Unesco a calculé dans cette étude que, pour l'irrigation dans les régions arides, les pompes solaires, jusqu'à une puissance installée de 30 kW, sont plus économiques, par mètre cube d'eau pompée, que les pompes à moteur Diesel. Depuis cette date, le prix du pétrole a presque doublé et le coût des cellules photovoltaïques a fortement diminué : aujourd'hui, le système des pompes solaires, jusqu'à une puissance installée de 50 kW, est sans doute plus économique par mètre cube d'eau pompée. En général, une installation de cette taille peut répondre aux besoins d'irrigation d'un terrain de 50 à 700 hectares.

Toutefois ce n'est pas seulement le coût de l'énergie qui détermine le choix. Il faut aussi tenir compte d'autres facteurs comme la fiabilité et la durée de vie des installations, le personnel qualifié pour les fabriquer, les utiliser et les entretenir, les possibilités d'augmenter ou de diminuer leur puissance, la possibilité d'organiser leur production, même partielle, dans le pays utilisateur, etc. Sur tous ces points, les installations solaires photovoltaïques sont nettement supérieures aux autres systèmes de Diesel, le solaire thermodynamique ou l'éolienne.

Les centrales solaires photovoltaïques ne nécessitent presque aucun entretien, ni pièces de rechange, ni surveillance par un personnel qualifié. Elles travaillent "seules" et un contrôle mensuel est largement suffisant. On peut facilement augmenter la puissance en augmentant le nombre des panneaux. En outre, elles peuvent être fabriquées partiellement dans les pays en développement, à partir de cellules importées, et l'on envisage, dans un proche avenir, la fabrication des cellules dans les pays utilisateurs.

Un grand effort est accompli dans certains pays industrialisés pour mettre au point des techniques de production, nouvelles et plus simples, de cellules photovoltaïques. On estime que le prix d'un module de cellules solaires, de 13 dollars en février 1979, devrait passer à 50 cents vers 1985 et à 15 cents en 1988. Une telle diminution des prix devrait inciter encore davantage les pays en développement à choisir l'énergie solaire photovoltaïque.

Bien que l'étude de faisabilité de l'Unesco s'appuie sur la situation dans les six pays de la Communauté économique de l'Afrique de l'Ouest, ses conclusions de caractère général valent pour tous les pays chauds en développement. On espère que les orientations et priorités techniques proposées dans l'étude de l'Unesco pourront être adoptées et que l'application de ses conclusions marquera une étape importante d'une stratégie énergétique nouvelle.

## Freins sociaux et culturels

**D**EPUIS que la crise de l'énergie et ses dures réalités ont réveillé le monde, le débat a toujours eu tendance à s'axer sur les difficultés techniques et financières à surmonter pour trouver une solution. En fait, l'introduction d'énergies nouvelles demande beaucoup plus que de la technologie et un financement : le passage vers des énergies nouvelles et viables est semé de nombreux obstacles qui n'ont rien de technique.

Pour les examiner, vingt cinq spécialistes du monde entier se sont rencontrés au Centre d'études et de réunions de la fondation Rockefeller à Bellagio, sur le lac de Côme, en Italie, du 25 au 29 mai dernier. Ce séminaire international consacré aux obstacles non techniques à l'emploi des énergies nouvelles dans les pays en développement était parrainé par l'Unesco et neuf organisations travaillant dans le domaine de l'énergie.

Parmi les principaux sujets discutés : l'impact social et culturel dû à l'introduction d'énergies nouvelles dans ces pays ; et le délai nécessaire à la préparation de changements sociaux et institutionnels qui les rendent acceptables.

En conclusion, ces spécialistes ont noté que l'on ne savait pas bien ce qu'un changement dans les types d'énergies utilisées pouvant avoir comme conséquence pour les sociétés. Dans les pays moins développés, bien des contraintes sociales et culturelles sont étroitement liées à la pauvreté. L'équilibre fragile des stratégies de survie peut faire hésiter à courir le risque de technologies nouvelles. Un facteur dont les politiques d'équipement devraient tenir compte davantage. Dans les programmes de développement (reboisement, conception de fourneaux, choix de combustibles comme le biogaz pour la cuisine), il faudrait s'occuper tout particulièrement d'éviter les malentendus et l'éventualité d'effets négatifs.

Il est important de distinguer entre les différents groupes composant les sociétés. Ainsi devrait-on pouvoir sélectionner et adapter à la fois les technologies et les institutions en fonction des utilisateurs (femmes, hommes, ruraux, urbains, pauvres, propriétaires...). Dans un pays en développement, le cadre institutionnel dans lequel prennent place les énergies nouvelles tend à favoriser le secteur urbain et commercial. Or ce serait le secteur rural et traditionnel qui en aurait le plus besoin... Il faut apporter une attention particulière aux supports institutionnels car ces énergies nouvelles et renouvelables, avec leurs installations décentralisées et à petite échelle ne s'adaptent pas aux systèmes administratifs en place.

Les attitudes culturelles jouent aussi. Elles ont favorisé les solutions mangeuses d'énergie : par exemple les grosses voitures ou les immeubles climatisés. Et elles font obstacle à l'adoption de technologies nouvelles. Des styles de vie différents, moins consommateurs d'énergie, sont nécessaires dans tous les pays, industrialisés ou non.

Certes les valeurs culturelles et sociales ne sont pas à voir seulement comme des obstacles. Dans la recherche de modes de développements différents, permettant de se soustraire un peu à la domination actuelle des combustibles commerciaux, il faudrait aussi pouvoir s'appuyer sur elles.

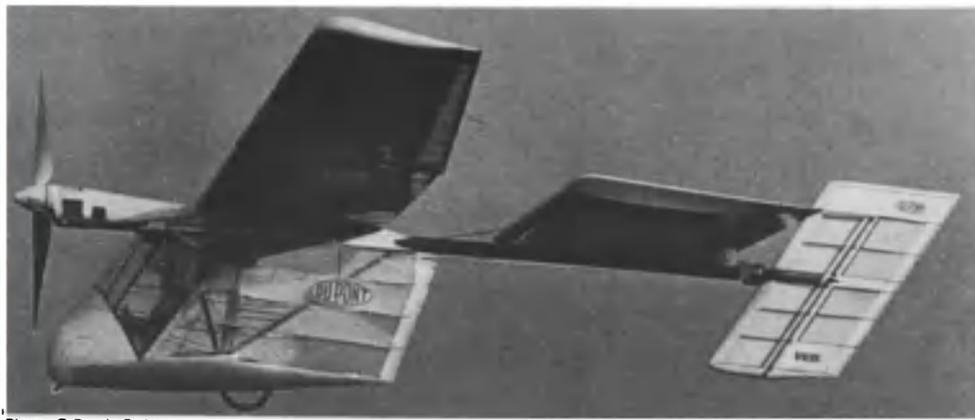
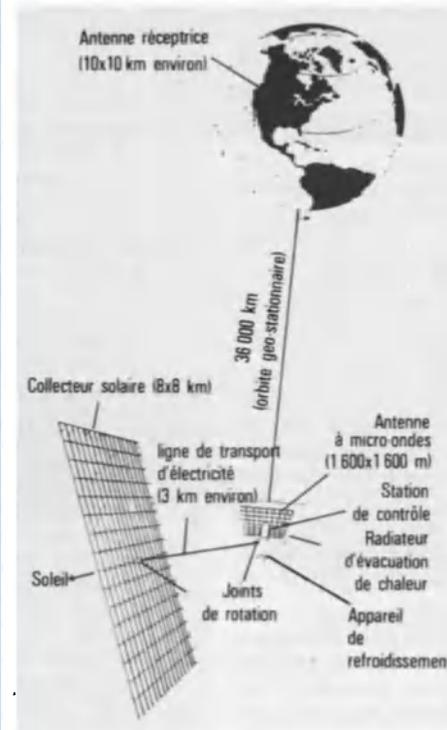


Photo © Randa Bishop

Pour la première fois un avion mû par l'énergie solaire a franchi la Manche, le 7 juillet : le *Solar Challenger* (en haut), appareil très léger en plastique, était piloté par Stephen Ptacek ("petit oiseau" en tchèque !). Cette traversée de 290 kilomètres a duré 5 heures et demie. L'avion, conçu et fabriqué en Californie, est équipé de 16 000 cellules solaires qui captent les rayons du soleil et les transforment en énergie électrique nécessaire au moteur pour actionner l'hélice. Le dessin du centre montre une conception audacieuse d'une centrale électrique solaire qui est un satellite. Cette station spatiale resterait en orbite, à 36 000 km de la Terre, altitude où l'on peut obtenir de l'énergie solaire 24 heures sur 24. Le collecteur solaire enverrait l'énergie du soleil en électricité et la transmettrait à une antenne d'ondes ultra-courtes. Cette antenne émettrait un rayon d'onde ultra-courte vers une grande antenne réceptrice placée sur la Terre, où l'énergie de ces ondes serait retransformée en électricité. Ci-dessous, journaux imprimés dans une machine actionnée par le soleil, expérience menée au Jardin des Tuileries, à Paris, dès 1882. L'appareil, au centre de la gravure, qui produit de la vapeur pour faire fonctionner la presse, est l'ancêtre des chaudières solaires d'aujourd'hui.



Dessin extrait de *The Conversion of Energy* par Claude Summers, Freeman and Co Publishers, San Francisco

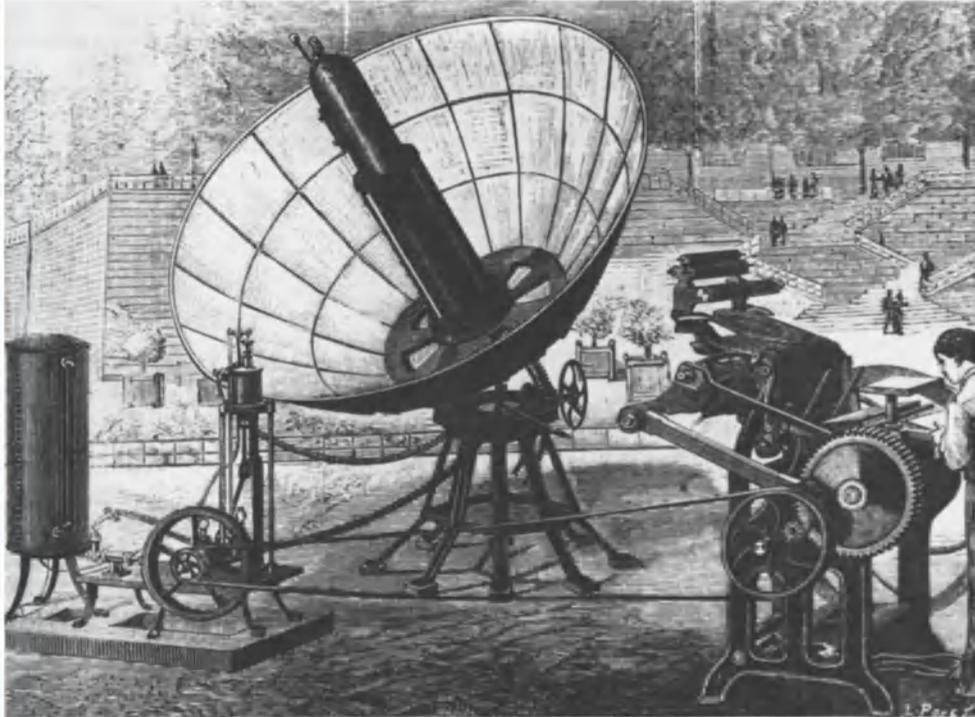
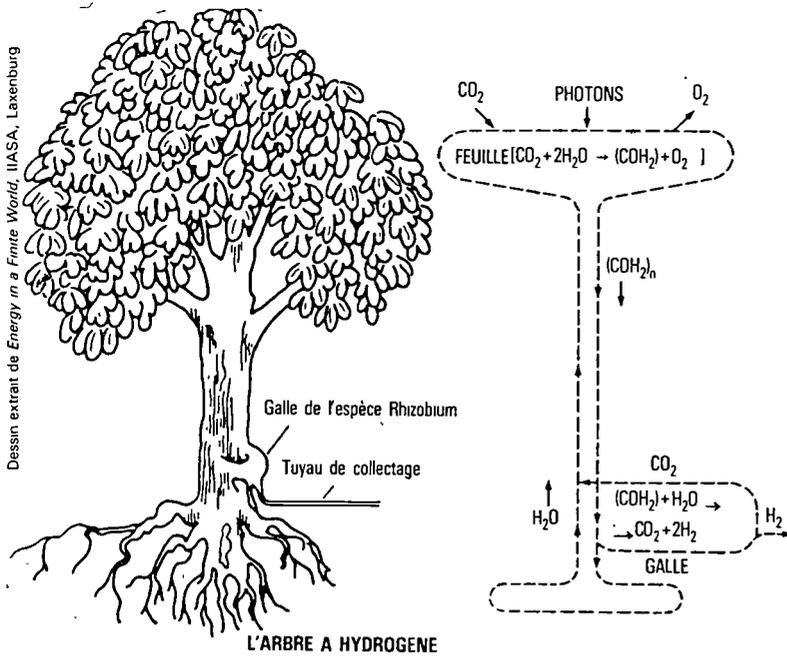


Photo © Musée des techniques CNAM, Paris



## Les combustibles solaires

**L**ES végétaux utilisent l'énergie solaire grâce au mécanisme de la photosynthèse — de cette façon, le dioxyde de carbone contenu dans l'air et la lumière solaire produisent des hydrates de carbone. C'est pourquoi l'on préfère considérer l'ensemble des combustibles fossiles — charbon, pétrole, gaz naturel et lignites — le bois, les récoltes, voire le fumier, comme des combustibles solaires. Plus de 95 pour cent de notre consommation courante d'énergie en proviennent.

Environ 90 pour cent de l'énergie contenue dans les végétaux de la Terre se trouve dans les arbres. L'énergie totale ainsi stockée est d'environ 635 TW/année, ce qui équivaut à peu près à la quantité d'énergie contenue dans nos réserves de charbon. Toutefois, contrairement au charbon, cette énergie se renouvelle chaque année à un rythme rapide. On a calculé que le rendement, au sol, de la biomasse de la Terre était d'environ 28,65 TW — soit le triple de la consommation globale courante d'énergie — la moitié étant produite par les forêts. Dans les mers, les plantes microscopiques fixent également l'énergie solaire et produisent environ 14,35 TW. Ces estimations, plutôt inférieures à la réalité, supposent un taux de photosynthèse de 0,2 pour cent sur les terres et 0,02 pour cent dans les mers. En réalité, la photosynthèse donne de meilleurs résultats.

L'utilisation la mieux connue des combustibles solaires est le brûlage du bois pour la préparation des repas et le chauffage. Globalement, ce bois fournit environ 1 à 2 TW, notamment en Afrique et en Asie où, dans certaines régions, il couvre 80 pour cent des besoins énergétiques. Mais il en résulte une utilisation des forêts plus rapide que leur rythme de croissance.

Le brûlage du fumier séché, qui sert alors de combustible, est également courant, mais cette pratique détourne de la terre une grande quantité d'engrais. Une utilisation plus efficace du fumier consiste à procéder à sa fermentation anaérobie dans un digesteur, afin de produire du méthane. A l'heure actuelle, l'emploi de petits digesteurs est courant en Inde et en Chine, malgré leur coût de construction relativement élevé. En théorie, le fumier produit par une seule vache devrait fournir suffisamment de méthane pour la préparation des repas d'une personne.

Une technique semblable consiste à faire fermenter la biomasse pour en tirer de l'alcool, qui est un bon combustible liquide. Le Brésil, qui est à la tête de cette technologie, pourrait finir par remplacer tout son carburant par de l'alcool fermenté de canne à sucre et d'autres plantes spécialement cultivées à cet effet. Mais, dans les meilleures conditions, il faut 1 km<sup>2</sup> de canne à sucre pour produire l'alcool nécessaire à 100 voitures. Si d'autres pays étudient actuellement les possibilités de remplacer l'essence par de l'alcool — c'est aussi le cas des pays industrialisés — il n'en reste pas moins que la lutte sera inévitable entre ceux qui entendent cultiver la terre à cet effet et ceux qui la cultivent à des fins alimentaires.

Zoran Zarić

Un moyen radicalement nouveau d'utiliser l'énergie solaire est offert par la biotechnologie. C'est une vaste catégorie de méthodes fondées sur des processus de transformation de l'énergie photosynthétique et biologique. Ainsi peut-on développer l'exploitation de plantes à haut rendement clonées et cultivées pour servir de matière première à des combustibles et à des produits chimiques. Les plantes "savent" depuis toujours utiliser l'énergie de la lumière solaire pour décomposer l'eau, mais elles ne produisent pas d'hydrogène à proprement parler ; elles n'en ont besoin que pour des processus énergétiques internes leur permettant de réduire le gaz carbonique. Toutefois, il est possible de développer de nouvelles structures biologiques qui produisent en fait de l'hydrogène. A l'IIASA, Cesare Marchetti a étudié le principe d'arbres producteurs d'hydrogène.

Il s'agit de remplacer les collecteurs et les cellules solaires, fort coûteux, par les feuilles de l'arbre. Des excroissances végétales formées sur le tronc, les galles, seraient programmées génétiquement pour produire de l'hydrogène à partir de l'énergie solaire captée par les feuilles. Cet hydrogène, sous-produit de la photosynthèse, serait ensuite recueilli dans les galles et canalisé jusqu'à un centre de stockage.

Dans ces grandes lignes, ce système existe déjà dans la nature : beaucoup d'insectes et de bactéries provoquent la formation de galles sur divers types de plantes. Dans un cas au moins, celui du rhizobium, une bactérie qui vit en symbiose avec les racines des légumineuses, il y a production d'hydrogène en quantité notable dans les galles, d'où il s'échappe dans l'atmosphère. Selon certaines estimations, les plantations de soja, aux Etats-Unis, perdent ainsi 30 milliards de m<sup>3</sup> d'hydrogène chaque année. Pour tirer parti de ces possibilités, il faudrait intégrer aux plantes une sorte de système collecteur : cela repose sur les progrès de l'ingénierie génétique.

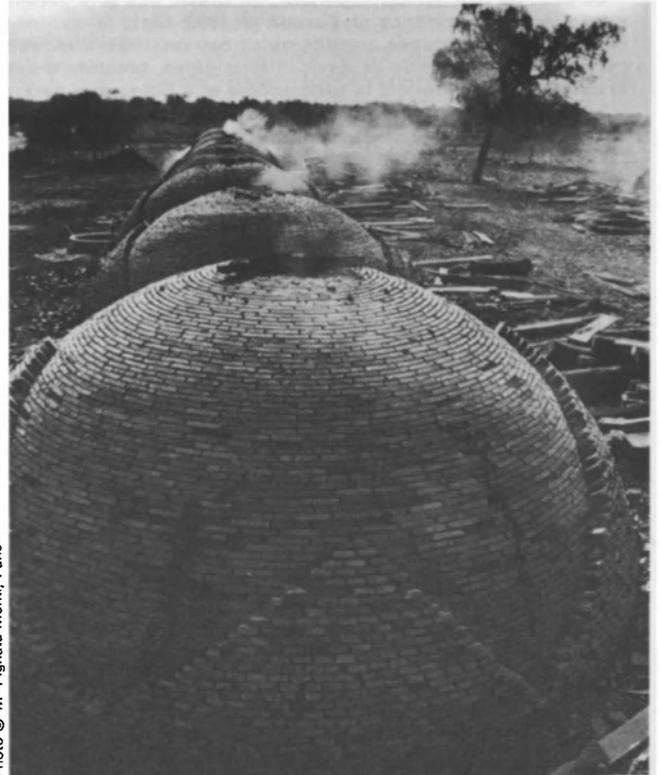


Photo © M. Pignata-Momti, Paris

Plus d'un tiers de la population mondiale dépend du bois pour la cuisson des aliments et le chauffage. Quarante-six pour cent du bois consommé chaque année dans les pays en développement est utilisé comme combustible et au moins la moitié de ce total sert à cuisson. Presque partout on adopte de plus en plus le charbon de bois comme combustible. En Tanzanie, par exemple, la proportion de charbon de bois dans le bois de chauffage, qui était de 3 pour cent en 1970, atteindra probablement 25 pour cent en l'an 2000. En principe cela pourrait être décourageant : lors de la préparation du charbon de bois, plus de la moitié de l'énergie du bois part en fumée. Toutefois ce combustible rend l'énergie du bois plus facile et moins chère à transporter. L'usage grandissant qu'on en fait résulte d'ailleurs de la distance croissante entre le lieu de récolte et l'utilisateur. On le préfère aussi pour sa chaleur régulière et concentrée, sa combustion sans fumée et facile à arrêter. Le charbon de bois peut aussi remplacer les combustibles fossiles, ce qui est, dans certains endroits, un besoin impératif. Malgré un faible rendement global, le charbon de bois, de toute évidence, servira de plus en plus à l'avenir à la cuisson des repas. Ci-dessus, fours pour la fabrication du charbon de bois en Argentine.

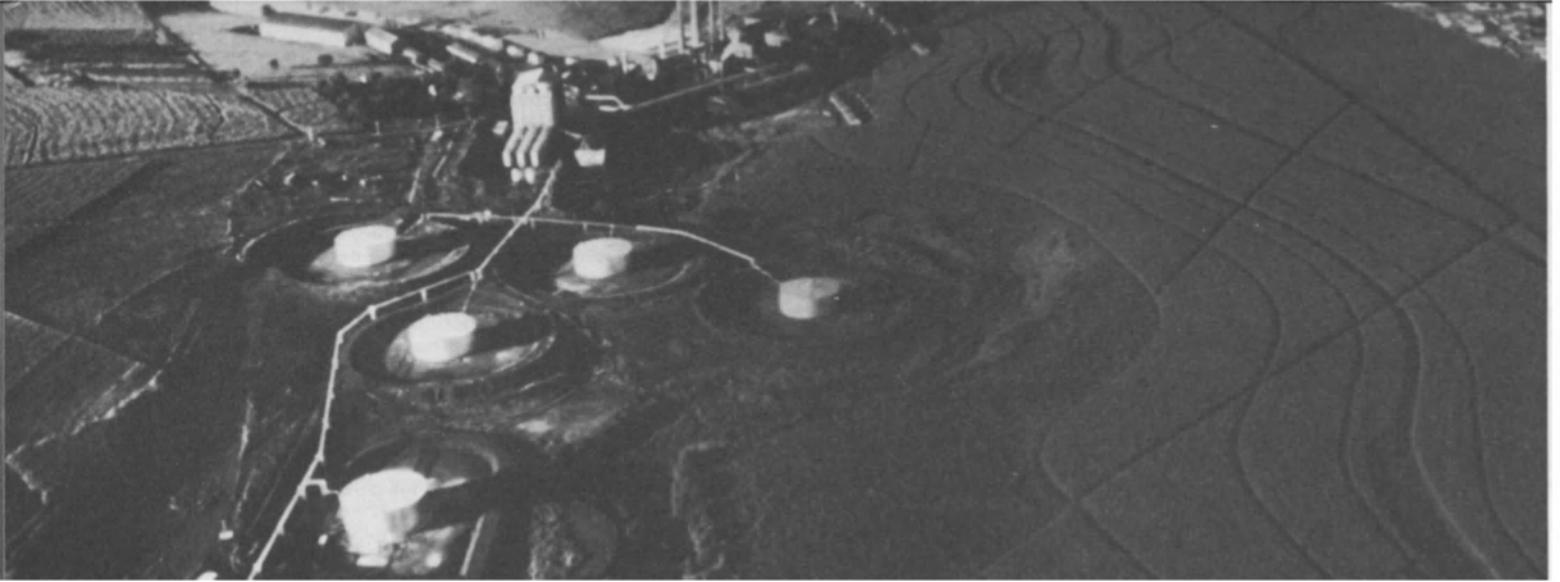


Photo Jonathan Blair © Woodfin Camp

Le système de conversion de la biomasse qui a le plus de succès — ce qui ne veut pas dire qu'il soit économiquement le plus justifié — est sans conteste celui qui consiste à produire de l'alcool éthylique (éthanol  $C_2H_5OH$ ) à partir de canne à sucre ou de maïs. Le producteur le plus important du monde, le Brésil (photo du haut), produit 3,2 milliards de litres d'alcool de canne à sucre, de sorgo et de manioc. L'alcool est mélangé à l'essence dans une proportion de 20 %, parce que les moteurs ordinaires de voiture n'exigent, à ce niveau, aucune adaptation. En cas de besoin, les voitures pourraient fonctionner uniquement à l'alcool moyennant certaines modifications.

Le coût de l'alcool est supérieur, au Brésil, aux prix généralement pratiqués pour l'essence en Europe en 1980. Mais on estime que le pays tire des avantages considérables des retombées indirectes de ce système : économie de devises étrangères, création d'emplois, encouragement donné à la technologie et à l'industrie nationales, etc.

Les Etats-Unis s'intéressent également de très près à l'éthanol. Ils se sont fixé pour objectif de produire, d'ici à 1982, environ 3,477 milliards de litres d'alcool à utiliser comme carburant. La plupart des distilleries se servent de maïs comme matière première. Parmi les autres pays qui s'intéressent à la distillation de produits végétaux à des fins énergétiques, on peut citer l'Australie (manioc) et la Nouvelle-Zélande (betterave).

Quelques économistes sont profondément inquiets de voir que l'on se propose d'utiliser des céréales alimentaires pour faire tourner les moteurs. Ils redoutent la conséquence d'un tel choix : aux riches la voiture, aux pauvres la faim, dans des pays où les terres servant habituellement aux cultures vivrières seront affectées à la production de carburant. On peut envisager plusieurs situations où la production présente un intérêt économique. Les pays en développement qui ont une production agricole excédentaire et un déficit en énergie, comme le Brésil, le Soudan et la Thaïlande, seront les plus fortement incités à développer de vastes programmes de production d'énergie à partir de la biomasse pour réduire leur dépendance à l'égard des importations d'énergie. Nombre des grands pays en développement, comme le Bangladesh et le Pakistan, sont importateurs nets à la fois de produits agricoles et d'énergie. Il est donc probable que, dans la plupart de ces pays, la production ne sera intéressante que si elle se fonde sur des matières de la biomasse excédentaires de coût faible, comme la mélasse et les déchets des cultures agricoles (ou la canne à sucre lors des périodes d'excédents mondiaux de sucre). Dans les pays où l'énergie est excédentaire, comme le Mexique, le Nigéria ou le Venezuela, l'incitation à lancer d'importants programmes de production d'énergie à partir de la biomasse est faible.

Sources *Forum du Développement*, mars 1981 et *Finances et Développement*, décembre 1980

# L'essence verte du Brésil

par **Benedicto Silva**

**A**UJOURD'HUI, alors que la planète entière est menacée par l'épuisement du pétrole comme source d'énergie, il existe un pays — le Brésil — qui semble en mesure d'être le premier à entrer dans l'ère post-pétrolière, sans abandonner son réseau routier ni diminuer la fabrication et l'utilisation de ses véhicules automoteurs. En effet, grâce à la production d'une matière organique végétale et à sa transformation en éthanol, le Brésil semble réunir les conditions nécessaires pour remplacer par de l'alcool, à partir de 1981, au moins le cinquième des hydrocarbures dont il a besoin. Et cette transition ne cessera de s'accélérer jusqu'à ce que le pays soit autosuffisant en matière de combustible renouvelable et produit de façon continue.

On a démontré, théoriquement et expérimentalement, que l'alcool-carburant, malgré son pouvoir calorifique plus faible que celui de l'essence, peut rivaliser avec celle-ci d'égal à égal : d'un point de vue purement énergétique, l'éthanol et l'essence sont équivalents. Utilisé par des moteurs spécialement conçus pour sa consommation, l'alcool produit 18 % d'énergie de plus par litre que l'essence ; en revanche, sa consommation comme combustible pour véhicules est supérieure de 15 à 20 % à celle de l'essence.

Cependant, un moteur spécialement fabriqué pour fonctionner avec de l'alcool peut se régler pour obtenir une combustion

complète du carburant. D'où une légère supériorité de l'éthanol sur l'essence dans le calcul du kilométrage au litre, outre l'extraordinaire avantage que suppose la réduction d'environ 50 % des gaz polluants.

Les matières premières dont le Brésil a besoin pour la production d'éthanol sur une grande échelle sont la canne à sucre, le manioc et autres plantes similaires. Quant à la productivité, la canne à sucre l'emporte sur le manioc par son meilleur rendement photosynthétique, c'est-à-dire qu'elle produit une plus grande quantité d'énergie par hectare cultivé. Mais, comme il s'agit d'une culture saisonnière, le cycle de production du manioc est inférieur à six mois par an, soit exactement le même que celui des plantations de canne à sucre.

Le manioc a pour avantage d'assurer le fonctionnement continu des distilleries, d'où l'utilité d'avoir recours aux deux plantes pour garantir l'autoapprovisionnement ininterrompu de combustible.

On a calculé que 2 % à peine de ses terres cultivables suffisent à assurer au Brésil la conquête de cette situation enviable : être le premier pays du monde autosuffisant en matière de combustible indéfiniment renouvelable.

D'autre part, les perspectives de travail pour mettre en œuvre un tel programme

seront sans doute assez importantes pour absorber toute la main d'œuvre disponible dans le pays. En outre, la plantation, la culture, la récolte, le transport, le broyage et la fermentation de la canne à sucre et du manioc sont des tâches qui n'exigent guère qu'une formation élémentaire. La préparation de la main d'œuvre nécessaire n'exige donc pas de campagnes de formation du personnel onéreuses et prolongées.

Pour ce qui est des coûts de transport — construction et fonctionnement d'un réseau de distribution de l'éthanol —, ils seront moins élevés que ceux de l'essence : le nouveau combustible peut être produit pratiquement dans tous les Etats du Brésil, contrairement au pétrole qui ne peut être extrait que là où il se trouve.

Enfin, on espère que le programme de l'alcool sera générateur dans les prochaines années de 250 000 à un million de nouveaux emplois, surtout dans le secteur agricole. Et il est naturel que la création de nouvelles sources de travail dans les zones rurales contribue à son tour, à réduire l'exode vers les villes, l'un des problèmes cruciaux des zones urbaines du pays. ■

**BENEDICTO SILVA**, du Brésil, directeur de l'Institut de documentation de la fondation Getulio Vargas, est le rédacteur de la version portugaise du *Courrier de l'Unesco*.

# Inde : le biogaz à l'épreuve des traditions

par Tushar Kanti Moulik

Photo Mark Edwards © Earthscan, Londres

**P**OUR faire face à l'énorme augmentation de la facture pétrolière et aux dangers d'inflation qui en résultent, le gouvernement indien a lancé une vaste campagne afin de généraliser la production de gaz méthane au moyen de petites installations familiales. On a offert divers avantages — subventions, facilités de crédit, etc. — aux cultivateurs disposés à supporter les frais de ces installations qui peuvent produire de deux à trois m<sup>3</sup> de gaz par jour. Or, les résultats de la campagne sont très inférieurs aux objectifs que les autorités s'étaient fixés : 5 ou 6000 unités par an ont été installées, au lieu de 20000. Pire, sur les 70000 unités de production existant dans le pays, on estime que 50 ou même 70 % fonctionnent mal ou ne fonctionnent pas.

Comment expliquer cet échec ? La technique de production de gaz de fermentation telle qu'on cherche à la répandre en Inde est pourtant considérée comme assez simple pour que n'importe quel artisan de village sache construire et entretenir les installations. Mais, en fait, si l'on étudie le dérou-

lement de la campagne, on constate qu'elle se heurte à quatre grands obstacles qui tiennent aux structures socio-économiques, aux pratiques et valeurs culturelles, à l'information relative au processus de fermentation (digestion anaérobie), et à l'état de la main-d'œuvre qualifiée.

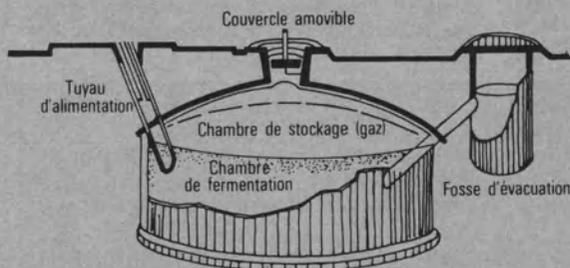
Pour produire de 2 à 3 m<sup>3</sup> de gaz, les unités finales de production vendues en Inde demandent une quantité de fumier correspondant à une étable de 3 ou 4 vaches. Au-dessous de cette capacité — et de cet apport en fumier — des installations ne seraient pas profitables. Il y a donc là un seuil technologique, de même qu'il y a un seuil financier : le coût de l'installation (5000 roupies environ).

Combien de familles en Inde peuvent-elles satisfaire à ces conditions, qu'il s'agisse du financement ou du cheptel ? Guère plus de 10 à 15 % de la population rurale, c'est-à-dire, dans le paysan, la couche supérieure des propriétaires de bétail. Ainsi, en raison même de ses exigences spécifiques, la technologie de la production familiale de

biogaz exclut de sa clientèle une très forte proportion de la population, composée de petits cultivateurs marginaux et de paysans sans terre.

Etroitement liées à cet aspect des structures socio-économiques, deux contraintes importantes apparaissent : elles concernent l'espace et l'eau. Une unité de production de 3 m<sup>3</sup> demande un terrain d'environ 30 m<sup>2</sup> pour la fosse à compost et l'installation elle-même. De surcroît, il est conseillé de placer cet ensemble dans un rayon de 7 m par rapport à la cuisine afin de fournir efficacement le gaz nécessaire à la cuisson des aliments. Or les villages indiens sont habituellement d'une telle densité, les habitations si serrées, les ruelles si étroites, que bien peu de paysans ont à proximité de leurs maisons l'espace suffisant pour une installation de biogaz.

L'eau aussi est une ressource rare dans de nombreux villages. Pour avoir une bonne production de biogaz, il convient d'ajouter quatre volumes d'eau pour cinq volumes de



En haut : Indienne faisant sa cuisine au bio-gaz. A droite : digesteur indien pour l'extraction du bio-gaz. Le fonctionnement régulier de l'installation demande un apport d'eau, ce qui peut représenter une gêne sérieuse dans les régions arides. La Chine, avec quelque sept millions d'appareils installés, tient la tête dans l'utilisation du bio-gaz. Ci-dessus : coupe d'un digesteur conçu en Chine.

Dessin Le Courrier de l'Unesco.  
Source : A. Van Buren, Londres



Photo Mark Edwards © Earthscan, Londres

bouse de vache afin d'obtenir le mélange propice à la fermentation. Dans des régions où l'eau manque, où il faut aller la chercher fort loin au puits, à la fontaine ou à la rivière, l'installation de gaz exige une corvée supplémentaire qui peut paraître excessive.

Enfin, et c'est peut-être un des plus importants facteurs économiques qui freinent l'adoption des installations de biogaz, les villageois ne voient généralement pas que ce nouveau combustible puisse être plus avantageux que ceux dont ils disposent déjà. L'Inde rurale utilise, pour la cuisine et le chauffage, les déchets agricoles, la bouse séchée et le bois mort. On n'imagine pas que ces combustibles puissent faire défaut. Un paysan du Rajasthan déclare par exemple : "Pourquoi se compliquer la vie avec ces machines à gaz alors qu'autour des villages on n'a qu'à ramasser du bois à brûler (en réalité : des buissons d'épineux) ?" Si on lui rappelle que ce combustible risque bientôt de disparaître, l'homme réplique : "Jusqu'à présent il y en a. On en a toujours trouvé. Pourquoi est-ce que ça disparaîtrait maintenant ?"

Autre facteur : les avantages directs d'une installation de biogaz, sous forme de gaz de chauffage et d'engrais, paraissent très abstraits puisque l'on n'en tire pas de bénéfice tangible : pas d'argent. L'appât du gain monétaire est en effet la grande motivation pour de vastes secteurs de la population rurale, et, dans ces conditions, la production de biogaz ne paraît guère intéressante.

A tous ces obstacles socio-économiques s'ajoutent un grand nombre de pratiques et de normes culturelles qui entravent sérieusement la diffusion du nouveau procédé. En premier lieu, bien des gens se révoltent à l'idée d'employer des excréments humains dans la production de gaz ou de faire la cuisine sur du gaz provenant d'une mixture qui en contiendrait.

Un autre obstacle d'ordre culturel, le plus grave peut-être, tient au statut de la femme et à son rôle dans le ménage. Il est clair que les femmes sont immédiatement les principales bénéficiaires de la production familiale de gaz. Ce combustible leur épargne des heures de travail abêtissant et malsain dans des cuisines enfumées et, en raccourcissant les temps de cuisson habituellement interminable et le récurage des pots et des marmites, leur procure enfin des loisirs. De surcroît, les ustensiles de cuisine s'usent moins vite, ce qui entraîne d'évidentes économies. Mais en général ces avantages ne paraissent

pas essentiels dans les ménages ruraux puisque en matière d'investissements les décisions sont prises par les hommes, lesquels ne jugent pas que l'amélioration du confort des femmes soit particulièrement urgente. C'est pourquoi on rencontre de nombreuses installations en panne, abandonnées faute d'entretien, et qui risquent de devenir irréparables.

Ce qui paraît encore pire dans les campagnes est que le bon usage du gaz exige une adaptation qui introduirait plus d'un changement dans les coutumes et pratiques traditionnelles. On se plaint par exemple des cuisinières à gaz sous prétexte que les *chapatis* (galettes) n'y grillent pas comme il faudrait, ou que les *dals* (plats de lentilles) mettent trop longtemps à cuire. On trouve de même que le gaz convient mal pour faire bouillir le lait parce qu'on a l'habitude de le laisser chauffer à feux doux toute la journée afin de le conserver... Bref, l'introduction du biogaz demande une série de modifications complexes dans des habitudes et des normes culturelles profondément enracinées, et de telles modifications sont toujours difficiles.

En dépit de tous les problèmes que nous venons d'énumérer, l'appareillage du gaz de fermentation est de plus en plus connu en Inde. Mais il est frappant de constater que les usagers potentiels et même ceux qui possèdent et utilisent déjà cet appareillage en comprennent très mal le fonctionnement. Il y a apparemment un mythe qui persiste en de nombreuses régions : la production de biogaz serait une opération magique qui fournirait des combustibles et des engrais à partir des déchets, gratuitement et sans demander aux gens le moindre effort. Il est clair que ces fabulations proviennent de l'insuffisance ou des erreurs de l'information qui circule. Or, étant donné que la technologie du biogaz est encore au stade exploratoire et que par conséquent le rendement n'en est pas encore fiable, on ne peut vaincre les attitudes de refus chez les usagers que s'il existe un échange parfait de connaissances et d'expériences entre ceux-ci et le personnel chargé de la promotion. Les fausses promesses, les renseignements incomplets ne feront que soulever des espoirs irréalistes pour aboutir finalement à une profonde méfiance.

Cette allusion à l'information nous amène au problème crucial de la main-d'œuvre nécessaire d'un bout à l'autre de l'entreprise de promotion. Pour se rendre compte de l'énormité des besoins en main-d'œuvre qualifiée il faut évaluer les problèmes de la diffusion des unités familiales de biogaz

dans le cadre de la décentralisation qui règne en matière d'énergie dans l'Inde rurale. On a beau s'obstiner à vanter la simplicité de la technologie actuelle du biogaz, le fait est que les installations, les réparations et l'entretien exigent une supervision très attentive et un encadrement de haut niveau. Or, dans la plupart des villages de l'Inde, ce genre de qualification n'est tout simplement pas disponible au plan local.

Voilà donc une liste de difficultés qui paraissent effrayantes. Mais on arrivera à les surmonter à condition de faire les efforts d'organisation appropriée et de planifier ces efforts. Dans ce domaine, au niveau opérationnel, rien ne sera plus important que d'assurer de manière continue un enseignement professionnel propre à former dans les collectivités des techniciens compétents. En dernière analyse, en effet, un réseau décentralisé d'énergie en zone rurale ne peut fonctionner que s'il est aussi indépendant que possible des ressources extérieures.

L'exemple de la Chine est sans doute significatif. Grâce à un processus continu de formation technique, les Chinois sont parvenus à doter chaque équipe de production d'un petit groupe de techniciens qualifiés, capables de prendre en mains le programme de promotion du biogaz. L'Inde a besoin d'une stratégie semblable. Il est absolument nécessaire que la planification se fasse au niveau local, en tenant compte des ressources locales, et que la population participe pleinement à l'ensemble du processus de planification, d'éducation et de gestion. Or c'est justement ce qui manque en Inde de nos jours. Mais pour que cette participation devienne possible et pour qu'elle se manifeste avec ténacité, il faut d'abord organiser un grand programme de formation, et le concevoir très largement. Car il ne s'agira pas seulement d'enseigner des gestes et des techniques, mais d'étudier tout ce qui se rapporte aux objectifs à atteindre : les difficultés réelles rencontrées localement, les méthodes locales de planification de l'énergie, la collecte et l'interprétation des données pertinentes, l'enseignement et le travail social, l'intégration des activités concernant le biogaz et l'énergie à l'ensemble des entreprises de développement.

**TUSHAR KANTI MOULIK**, de l'Inde, est professeur au Centre de gestion agricole de l'Institut indien de gestion, à Ahmedabad. Spécialiste du développement social et économique des communautés rurales, il a été consultant auprès de divers organismes nationaux et internationaux. Il collabore actuellement à divers projets de recherche pluridisciplinaire sur le développement rural de l'Inde.

## LECTURES

### Les Lusiades

de Luis de Camões  
trad. de Roger Bismut  
éd. Les Belles Lettres, Paris 1980.

### La soif et autres nouvelles

par Ivo Andrić  
éd. L'Age d'Homme, Lausanne 1981.

### Journal de Carnojevic

Par Milos Crnjanski  
éd. L'Age d'Homme, Lausanne 1970.

### Mer embrasée

par Pere Gimferrer  
éd. Seghers, Paris 1980.

### Annuaire de l'Afrique et du Moyen Orient

1981-82  
éd. Jeune Afrique, Paris 1981.

### Théorie de la pauvreté de masse

par John Kenneth Galbraith  
éd. Gallimard, Paris 1980.

### Négritude et Amérique latine

Colloque de Dakar 1974  
Nouvelles éditions africaines,  
Dakar, Abidjan 1978.

### 100 pages pour l'avenir

par Aurelio Peccei  
éd. du Seuil, Paris 1981.

### L'homme qui ne savait plus parler

par Sabadel  
Nouvelles éditions Baudinière, Paris

### Irak

Le pays du nouveau fleuve  
par Pierre Rossi et André Lepage  
éd. Jeune Afrique, Paris 1980.

### Turkmènes

par Marc Garanger-Hélène Larroche  
éd. Arthaud, Paris 1981.

# L'UNESCO ET LES SCIENCES

## Sélection de publications récentes

### METHODOLOGIE - RECHERCHE

Nouveau manuel de l'Unesco pour l'enseignement des sciences	299 p.	36 F
L'innovation dans l'enseignement des sciences	279 p.	40 F
La pensée scientifique	274 p.	65 F
La perception de l'environnement	134 p.	24 F
Tendances nouvelles de l'enseignement intégré des sciences. Vol. III La formation des maîtres	235 p.	30 F
Formation des utilisateurs de l'information scientifique et technique	201 p.	28 F
Manuel pour les systèmes et services d'information	299 p.	52 F
L'évolution de l'enseignement technique et professionnel.	126 p.	22 F
La conception des programmes de formation des ingénieurs	149 p.	28 F

La science et la technologie au service du développement en Asie	235 p.	24 F
La science et la technologie dans le développement des Etats arabes	333 p.	30 F
Domination ou partage. Développement endogène et transfert des connaissances	292 p.	45 F

### POLITIQUES SCIENTIFIQUES

Suicide ou survie ? Les défis de l'an 2000	210 p.	38 F
Biologie et éthique	180 p.	38 F
La science et les facteurs de l'inégalité	276 p.	38 F
Science, technique et développement. La démarche de l'Unesco	124 p.	14 F
Science, technologie et politique du gouvernement	196 p.	20 F
La science et la technologie au service du développement en Afrique	297 p.	28 F

### ENVIRONNEMENT - HYDROLOGIE

Tendances en matière de recherche et d'application de la science et de la technique pour le développement des zones arides	61 p.	18 F
La santé des océans	188 p.	34 F
La perception de l'environnement	134 p.	24 F
Ecosystèmes forestiers tropicaux	740 p.	144 F
La protection contre le risque sismique	366 p.	70 F

### REVUES SCIENTIFIQUES (trimestrielles)

<b>IMPACT.</b> Science et société : Les conséquences du développement scientifique pour l'individu, les nations et l'humanité. Abonnement 1 an : 56 F ; 2 ans : 90 F ; Le numéro : 16 F
<b>NATURE ET RESSOURCES.</b> Les recherches scientifiques relatives aux ressources et à la conservation de la nature. Abonnement 1 an : 30 F ; 2 ans : 50 F ; Le numéro : 9 F

### CARTES ET ATLAS SCIENTIFIQUES : Catalogue sur demande

## Pour vous abonner ou vous réabonner et commander d'autres publications de l'Unesco

**Vous pouvez commander les publications de l'Unesco chez tous les libraires en vous adressant directement à l'agent général (voir liste ci-dessous). Vous pouvez vous procurer, sur simple demande, les noms des agents généraux non inclus dans la liste. Les paiements des abonnements peuvent être effectués auprès de chaque agent de vente qui est à même de communiquer le montant du prix de l'abonnement en monnaie locale.**

**ALBANIE.** N. Sh. Botimeve Naim Frasher, Tirana. — **ALGÉRIE.** Institut pédagogique national, 11, rue Ali Haddad, Alger, Société nationale d'édition et diffusion (SNED), 3 bd Zirout Youcef, Alger. — **RÉP. FÉD. D'ALLEMAGNE.** Le Courrier de l'Unesco (allemand, anglais, français, espagnol). Mr. Herbert Baum Deutscher Unesco-Kurier Vertrieb Besaltstrasse 57 5300 BONN 3. Autres publications : S. Karger GmbH, Karger Buchhandlung, Angerhofstr. 9, Postfach 2, D-8034 Gernring/München. Pour les cartes scientifiques seulement : Geo Center Postfach 800830 Stuttgart 80. — **RÉP. DÉM. ALLEMANDE.** Buchhaus Leipzig, Postfach, 140, Leipzig Internationale Buchhandlungen, en R.D.A. — **ARGENTINE.** Libreria El Correo de la Unesco EDILYR S R L. Tucumán 1685 1050 Buenos Aires. — **AUTRICHE.** Buchhandlung Gerold and Co Graben 31 A-1011 Wien. — **BELGIQUE.** Ag pour les publications de l'Unesco et pour l'édition française du "Courrier" : Jean de Lannoy, 202, Avenue du Roi, 1060 Bruxelles, CCP 000-0070823-13. Edition néerlandaise seulement : N.V. Handelmaatschappij Keesing, Keesinglaan 2-18, 21000 Deurne-Antwerpen. — **RÉP. POP. DU BÉNIN.** Librairie nationale, B.P. 294, Porto Novo. — **BRÉSIL.** Fundação Getúlio Vargas, Editora-Divisão de Vendas, Caixa Postal 9 052-ZC-02, Praia de Botafogo, 188 Rio de Janeiro RJ. — **BULGARIE.** Hémus, Kantora Literatura, bd Rousky 6, Sofia. — **CAMEROUN.** Le secrétaire général de la Commission nationale de la République unie du Cameroun pour l'Unesco, B.P. n° 1600, Yaoundé. — **CANADA.** Editions Renouf Limitée, 2182, rue Ste Catherine Ouest, Montréal, Que H3H 1M7. — **CHILI.** Libreria La Biblioteca Alejandro, 1867 Casilla, 5602 Santiago 2. — **CHINE.** China National Publications Import Corporation, West Europe Dept., P.O. Box 88, Pékin. — **COLDMBIE.** Cruz del Sur Calle 22 n° 6-32, Instituto Colombiano de Cultura, Carrera 3A n° 18/24 Bogota. — **RÉP. POP. DU CONGO.** Librairie populaire B.P. 493 Brazzaville ; Commission nationale congolaise pour l'Unesco, B.P. 577, Brazzaville. — **CÔTE-D'IVOIRE.** Centre d'édition et de diffusion africaines, B.P. 4541, Abidjan-Plateau. — **DANEMARK.** Munksgaard export and subscription service 35 Norre Sogade 1370 Copenhagen K. — **ÉGYPTE (RÉP. ARABE D').** National Centre for Unesco Publications, n° 1, Talaat Harb Street, Tahrir Square, Le

Caïre — **ESPAGNE.** MUNDI-PRENSA Libros S.A., Castelló 37, Madrid 1, Ediciones Liber. Apartado 17, Magdalena 8, Ondárroa (Viscaya) ; DONAIRE, Aptdo de Correos 341, La Coruna ; Libreria Al-Andalus, Roldana, 1 y 3, Sevilla 4. Libreria CASTELLS, Ronda Universidad 13, Barcelona 7 ; Editorial Fenicia, Cantelajas, 7 "Retiro", Puerta de Hierro, Madrid 35. — **ÉTATS-UNIS.** Unipub, 345, Park Avenue South, New York, N.Y. 10010. — **FINLANDE.** Akateeminen Kirjakauppa, Keskuskatu 1, 00100 Helsinki. — **FRANCE.** Librairie Unesco, 7, place de Fontenoy, 75700 Paris. C.C.P. 12 598 48. — **GRÈCE.** Librairies internationales. — **RÉP. POP. REV. DE GUINÉE.** Commission nationale guinéenne pour l'Unesco, B.P. 964, Conakry. — **HAÏTI.** Librairie A la Caravelle, 26, rue Roux, B.P. 111, Port-au-Prince. — **HAUTE-VOLTA.** Lib. Attie B P 64, Ouagadougou. — **Librairie Catholique « Jeunesse d'Afrique ».** Ouagadougou. — **HONGRIE.** Akadémiai Könyvesbolt, Váci U.22, Budapest V., A K.V. Koryvtárosok Boltja. Népköztasasag utja 16, Budapest VI. — **INDE.** Orient Longman Ltd. : Kamani Marg, Ballard Estate, Bombay 400 038 ; 17 Chittaranjan Avenue, Calcutta 13 ; 36a Anna Salai, Mount Road, Madras 2. B-3/7 Asaf Ali Road, Nouvelle-Delhi 1, 80/1 Mahatma Gandhi Road, Bangalore-560001, 3-5-820 Hyderguda, Hyderabad-500001. Publications Section, Ministry of Education and Social Welfare, 511, C-Wing, Shastrî Bhavan, Nouvelle-Delhi-110001 ; Oxford Book and Stationery Co., 17 Park Street, Calcutta 700016 ; Scindia House, Nouvelle-Delhi 110001. — **IRAN.** Commission nationale iranienne pour l'Unesco, av Iranchahr Chomali N° 300 ; B.P. 1533, Téhéran ; Kharazmie Publishing and Distribution Co. 28 Vessal Shrazi St, Enghélab Avenue, P.O. Box 314/1486, Téhéran. — **IRLANDE.** The Educational Co. of Ir. Ltd., Ballymount Road Walkinstown, Dublin 12. — **ISRAËL.** Emanuel Brown, formerly Blumstein's Bookstores ; 35, Allenby Road et 48, Nachlat Benjamin Street, Tel-Aviv ; 9 Shlomzion Hamalka Street, Jérusalem. — **ITALIE.** Licosa (Libreria Commissionaria Sansoni, S p A) via Lamarmorata, 45, Casella Postale 552, 50121 Florence. — **JAPON.** Eastern Book Service Shuhwa Toranomon 3 Bldg, 23-6 Toranomon 3-chome, Minato-ku, Tokyo 105 — **LIBAN.** Librairies Antoine, A. Naoufal et Frères ; B.P. 656, Beyrouth. — **LUXEMBOURG.** Librairie Paul Bruck, 22, Grande-Rue, Luxembourg. — **MADAGASCAR.** Toutes les publications : Commission nationale de la Rép. dém. de Madagascar pour l'Unesco, Ministère de l'Éducation nationale, Tananarive. — **MALAISIE.** University of Malaya Co-operative Bookshop, Kuala Lumpur 22-11 — **MALI.** Librairie populaire du Mali, B.P. 28, Bamako. — **MAROC.** Librairie « Aux belles images », 282, avenue Mohammed-V, Rabat, C.C.P. 68-74. « Courrier de l'Unesco » : pour les membres du corps enseignant : Commission nationale marocaine pour l'Unesco 19, rue Oqba, B.P. 420, Agdal, Rabat (C.C.P. 324-45). — **MARTINIQUE.** Librairie « Au Boul' Mich », 1, rue Perrinon, et 66, av. du Parquet, 972, Fort-de-France. — **MAURICIE.** Nalanda Co. Ltd., 30, Bourbon Street, Port-Louis. — **MEXIQUE.** SABSA, Servicios a Bibliotecas, S.A., Insurgentes Sur n° 1032-401, México 12. Libreria El Correo de la Unesco,

Actipán 66, Colonia del Valle, México 12 DF — **MONACO.** British Library, 30, boulevard des Moulins, Monte-Carlo. — **MOZAMBIQUE.** Instituto Nacional do livro e do Disco (INLD), Avenida 24 de Julho, 1921 1/c e 1º andar, Maputo — **NIGER.** Librairie Mauclert, B.P. 868, Niamey. — **NORVÈGE.** Toutes les publications : Johan Grundt Tanum (Booksellers), Karl Johans gate 41/43, Oslo 1. Pour le « Courrier » seulement : A.S. Narvenses Litteraturjeneste, Box 6125 Oslo 6 — **PAKISTAN.** Mirza Book Agency, 65 Shahrah Quaid-i-azam, Box 729 Lahore 3 — **PARAGUAY.** Agencia de diarios y revistas, Sra Nelly de Garcia Astillero, Pte. Franco N° 580 Asunción. — **PAYS-BAS.** « Unesco Koerier » (Edition néerlandaise seulement) Keesing Boeken B.V., Postbus 1118, 1000 B C Amsterdam. Agent pour les autres éditions et toutes les publications de l'Unesco : N.V. Martinus Nijhoff, Lange Voorhout 9, 's-Gravenhage — **POLOGNE.** ORPAN-Import Palac Kultury, 00-901 Varsovie, Ars-Polona-Ruch, Krakowski-Przedmieście N° 7, 00-068 Varsovie. — **PORTUGAL.** Dias & Andrade Ltda. Livraria Portugal, rua do Carmo, 70, Lisbonne. — **ROUMANIE.** ILEXIM Romlibri, Str. Biserica Armei N° 5-7, P.O. B. 134-135, Bucarest. Abonnements aux périodiques : Rompresfiatela calea Victoria 29, Bucarest. — **ROYAUME-UNI.** H.M. Stationery Office P.O. Box 569, Londres S.E.1. — **SÉNÉGAL.** La Maison du Livre, 13, av. Roume, B.P. 20-60, Dakar, Librairie Clairafrique, B.P. 2005, Dakar, Librairie « Le Sénégal » B.P. 1954, Dakar. — **SEYCHELLES.** New Service Ltd., Kingsgate House, P.O. Box 131, Mahé. — **SUÈDE.** Toutes les publications : A/B C.E. Fritzes Kungl Hovbokhandel, Regeringsgatan, 12, Box 16356, 103-27 Stockholm, 16. Pour le « Courrier » seulement : Svenska Förförbundet, Skolgrand 2, Box 150-50, S-10465 Stockholm-Postgiron 184692. — **SUISSE.** Toutes publications. Europa Verlag, 5, Ramstrasse, Zurich, C.C.P. 80-23383. Librairie Payot, 6, Rue Grenus, 1211, Genève 11. C.C.P. : 12.236. — **SYRIE.** Librairie Sayegh Immeuble Diab, rue du Parlement, B.P. 704, Damas. — **TCHÉCOSLOVAQUIE.** S.N.T.L., Spalena 51, Prague 1 (Exposition permanente) ; Zahracni Literatura, 11 Soukenicka, Prague 1. Pour la Slovaquie seulement : Alfa Verlag Publishers, Hurbanovo nam 6, 893 31 Bratislava — **TOGO.** Librairie Évangélique, B.P. 1164, Lomé, Librairie du Bon Pasteur, B.P. 1164, Lomé, Librairie Moderne, B.P. 777, Lomé. — **TRINIDAD ET TOBAGO.** Commission Nationale pour l'Unesco, 18 Alexandra Street, St. Clair, Trinidad, W.I. — **TUNISIE.** Société tunisienne de diffusion, 5, avenue de Carthage, Tunis. — **TURQUIE.** Haset Kitapevi A.S., Istiklal Caddesi, N° 469, Posta Kutusu 219, Beyoglu, Istanbul. — **U.R.S.S.** Mejdunarodnaya Kniga, Moscou, G-200 — **URUGUAY.** Editorial Losada Uruguayua, S.A. Libreria Losada, Maldonado, 1092, Colonia 1340, Montevideo. — **YOUgoslavIE.** Jugoslovenska Knjiga, Trg Republike 5/8, P.O. B. 36, 11-001 Belgrade. Drazna Zaloza Slovenje, Titova C 25, P.O. B 50, 61-000 Ljubljana. — **RÉP. DU ZAIRE.** La librairie, Institut national d'études politiques, B.P. 2307, Kinshasa Commission nationale de la Rép. du Zaïre pour l'Unesco, Ministère de l'Éducation nationale, Kinshasa



Cette image de la surface terrestre, avec ses rides, ses tourbillons, ses cicatrices, a été obtenue à partir de deux photographies (en fausses couleurs) prises par satellite du bassin de Tsaidam, en Chine, où l'on expérimente la télédétection par satellite pour la prospection pétrolière. L'énergie du pétrole et des combustibles fossiles fut créée il y a des millions d'années par le soleil. Devant la menace d'épuisement de ces combustibles et les besoins croissants d'énergie, on s'efforce aujourd'hui de diversifier les sources d'énergie en faisant davantage appel à ses formes nouvelles et renouvelables.