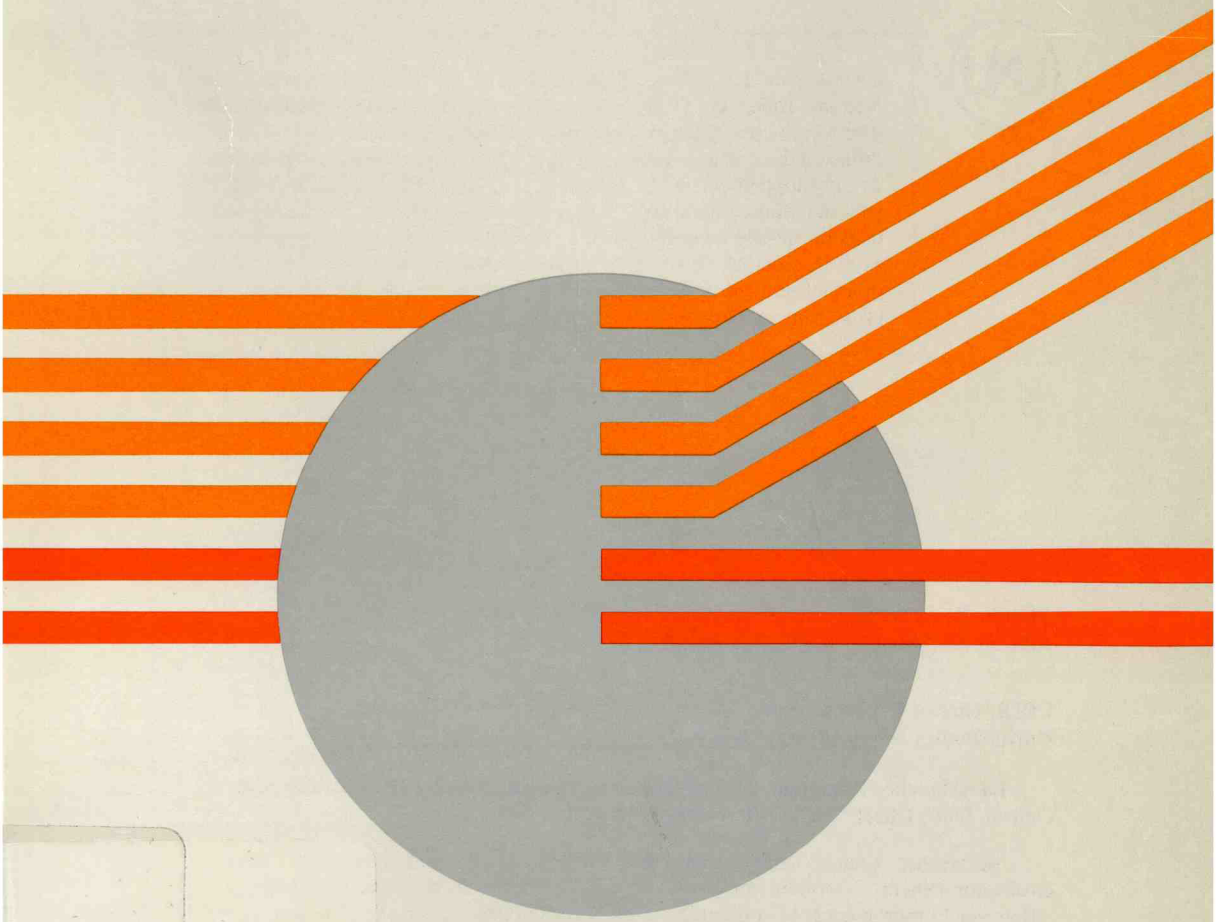
20744

La recherche énergétique

Orientations et enjeux pour les pays en développement





Le Centre de recherches pour le développement international, société publique créée en 1970 par une loi du Parlement canadien, a pour mission d'appuyer des recherches visant à adapter la science et la technologie aux besoins des pays en développement; il concentre son activité dans cinq secteurs : agriculture, alimentation et nutrition; information; santé; sciences sociales et communications. Le CRDI est financé entièrement par le Parlement canadien, mais c'est un Conseil des gouverneurs international qui en détermine l'orientation et les politiques. Établi à Ottawa (Canada), il a des bureaux régionaux en Afrique, en Asie, en Amérique latine et au Moyen-Orient.



L'Université des Nations Unies a été créée par l'Assemblée générale des Nations Unies en 1972 pour former une communauté internationale d'universitaires engagés dans la recherche, la formation avancée et la diffusion des connaissances sur les problèmes urgents de la survie humaine, du développement et du bien-être. Ses principaux domaines d'action sont le maintien de la paix et le règlement de conflits, le développement dans un monde en changement et la science et la technologie en rapport avec le bien-être humain. L'université fonctionne à l'aide d'un réseau mondial de centres de recherche et de formation supérieure. Son siège, où se font planification et coordination, se trouve à Tokyo, au Japon.

©Centre de recherches pour le développement international 1987
Adresse postale : C.P. 8500, Ottawa (Ontario) Canada K1G 3H9

CRDI, Ottawa CA Groupe de recherche sur l'énergie
Université des Nations Unies, Tokyo, Jp

IDRC-250f

La recherche énergétique : orientations et enjeux pour les pays en développement. Ottawa, Ont., CRDI, 1987. ix + 206 p. : ill.

/Recherche/, /sources d'énergie/, /demande énergétique/, /économies d'énergie/, /pays en développement/ — /combustibles/, /technologie/, /sources d'énergie renouvelables/, /effets sur l'environnement/, /organisation de la recherche/.

CDU: 620.9.001.5 ISBN: 0-88936-480-x

Révision : Jean-Daniel Dupont

Édition microfiche offerte sur demande.

This publication is also available in English.

IDRC-250f

La recherche énergétique

Orientations et enjeux pour les pays en développement

Groupe de recherche sur l'énergie

Ce rapport fait partie d'un projet financé par le Centre de recherches pour le développement international, Ottawa, Canada, et l'Université des Nations Unies, Tokyo, Japon. Les opinions émises dans cette publication n'engagent que la responsabilité des auteurs. La mention d'une marque déposée ne constitue pas une sanction du produit ; elle ne sert qu'à informer le lecteur.

Le Groupe de recherche sur l'énergie

Ashok V. Desai
Djibril Fall
José Goldemberg
José Fernando Isaza
Ali Kettani
Ho Tak Kim
Mohan Munasinghe
Frederick Owino
Amulya Reddy
Carlos E. Suarez
Zhu Yajie

Résumé

Le rapport officiel du Groupe de recherche sur l'énergie fait un bilan de la recherche en ce domaine et propose des priorités pour les pays en développement. Trois prémisses sont d'abord posées : la recherche énergétique doit être liée à des recherches économiques et sociales globales, les sources énergétiques doivent être étudiées dans le contexte de la demande d'énergie, enfin, l'économie d'énergie est aussi importante que la production d'énergie.

Dans sa première partie le rapport examine l'environnement de la recherche dans les pays en développement et le rôle que jouent les gouvernements, les instituts de recherche, les producteurs et les agences internationales de financement. On y aborde différentes méthodes de gestion de la demande d'énergie et de l'économie d'énergie, des exemples servant à illustrer les avantages de certains équipements communément utilisés.

Le Groupe va jusqu'à définir des priorités de recherche pour certaines sources d'énergie — liquides, gazeuses et solides — de même que pour l'énergie thermale, la force motrice et l'électricité. Parmi les nombreux effets négatifs de la production et de l'utilisation de l'énergie sur l'environnement, le rapport retient plus particulièrement trois problèmes environnementaux : le déboisement et la désertification, l'effet de serre et les pluies acides. Les trois derniers chapitres du rapport résument les conclusions générales du Groupe.

Abstract

The final report of the Energy Research Group surveys energy research and suggests priorities for developing countries. The report is based on three premises: energy research must be related to research on the entire economy and society; energy sources must be studied in the context of demand for them; and energy saving is as important as energy production.

The report begins by examining the environment for research in developing countries and the role played by governments, research institutions, producers, and international funding agencies. Demand management and conservation are outlined and illustrated with examples of opportunities for certain common types of equipment.

The Group goes on to pinpoint research priorities for various energy sources — liquid, gaseous, and solid — as well as thermal energy, motive power, and electricity. Of the many pervasive environmental effects of energy production and use, the report focuses most closely on three environmental issues related to energy: deforestation and desertification, the greenhouse effect, and acid rain. The general conclusions of the report are summarized in three final chapters.

Resumen

El informe final del Grupo de Investigaciones Energéticas examina las investigaciones sobre energía y sugiere prioridades para los países en desarrollo. El informe está basado en tres premisas: las investigaciones energéticas deben estar relacionadas con las investigaciones sobre todos los espectos de la economía y de la sociedad; las fuentes de energía deben estudiarse dentro del contexto de su demanda; y el ahorro de energía tiene tanta importancia como la producción de energía.

El informe comienza analizando las condiciones imperantes para la realizacíon de investigaciones en los países en vías de desarrollo y el papel de los gobiernos, instituciones de investigación, productores y agencias internacionales que otorgan fondos. Se esbozan varios enfoques relativos a la gestión de la demanda de energía y a la conservación de energía, ilustrados con ejemplos de las oportunidades existentes para ciertos tipos de equipos.

El Grupo continúa señalando prioridades de investigaciones para varias fuentes de energía — líquidas, gaseosas y sólidas — así como energía térmica, fuerza motriz y electricidad. Entre los muchos efectos ambientales globales de la producción y uso de energía, el informe hace énfasis sobre todo en tres problemas ambientales relacionados con la energía: la despoblación forestal y el avance de los desiertos; el efecto de invernadero, y las lluvias ácidas. Las conclusiones generales del informe se resumen en tres capítulos finales.

TABLE DES MATIÈRES

Préface vii

Remerciements ix

Chapitre 1. Introduction 1
- Prémisses de base 2
- Champ d'observation 3
- Structure 4

Chapitre 2. L'approche du Groupe 6
- Points de départ 7
- Hypothèses normatives 9
- Les grandes incertitudes 12

Chapitre 3. La recherche et son environnement 15
- Les administrations publiques 17
- Les producteurs 25
- Les établissements de recherche 34
- Les organismes internationaux d'aide 38

Chapitre 4. Gestion et analyse de la demande 44
- La demande globale 47
- La demande locale 52
- Mesures axées sur la demande 54
- L'agriculture 60
- L'industrie 68
- Les transports 72
- Les ménages 78

Chapitre 5. Économie d'énergie 86
- Les moteurs électriques 88
- Les moteurs à combustion interne 89
- Les moteurs à combustion externe 91
- Les moteurs à cycle Brayton 92
- Les chaudières 92
- Les poêles à combustible solide 95

Chapitre 6. Les combustibles liquides 99
- Le pétrole 101
- Les alcools 107

Chapitre 7. Les combustibles gazeux 111
- Le gaz naturel 112
- Le biogaz 114
- Le gaz de gazogène 116
- L'hydrogène 118

Chapitre 8. Les combustibles solides 122
Le charbon 124
Le charbon de bois 129
La biomasse 132
Chapitre 9. Autres sources d'énergie thermique 135
L'énergie géothermique 136
L'énergie thermique solaire 136
Chapitre 10. L'électricité 140
Réglementation, gestion et organisation du secteur de l'énergie 140
Optimisation des opérations, de la tarification et de la planification des investissements 143
Les réseaux photovoltaïques solaires 145
L'électricité thermique solaire 147
Production d'énergie éolienne 147
Chapitre 11. Sources d'énergie motrice 149
L'énergie éolienne 150
L'énergie humaine 152
Chapitre 12. Effets sur l'environnement 154
Déboisement et désertification 155
L'effet de serre 158
Les pluies acides 163
Chapitre 13. Les conditions préalables 167
Utilisateurs éclairés 168
Accumulation à long terme des connaissances 169
Le directeur éclairé 169
Le financement 169
Chapitre 14. Les utilisations 171
Les liens structuraux 172
La substitution interénergétique 172
L'économie d'énergie 173
Chapitre 15. Les ressources 174
Ressources sensibles aux forces du marché 175
Ressources d'exploitation coûteuse 176
Bibliographie 177
Annexe 1 : Membres du Groupe de recherche sur l'énergie 190
Annexe 2 : Auteurs des rapports de synthèse commandés par le Groupe de recherche sur l'énergie 193
Annexe 3 : Membres du comité de lecture du rapport final du Groupe de recherche sur l'énergie et des rapports spécialement commandés 196
Index des auteurs 198
Index thématique 202

Préface

En 1981, le Centre de recherches pour le développement international (CRDI) menait une étude préliminaire sur les problèmes énergétiques des pays en développement et sur la réponse qu'y apportent les organismes subventionnaires. Entre autres objectifs, l'étude visait à explorer de nouvelles stratégies que le CRDI pourrait adopter pour appuyer la recherche énergétique. Or, l'étude démontre que, même si les pays en développement et les organismes furent nombreux à participer activement à ce type de recherche, la conception même et la coordination des travaux sont souvent de qualité inférieure. Plus encore, la recherche ne correspond généralement pas aux besoins des pays en développement.

L'une des conclusions de l'étude veut que les activités de recherche aient davantage porté sur l'aspect matériel que sur la viabilité sociale et économique des techniques appropriées. Il faut cependant reconnaître que certaines études ont porté sur la planification énergétique, mais il s'agissait surtout d'assistance technique sans apport indigène valable. Une deuxième observation se dégage de l'étude : une grande part de l'aide étrangère consacrée à la recherche énergétique a été utilisée dans les pays industrialisés; même la portion de l'aide utilisée dans les pays en développement était directement sous mainmise étrangère. Dernière conclusion, on a eu l'impression que les responsables ignoraient tout des affectations globales à la recherche énergétique et des objectifs de celle-ci. Les interventions des organismes subventionnaires ont donc souffert d'un manque de coordination, et le choix des projets de recherche est essentiellement resté ponctuel. En conséquence, la qualité des travaux de recherche variait considérablement, à un point tel que la majorité des travaux entrepris n'avait selon toute vraisemblance qu'un impact limité sur les besoins énergétiques des pays en développement. Suite à de telles conclusions, le CRDI a entrevu les avantages qu'il y avait à prendre des mesures à la fois sérieuses et indépendantes pour réexaminer en profondeur les stratégies de la recherche énergétique qui touchent directement les pays en développement, et à formuler des recommandations concrètes pour ce type de recherche dans les pays en développement.

La Conférence des Nations Unies sur les sources d'énergie nouvelles et renouvelables, tenue à Nairobi en août 1981, est venue ajouter un argument supplémentaire en faveur du projet envisagé. Lors de cette conférence, le Très Honorable Pierre Elliott Trudeau, alors Premier Ministre du Canada, a souligné l'importance de la recherche pour régler les problèmes d'énergie des pays en développement. Monsieur Trudeau annonçait en même temps une subvention additionnelle de 10 millions de dollars canadiens au CRDI pour qu'il puisse accroître son aide à la recherche énergétique. Le présent rapport est le fruit d'un projet financé par le CRDI grâce à une partie de ce fonds spécial.

En avril 1982, le CRDI était l'hôte d'une réunion d'organismes subventionnaires engagés dans la recherche énergétique. Présidée par Ivan Head et Enrique Iglesias, la réunion a entériné les conclusions de l'étude, soit le morcellement et l'orientation sur les aspects matériels du financement de la recherche. Les participants ont discuté de nouveaux mécanismes susceptibles de rendre la recherche plus

efficace, en particulier du principe d'un comité technique consultatif, soit un groupe de haut niveau chargé de discuter des orientations de la recherche énergétique. La réunion ayant confirmé au CRDI le bien-fondé de son projet, celui-ci décidait alors de demander l'avis d'un groupe de spécialistes de l'énergie du Tiers-Monde sur les priorités de la recherche en ce domaine.

Pendant ce temps, l'Université des Nations Unies (UNU) effectuait une étude sur les techniques propres aux énergies renouvelables et convoquait, en janvier 1979, une conférence sur les énergies de remplacement. La conférence fut le point de départ de travaux sur le concept de systèmes intégrés d'énergie pour le milieu rural, concept qui sous-tend divers aspects : social, économique, culturel, environnemental, sanitaire et technique. Les participants élaborèrent aussi un programme de recherche sur la planification et les politiques en matière d'énergie, qui privilégiait la demande énergétique et la satisfaction des besoins humains essentiels. Suite à ses propres activités et à sa participation active à la conférence de Nairobi, l'UNU en vint à la conclusion qu'une évaluation fiable et objective de la recherche et de la technologie énergétiques dans le Tiers-Monde s'imposait et qu'elle devait, pour mener à bien cette évaluation, promouvoir la formation d'un groupe d'étude sur la recherche et la technologie énergétiques.

Après une série de discussions sur le sujet, l'UNU se joignait au CRDI pour créer le Groupe de recherche sur l'énergie, première étape pour déterminer les domaines prioritaires parmi ceux qui devaient être étudiés individuellement par la suite. On élabora donc un mandat détaillé et ambitieux, couvrant tout aussi bien les aspects politiques que techniques du secteur énergétique.

Le Groupe a préparé le présent rapport dans le cadre de son mandat. Son rapport ne se contente pas uniquement d'indiquer les priorités, suivant le projet initial du CRDI et de l'UNU; il brosse un bilan officiel des connaissances sur la recherche énergétique et ses applications; il analyse les causes de succès autant que d'échecs des stratégies de recherche; il détermine lesquelles peuvent être retenues. Enfin, le Groupe a collaboré à la venue d'un usager bien informé; c'était là son objectif.

Au cours des années 80, en même temps que les prix du pétrole chutaient, l'intérêt et les investissements des milieux publics et des donateurs pour la recherche énergétique diminuaient. Comme l'indique cependant le rapport du Groupe, le processus du développement passe par des étapes énergétiques; en ce sens, les pays en développement ont connu des problèmes énergétiques bien longtemps avant que n'éclate la crise du pétrole, et ils connaîtront sans aucun doute d'autres problèmes encore bien après cette même crise. L'intérêt du présent rapport va donc au-delà des problèmes actuels. Enfin, l'approche adoptée par le Groupe dans la préparation de son rapport constitue un modèle que l'on pourrait appliquer à d'autres sphères de connaissances.

Le Centre de recherches pour le développement international et l'Université des Nations Unies présentent le rapport du Groupe à tous les usagers de la recherche énergétique, celle qui porte sur les pays en développement et celle qui est menée sur place : gouvernements, organismes subventionnaires, chercheurs et, bien sûr, ceux et celles qui désirent contribuer, de façon appropriée et pertinente, aux efforts déployés par les pays en développement pour répondre à leurs besoins en énergie.

Ivan L. Head, Président
Centre de recherches
pour le développement international

Soedjatmoko, Recteur
Université des
Nations Unies

Remerciements

Notre plus vive reconnaissance s'adresse à Pam Dagenais, adjointe de projet au secrétariat du Groupe. Assister à des réunions dans les coins les plus reculés du monde est une corvée que les procédures bureaucratiques rendent encore plus insupportable. Pam n'a pourtant pas ménagé ses efforts pour atténuer et humaniser les rigueurs de l'appareil administratif. Tous les membres du Groupe se souviennent de son amabilité et de son attention. Elle a dirigé le secrétariat du Groupe avec une grande minutie et a facilité les relations avec la Division des sciences sociales, le bureau du Contrôleur général et Trésorier et celui du Secrétaire et Conseiller juridique du Centre de recherches pour le développement international (CRDI). Nous les remercions vivement de leur collaboration. Judy Lewis, dont nous avons apprécié la bonne humeur communicative, assistait Pam.

Nous remercions aussi Ann Simpson et Wardie Leppan, ces adjoints de recherche exceptionnels qui, avec l'aide de Zosia Szpakowska, ont mis sur pied une bibliothèque très utile en un court laps de temps. La Division des sciences de l'information du CRDI les a grandement aidés dans leur travail.

Ralph Torrie, notre coordonnateur adjoint, a savamment harmonisé l'administration et, plus particulièrement, la lecture et la révision des études. Nous sommes très reconnaissants envers les auteurs des études commandées par le Groupe (annexe 2) et envers les membres du comité de lecture (annexe 3), dont la collaboration aussi empressée que généreuse est allée bien au-delà de la simple courtoisie qui sied à leur profession.

La conception même du projet du Groupe de recherche sur l'énergie est grandement attribuable à Andrew Barnett, Maurice Levy et Tony Tillett. Le succès du projet illustre le bien-fondé de leur vision et de leur clairvoyance. En tant qu'observateurs représentant le CRDI et l'Université des Nations Unies respectivement, Amitav Rath et Walter Shearer ont facilité nos relations avec les organismes subventionnaires.

Nous désirons exprimer notre gratitude spéciale à ceux et celles qui ont collaboré à la rédaction du présent rapport, bien qu'aucun d'entre eux ne puisse reconnaître sa propre contribution : Andrew Barnett, Ramesh Bhatia, Bharat Bhushan, Susan Bogach, John Chesshire, Peter Elkan, Gilena Graça, Steven Graham, José Roberto Moreira, Adilson de Oliveira et John Surrey.

Finalement, nous sommes reconnaissants envers nos ambassadeurs itinérants, Bharat Bhushan, Adriana Bianchi, Adam Kahane, Silas Lwakabamba et José Eddy Torres, et envers les consultants qui ont travaillé plus étroitement avec nous, Nikhil Desai et Tony Prior.

Il nous est impossible de mentionner tous ceux et celles envers qui nous sommes redevables. Plus de 900 personnes ont apporté leur contribution tout au cours du projet; leur aide et leur zèle furent sans mesure. Si le présent rapport répond à certaines de leurs attentes, nous en serions particulièrement satisfaits.

Chapitre 1 Introduction

Le Groupe de recherche sur l'énergie a été formé à la demande du Centre de recherches pour le développement international et de l'Université des Nations Unies en vue de faire le point sur la recherche énergétique et de proposer des priorités en la matière pour les pays en développement. Le présent rapport, qui entend répondre à ce mandat, se fonde sur trois prémisses : (1) la recherche énergétique doit être liée à celle qui porte sur l'économie et la société dans son ensemble ; (2) l'étude des sources d'énergie doit se faire dans le contexte de la demande en énergie ; et (3) l'économie d'énergie est aussi importante que la production d'énergie. Le rapport s'inspire en grande partie d'informations publiées. Il ne traite pas des questions de génie ou de technique, ne tient pas compte des variations régionales et nationales et ne touche pas aux domaines où la confidentialité des renseignements ou le manque de connaissance rendent difficile tout jugement de valeur sur l'état de la recherche.

Le Groupe de recherche sur l'énergie a été formé en août 1983 pour accomplir le mandat suivant :

1) Effectuer un examen approfondi de la recherche et de la technologie en matière d'énergie dans les pays en développement.
2) Recenser les pays en développement actuellement en mesure de mener, financer, diffuser et utiliser des travaux de recherche et de développement dans le domaine de l'énergie, ou susceptibles de le faire.
3) Faire le point sur la recherche et la technologie énergétiques des pays industrialisés, évaluer leur pertinence pour les pays en développement, les conditions qui en régissent l'accès et les moyens de les utiliser pour le plus grand bien des pays en développement.
4) Diffuser les points de vue du Groupe et ceux de ses membres, inviter les spécialistes à se prononcer sur la question et susciter un échange sur les questions énergétiques auxquelles les pays en développement sont confrontés ainsi que sur les résultats de la recherche à ce titre.
5) Identifier les priorités dans la réalisation et l'utilisation de la recherche énergétique à la lumière de ses conclusions en matière de ressources, pour le bénéfice des décideurs, des chercheurs et des autres parties intéressées. Enfin,
6) Recommander des moyens pour établir et améliorer, à l'échelle nationale et internationale, la distribution des ressources consacrées à la recherche énergétique.

Pour réaliser les objectifs 1), 2) et 3) de son mandat, le Groupe a commandé 103 études (annexe 2). Bien que bon nombre d'entre elles soient citées dans le présent rapport, celui-ci n'entend ni les résumer ni procéder à leur revue. Les études approuvées, qui seront publiées séparément, composent la toile de fond de ce rapport et constituent un tour d'horizon inestimable de la recherche énergétique qui saura intéresser tout autant les chercheurs que les praticiens.

Le Groupe n'a pas pu atteindre l'objectif 4) de son mandat, qui était de faire connaître ses points de vue et de susciter un échange. Nous reconnaissons l'importance d'un tel échange, surtout pour évaluer le bien-fondé de nos propres opinions. Nous serions vivement intéressés si le présent rapport ou nos documents d'étude devaient conduire à une discussion plus animée sur les graves problèmes énergétiques auxquels font face les pays en développement.

Nous nous sommes efforcés de traiter ici les points 5) et 6) de notre mandat dans la limite du temps et des ressources mis à notre disposition. L'aide financière accordée par le Centre de recherches pour le développement international (CRDI) et l'Université des Nations Unies a été généreuse. Mais si vaste est le domaine de la recherche énergétique et si grande est la diversité des pays en développement qu'il aurait été irréaliste, voire téméraire, de dresser pour ces pays un relevé exhaustif et exact des priorités de la recherche et des moyens consacrés à cette fin même si nous avions disposé de ressources beaucoup plus importantes. Nous nous sommes donc employés à faire ressortir les orientations prometteuses, non à jeter les bases d'un plan directeur.

Prémisses de base

La composition du Groupe figure à l'annexe du présent chapitre alors que le chapitre 2 expose en détail l'angle sous lequel le Groupe a abordé sa tâche. À cause de la nature même de notre groupe et de notre tâche, il était normal que nous ne partagions pas tous les mêmes avis sur tous les points de cette étude. Signalons toutefois qu'aucun d'entre nous ne rejette les principaux aspects ni les recommandations du rapport. Les réserves, précisions et doutes d'importance secondaire que quelques-uns d'entre nous peuvent avoir sur certaines propositions particulières ne sont pas toujours explicités puisqu'il était de notre devoir, pensions-nous, de présenter au lecteur un rapport clair et simple. C'est donc sans hésitation que nous nous identifions au contenu du présent document.

L'idée maîtresse derrière ce rapport est d'exposer une approche intégrée des problèmes énergétiques. À mesure qu'un domaine évolue, les chercheurs le subdivisent et s'emploient à résoudre avec toujours plus de profondeur des problèmes jamais encore définis par autant de paramètres. Les études énergétiques constituent actuellement un hybride de nombreuses disciplines, chacune de ces dernières apportant à son tour ses propres concepts et méthodes à l'étude qui lui a donné naissance. Mais à ce stade-ci, il importe pour les pays en développement de définir les problèmes énergétiques en des termes généraux et de mettre au point des théories, des méthodes et des concepts nouveaux. Voilà pourquoi nous favorisons une exploitation coordonnée et systématique des corrélations cachées entre l'énergie et d'autres variables — une préférence dont témoigne, par exemple, notre insistance à l'égard des rapports qui existent entre l'énergie et l'économie, la planification et l'établissement des prix de l'énergie à l'échelle nationale et enfin l'influence des schémas de localisation sur la consommation d'énergie.

Le Groupe s'attaque ensuite à l'étude des ressources et techniques énergétiques dans le contexte de leur demande. Trois grandes répercussions en découlent. En premier lieu, la demande d'énergie doit être considérée comme une variable active des mesures à prendre, comme une source possible de solutions aux problèmes énergétiques, au même niveau que l'approvisionnement et la technologie. Il est possible de traiter la demande comme une variable exogène, déterminée par les tendances de la production, des revenus et des prix, et de chercher les sources

d'énergie qui peuvent répondre à cette demande prévue (voir, par exemple, Wilson 1977; Greene et Gallagher 1980). Ce genre d'énoncé commence à être délaissé même chez les plus riches pays industrialisés dès que les coûts réels de l'énergie prennent de l'ampleur; il est encore moins approprié dans les pays en développement où l'approvisionnement en énergie est susceptible d'être limité encore plus par des investissements restreints ou une balance des paiements déséquilibrée. Pour ces pays, la demande d'énergie doit être considérée comme une variable et non comme un paramètre : nous devons chercher le type de développement qui permettra d'accroître au maximum le niveau de vie compte tenu des limites physiques de l'énergie — voire de n'importe quelle ressource. Quels sont les facteurs qui déterminent la demande d'énergie et jusqu'où peut-on les modifier? À quels besoins doit-on répondre en premier lieu? Ainsi, la demande d'énergie peut être mesurée et réglementée et les possibilités et les limites d'une gestion de la demande d'énergie constituent un sujet de choix pour la recherche dans les pays en développement.

En deuxième lieu, l'étude des ressources et des techniques énergétiques doit se faire dans le contexte de leurs utilisations. On doit aussi intégrer à cette étude les ressources et les techniques de rechange qui peuvent servir le même but. En d'autres mots, il est possible de passer d'un combustible à l'autre dans la plupart des utilisations énergétiques, et cette possibilité détermine la compétitivité des sources d'énergie dans ces utilisations; enfin, les perspectives de cette compétitivité doivent jouer un rôle de premier plan au moment du choix des recherches sur une ressource particulière.

Enfin, l'énergie économisée contribue aux approvisionnements au même titre que l'énergie produite. La recherche sur les économies d'énergie est beaucoup moins avancée mais offre un plus grand potentiel que la recherche sur la production d'énergie, et elle intéresse également davantage les pays en développement. Quoique les pays en développement soient pour la plupart de petits consommateurs et de tout petits producteurs des principales sources d'énergie conventionnelle, ils doivent quand même faire fonctionner, par exemple, des milliers de chaudières et des millions de moteurs de toutes sortes. Un léger accroissement de l'efficacité de ces appareils peut faire une grande différence sur leur consommation d'énergie. Il est souvent moins dispendieux d'utiliser à meilleur escient les formes actuelles d'énergie que de développer les sources d'approvisionnement. L'économie d'énergie mérite donc une priorité élevée.

Malheureusement, la plupart des recherches sur bon nombre d'appareils de ce genre n'ont pas évolué au point de nous permettre d'indiquer en toute confiance les plus prometteuses. Ce domaine n'est pas le seul où le Groupe a constaté une vive incertitude; il en existe bon nombre d'autres sur lesquels nous n'avons pu porter qu'un jugement provisoire et imparfait. Voilà pourquoi nous considérons ce rapport non comme un verdict, mais comme un instrument d'éducation que nous offrons pour la prise de décisions à l'échelle nationale et internationale. Nous prévoyons que les échanges qu'il suscitera seront pour nous aussi instructifs qu'en a été la rédaction.

Champ d'observation

L'information que nous avons utilisée est presque entièrement du domaine public, les renseignements inédits étant d'un accès beaucoup plus difficile. Nous avons tenu compte de toute la documentation en langue anglaise, d'ouvrages en

espagnol, portugais, chinois, coréen et indonésien et pris en considération ceux en français et en allemand. La documentation en russe constitue une lacune importante de notre étude. Les principales tendances de la recherche se retrouvent tôt ou tard dans les écrits de tous les pays industrialisés, voire de tous les pays. Mais il y a des spécialités nationales et des styles de recherche de même que des théories qui sont populaires dans certains pays mais dont l'importance éventuelle peut tarder à se manifester. À preuve, la théorie de l'origine non biologique des hydrocarbures qui a été mise au point en Russie dans les années 1870 et qui a conservé une importance en U.R.S.S. Les pays de l'Ouest ne l'ont jamais prise au sérieux avant que les données recueillies par les sondes spatiales ne viennent soudainement la mettre en évidence.

Le présent rapport n'aborde pas en détail les techniques de production et d'ingénierie des grandes industries productrices de pétrole, de gaz, de charbon et d'électricité (énergie thermique, hydro-électrique et nucléaire). Au début, le groupe avait sérieusement songé à les inclure, mais il a constaté que la documentation publiée constituait un guide très imparfait de la pratique dans ces domaines et qu'elle laissait en grande partie de côté les pays en développement. Pour traiter comme il se doit de ces techniques, il aurait fallu solliciter la collaboration d'entreprises dans les industries de l'énergie et des techniques et embaucher des consultants à des tarifs élevés; l'exercice aurait été très différent de ce que le Groupe pouvait effectivement réaliser. Cette omission ne reflète aucunement l'importance des industries, seulement le manque de ressources du Groupe. Toutefois, le Groupe a examiné l'aspect de la recherche inhérent aux grandes questions stratégiques, auquel les théoriciens sont susceptibles de faire face avec ces industries.

Les références bibliographiques du rapport ne constituent pas une vue d'ensemble de la documentation et ne visent pas à rendre justice à l'effort de recherche déployé dans le monde ou dans les pays en développement. Tout au plus représentent-elles le minimum de renseignements que nous jugions nécessaires pour étayer nos arguments. En cas de référence multiple sur la même question, nous avons essayé de choisir les plus récentes et les plus aisées à consulter.

Pour des raisons de temps et d'espace, nous nous sommes imposés les limites suivantes. Bien que nous ayons essayé de rattacher les grands problèmes de recherche aux pays en développement où ils étaient le plus pertinent, nous nous sommes abstenus de donner des détails à l'échelle régionale ou nationale. Nous avons tenté d'accorder une attention suffisante à chaque technique de manière à pouvoir porter un jugement général sur ses utilisations finales, sur la convenance de la technique par rapport aux applications en question, sur son importance et sa priorité relative et enfin sur les avenues prometteuses de la recherche; vu la portée de notre mandat, nous ne pouvions approfondir davantage chaque technique, si souhaitable que cela était. Même une telle évaluation globale devenait malaisée lorsque l'information sur les techniques était confidentielle ou protégée, ou lorsque la recherche n'était pas assez avancée pour nous permettre d'esquisser un jugement, si bien que dans un certain nombre de cas, nous avons choisi de ne pas porter un tel jugement.

Structure

Le présent rapport renferme 15 chapitres. Le Groupe décrit sa méthode de travail au chapitre 2 — ses hypothèses, les procédés qu'il a adoptés et les moyens qu'il a trouvés pour régler les questions controversées. Au chapitre 3, le Groupe

analyse les points faibles de la capacité de recherche des pays en développement et les moyens à mettre en place pour la développer. Ce chapitre établit également un lien entre la politique et la recherche.

Suivent ensuite deux chapitres sur la demande d'énergie dont l'analyse devrait, de l'avis du Groupe, constituer le point de départ de la recherche énergétique. Le chapitre 4 aborde l'analyse de la demande au niveau du système socio-économique et des secteurs «énergivores». Le chapitre 5 traite de la recherche sur les économies d'énergie et souligne le besoin pressant de se pencher sur l'efficacité des appareils utilisateurs d'énergie.

Les chapitres qui suivent touchent aux principales techniques et ressources énergétiques. On a essayé de grouper les sources d'énergie selon leur pouvoir réciproque de substitution, qui varie, cependant, d'une utilisation à une autre, d'où l'approximation de notre groupement. Les chapitres 6 à 8 traitent respectivement des combustibles liquides, gazeux et solides, qui s'emploient tous à fournir de l'énergie au moyen d'une combustion. Le chapitre 9 expose deux autres sources thermiques d'énergie, notamment l'énergie géothermique et l'énergie thermique solaire. L'électricité fait l'objet du chapitre 10 alors que le chapitre 11 touche deux sources de force motrice, notamment l'énergie éolienne et l'énergie humaine.

Les questions environnementales débordent largement le domaine de l'énergie et il aurait été impossible, compte tenu du temps et des ressources du Groupe, d'approfondir même celles qui avaient trait à l'énergie. Toutefois, le chapitre 12 aborde trois grandes conséquences environnementales découlant de l'utilisation d'énergie : le déboisement et la désertification, le réchauffement du globe et les pluies acides.

Les conclusions détaillées du Groupe sont trop nombreuses et variées pour être résumées ici, leur pertinence et leur importance variant d'un pays en développement à l'autre. Voilà pourquoi nous les résumons au début de chaque chapitre. Les conclusions plus générales de notre exercice collectif figurent dans trois brefs chapitres de conclusion — celles qui portent sur les conditions préalables de la recherche, au chapitre 13, celles qui touchent aux utilisations énergétiques, au chapitre 14, et celles qui abordent les ressources énergétiques, au chapitre 15.

Chapitre 2 L'approche du groupe

Le Groupe de recherche sur l'énergie (GRÉ) se compose de 11 spécialistes de pays en développement. Ils ont tenté, dans le présent rapport, de poser un jugement de nature spécialisée et socio-politique sur la recherche. Le Groupe s'est surtout attaché à la capacité de recherche, sans laquelle l'établissement de priorités dans la recherche deviendrait un exercice futile. Il a aussi essayé de cerner les avenues prometteuses de la recherche à partir du rôle de l'énergie dans le développement; enfin, il a examiné toutes les formes et utilisations de l'énergie.

Le Groupe avait d'abord posé les hypothèses normatives suivantes. La croissance de la production et de la consommation est essentielle à une hausse du niveau de vie des pays en développement, mais il est également nécessaire de mettre en place des mesures concertées pour alléger la pauvreté et procéder à une meilleure répartition des revenus. Ce souci d'équité existe à l'échelle internationale. Les pays en développement doivent accroître leur autonomie en matière de décisions; pour ce faire, ils devront prendre à leur charge un certain nombre de fonctions et d'activités qu'ils n'assument pas à l'heure actuelle ou pour lesquelles ils dépendent des pays industrialisés. Les activités économiques ne doivent pas être néfastes à l'environnement, et elles doivent être réalisées avec un souci d'efficacité que l'on ne peut évaluer que dans un contexte local.

Le rapport représente la position unanime du Groupe. Toutefois, le Groupe reconnaît l'existence d'un certain nombre de questions qui, en raison de l'état actuel des connaissances, admettent d'autres jugements tout aussi valables.

Les membres du GRÉ proviennent de milieux très diversifiés : d'aucuns peuvent être considérés comme des érudits, des spécialistes, des administrateurs ou des politiciens, mais la plupart se situent quelque part entre ces catégories. À un moment ou l'autre, nous nous sommes tous occupés d'enseignement, de recherche, de politique, de journalisme ou de gestion. Nous présentions tous cependant deux éléments communs : nous vivons et travaillons dans des pays en développement et nous portons un vif intérêt à un aspect du domaine de l'énergie — qui se manifeste bien autrement que par une simple déclaration ou un jugement sur la question. La majorité d'entre nous avons étudié ou enseigné dans ce domaine ou dirigé des travaux à ce sujet. Toutes ces caractéristiques communes nous ont aidés à modeler notre conception de ce que nous pouvions et devions faire.

Il y a plus de dix ans déjà que le public s'intéresse activement à la question de l'énergie et que les écrits foisonnent sur ce que les pays en développement devraient ou auraient dû faire (p. ex., Nations Unies 1981; Banque mondiale 1981, 1983a; Banque mondiale et Organisation pour l'alimentation et l'agriculture 1981; Bhagavan et Carlman 1982; Mwandosya et al. 1983; Commission des communautés européennes 1984; Goldemberg et al. 1985). Le Groupe s'est même demandé s'il pouvait réellement ajouter quoi que ce soit à la multitude de travaux et de recommandations sur le sujet qui l'ont précédé.

Le Groupe pouvait suivre deux modèles de base. Le premier était un examen purement spécialisé des besoins en recherche basé sur l'absence de connaissances techniques (un excellent exemple touchant la recherche sur la combustion est présenté dans Smoot et Hill 1983). Cette approche ne pouvait pas réellement s'appliquer à notre domaine qui était encore mal circonscrit, qui ne pouvait compter sur aucun groupe de pairs reconnus ou qui ne ralliait pas encore les suffrages des principaux praticiens. Le second modèle prenait la forme d'un commentaire social et politique. Ce modèle était indispensable puisqu'il n'y avait aucun moyen de prescrire des priorités de recherche en matière de développement sans d'abord définir des critères socio-politiques. Cependant, à cause de la composition du Groupe et des conditions qui ont présidé à sa formation, il fallait combiner une évaluation spécialisée à une analyse socio-politique. Voilà pourquoi le Groupe a dû élaborer sa propre méthode que nous expliquons ci-dessous.

Points de départ

Pathologie de la recherche

Pour commencer, le Groupe ne pouvait prendre au pied de la lettre son mandat et se limiter uniquement à établir les priorités de la recherche énergétique. En notre qualité d'instigateurs et de praticiens de la recherche dans les pays en développement, nous étions convaincus qu'à moins de rehausser l'efficacité des institutions de recherche des pays en développement et d'intégrer celles-ci dans le processus de production et de prise de décision, l'exercice d'établissement des priorités de la recherche courait lui-même à sa perte. Bien que nos opinions en matière de recherche n'aient pas un caractère définitif, nous nous sommes sentis obligés de présenter l'amorce d'un diagnostic au chapitre 2.

Orientations de la recherche

L'établissement de priorités en matière de recherche a pour but de canaliser les ressources — chercheurs, fonds, matériel — vers les domaines d'activité prometteurs ou souhaitables. Cependant, la recherche constitue souvent une aventure vers l'inconnu qui peut nous écarter de notre route de nombreuses façons. À l'heure actuelle, les problèmes de la recherche s'énoncent sous forme de paradigmes au sein des communautés de chercheurs — paradigmes qui ne conviennent pas toujours à la recherche d'une solution appropriée. La recherche est en partie un phénomène social et son milieu présente souvent des éléments propres à la psychologie des foules ou d'une meute : les pionniers qui s'attaquent à de nouveaux problèmes ou qui mettent à l'essai de nouveaux instruments et méthodes traînent souvent derrière eux une horde d'imitateurs. On constate fréquemment cet effet d'entraînement, par exemple, dans l'influence que les paradigmes des pays développés exercent sur la recherche effectuée dans les pays en développement; dans le cas qui nous intéresse, ce phénomène se manifeste davantage par des récompenses matérielles et sociales plus considérables qui accompagnent les travaux de recherche publiés ou reconnus dans les pays industrialisés (Cooper 1973). Les dépenses pour la recherche constituent un investissement susceptible d'être exposé aux mêmes forces qui sont à l'origine du gaspillage dans les investissements, par exemple l'espoir d'un bénéfice et d'un agrandissement. Ces causes de gaspillage continueraient d'exister même si les priorités étaient bien établies.

En leur qualité de chercheurs, les membres du Groupe étaient d'avis qu'il ne fallait pas se borner simplement à signaler les domaines prioritaires de la recherche, mais également les avenues ou les approches prometteuses. De peur d'oublier les risques d'une telle entreprise, nous nous sommes rappelé la revue des techniques effectuée par Werner Siemens dans le domaine de l'électricité. Le fondateur de cette société bien connue de fabrication de matériel de puissance, Siemens und Halske, était lui-même un grand inventeur. Après avoir examiné les expériences menées dans tous les pays occidentaux (y compris un bateau mû à l'aide de piles que Jacobi avait essayé sur le fleuve Neva en Russie), Siemens en est venu à la conclusion que les piles n'avaient probablement aucune chance de contribuer à la popularité de l'électricité et il a donc concentré ses efforts sur la mise au point de «machines magnéto-électriques», c'est-à-dire des dynamos. Le rôle négligeable des piles depuis leur apparition il y a un siècle témoigne bien de la vision de cet homme. Toutefois, c'est également lui qui disait que l'éclairage au moyen d'électrodes de métal ou de carbone était irréalisable parce que «la lumière ainsi produite est trop faible, nécessite beaucoup d'électricité et de travail et peut difficilement être qualifiée de lumière électrique» (Siemens 1880); il s'est donc employé à mettre au point des chandelles électriques avec lesquelles il a, par exemple, éclairé le parlement allemand. Le 21 octobre 1879 — presque au même moment où Siemens écrivait ces mots — Edison réussissait à insérer un filament de charbon à l'intérieur d'une ampoule vide et, ce faisant, reléguait pour toujours aux oubliettes les lumières à arc.

Par conséquent, nous exposons avec modestie et prudence ce que nous considérons comme les avenues prometteuses de la recherche, sans prétendre aucunement à l'infaillibilité. Nous nous sommes également efforcés de ne pas trop nous écarter de notre propre domaine de compétence ni de procéder à des spéculations. Cela signifie que nous ne pouvions prétendre à la même précision dans tous les secteurs. Nous nous sommes cependant risqués à porter des jugements qui, nous l'espérons, accroîtront l'efficacité de la recherche.

Point de vue d'un profane

Le Groupe a décidé que les priorités de la recherche énergétique devaient être établies en fonction de la place de l'énergie dans le processus de développement et non à partir de l'une ou l'autre des caractéristiques intrinsèques de l'énergie. Voilà pourquoi il a inclus dans son analyse certains secteurs de la recherche que les spécialistes de l'énergie délaissent quelquefois — par exemple, la recherche sur l'énergie humaine et les dispositifs énergivores. Il a également décidé de tenir la demande et l'utilisation de l'énergie comme des indicateurs de priorité.

Même si tous les membres du Groupe étaient des universitaires ou des spécialistes dans leur propre profession, il se sont efforcés de transcender leurs points de vue techniques pour en arriver à un consensus général et de compléter leurs connaissances techniques par une sensibilisation aux choix socio-économiques auxquels sont confrontées les sociétés en développement et aux intérêts contradictoires qui limitent de tels choix. Ils ont essayé de s'entendre sur les hypothèses idéologiques qui devraient présider à leurs jugements socio-économiques communs; ces hypothèses figurent à la section «Les grandes incertitudes» de ce chapitre.

Toutes les formes et utilisations de l'énergie

Respectant son mandat, le Groupe a tenté de tenir compte de toutes les formes et utilisations de l'énergie. Il a délaissé certaines formes d'énergie peu susceptibles de prendre de l'importance à moyen et à long terme (par exemple la conversion de l'énergie thermique des océans), mis de côté un certain nombre d'utilisations énergétiques ou de dispositifs (par exemple, turbines, moteurs à réaction), en grande partie à cause d'un manque de temps, mais aussi quelquefois parce que la recherche et le développement sont l'apanage d'un petit nombre de producteurs et qu'ils se prêtent difficilement à une observation de l'extérieur.

À l'encontre de nombreux auteurs, y compris quelques-uns de nos membres et correcteurs, nous n'avons pas pris de position sur la question des ressources renouvelables ou épuisables. L'emploi des ressources épuisables nécessite leur répartition sur plusieurs générations et se solde par un jugement de valeur auquel l'application d'une règle simple d'optimisation ne nous permet pas d'échapper. Le principe de Hotelling, selon lequel le prix net (à l'exclusion des coûts d'extraction et de production) d'une ressource épuisable doit s'accroître à un taux égal au taux d'intérêt, s'applique uniquement sous des conditions très particulières et n'a pas une très grande utilité dans des situations pratiques. Il n'y a aucun moyen simple de procéder à des comparaisons d'utilité sur plus d'une génération à la fois (voir Umaña 1984). Toutefois, ceux qui déterminent la répartition de ces ressources sur les générations à venir doivent faire ce choix moral. Les pays industrialisés consomment la majeure partie des ressources épuisables et compte tenu de l'organisation des marchés industriels, une baisse de la consommation actuelle des combustibles solides dans les pays en développement ne leur garantit aucunement un approvisionnement plus abondant de ce genre de combustible pour les générations à venir. En conséquence, les pays en développement n'ont pas à faire ce choix et celui-ci n'est pas forcément un jugement moral.

Cela ne signifie toutefois pas que les pays en développement ne souffriront pas des conséquences d'un épuisement des ressources. Si on en vient à vouloir réglementer le taux d'épuisement des ressources à l'échelle mondiale, les pays en développement auront nettement intérêt à participer à ce mouvement. De plus, les pays qui exploitent une ressource épuisable (y compris des combustibles fossiles) pour leur propre usage ou pour l'exportation doivent décider du rythme d'épuisement de cette ressource. Ils doivent donc examiner le problème de l'exploitation de la ressource dans le temps, peu importe qu'ils le considèrent comme un problème de répartition sur plusieurs générations ou de gestion de la balance des paiements, ou de toute autre façon. C'est un problème crucial pour les pays qui exportent des ressources épuisables.

Hypothèses normatives

L'établissement des priorités de la recherche énergétique doit s'appuyer sur une formule utilitaire, sur un examen des objectifs pratiques réalisables, plutôt que sur le côté prometteur et attrayant de la recherche. Parallèlement, le Groupe ne pouvait adopter le point de vue restrictif des clients, à cause de leur grand nombre — administrations publiques, organismes de financement, producteurs, etc. — et du caractère controversé de leurs objectifs. En conséquence, le Groupe ne pouvait faire mieux que d'adopter un ensemble de buts communs aux pays en développement.

Parmi toutes les situations idéales exposées ci-après, certaines pourront sembler aussi louables que la maternité universelle et d'autres, aussi polémiques que la croissance zéro. Certaines opinions exprimées dans le présent rapport susciteront inévitablement une controverse. Nous acceptons la controverse en tant que chemin tortueux vers la vérité mais, pour être fructueuse, elle doit prendre comme point de départ les mêmes prémisses initiales. Nous avons cru bon de formuler les nôtres, en premier lieu pour essayer de faire l'unanimité entre nous, mais aussi dans l'espoir de conférer au débat des orientations plus constructives.

Dans les siècles qui ont précédé la naissance de l'industrie moderne, le confort dans lequel s'installait un peuple et le travail qu'il devait effectuer pour subvenir à ses besoins reposait sur la relation entre l'Homme et la terre. Selon toute évidence, il devait exister en tout temps un surplus d'aliments, outre la consommation des producteurs de cultures vivrières, pour répondre aux besoins des concentrations urbaines qui ne s'employaient pas à produire leur propre nourriture. En période de grande fertilité ou d'abondance de poisson, de fruits et de sauvagine, les peuples vivaient bien ou avaient de nombreux loisirs; à d'autres moments plus rigoureux, ils devaient redoubler d'efforts pour une plus maigre récolte.

Dans les régions qui sont parvenues à produire des denrées en quantité supérieure aux besoins de subsistance des producteurs, une partie de la population s'est mise à avoir d'autres occupations comme le commerce, l'administration publique, la religion ou la guerre, et ainsi, à amasser une fortune considérable et à jouir d'une très grande prospérité. Voilà comment se sont installés dans certaines sociétés préindustrielles les mécanismes à l'origine des inégalités économiques.

L'apparition des techniques modernes de mécanique a permis à l'homme d'augmenter considérablement sa productivité. Non seulement ces techniques ont rendu possible la concentration des richesses et des revenus jusque-là inimaginable dans le monde préindustriel, mais elles ont augmenté les revenus de la population active par le réinvestissement de ces richesses dans des activités à base de main-d'oeuvre. Jusqu'ici, ce processus de croissance économique se vérifie auprès de la majorité des populations des pays que l'on considère comme industrialisés.

Dans le reste du monde, les mécanismes de croissance de la productivité et des revenus ont touché seulement une partie — souvent minime — de la population et ont contribué à creuser des écarts considérables au niveau des richesses et des niveaux de vie entre ceux qui avaient profité du mouvement mondial de croissance de la productivité et ceux qui n'ont pu en profiter. Parmi ces derniers, il en est qui ont atteint un niveau de pauvreté et de détresse désormais impossible à ignorer et qui constitue une tache honteuse face à la prospérité à laquelle sont parvenus leurs voisins proches ou éloignés.

Une expansion importante de la production des biens et services s'avère de toute évidence nécessaire si l'on veut élever le niveau de vie des pays en développement. Comme nous l'avons fait remarquer précédemment, l'énergie est un produit intermédiaire dont il convient de se préoccuper uniquement dans le cadre d'un accroissement de la production et de la consommation globales. Ainsi, la croissance des pays en développement est une condition indispensable à l'amélioration des conditions de vie des peuples.

Mais nous croyons également qu'il existe dans les pays en développement des mécanismes qui conduisent à une distribution inégale des retombées de la croissance. Les inégalités découlant de la concentration de la propriété sont monnaie courante dans les pays en développement comme dans les pays industrialisés, mais les forces qui contribuent à l'accroissement des salaires et à la réduction des

injustices ne sont pas aussi puissantes dans les pays en développement que dans certains pays industrialisés. Toutefois, il y a aussi d'autres sources d'inégalités qui sont caractéristiques, ou même plus fortes, dans les pays en développement. La propriété des entreprises commerciales et industrielles tend à être concentrée dans des groupes sociaux restreints. Le pouvoir politique appartient à de petits groupes qui le transforment en pouvoir économique. L'éducation n'est pas accessible à tous et on constate même des écarts énormes dans la qualité de l'enseignement dispensé aux riches et aux pauvres. La croissance se limite aux secteurs commercialisés de l'économie, délaissant les gens occupés à des activités de chasse ou d'agriculture ou à une économie de cueillette. La terre est un facteur important d'enrichissement mais la propriété en est limitée à de petits groupes dans la population rurale. Dans les régions urbaines, la piètre qualité des logements, l'insécurité et l'incertitude de l'emploi se combinent pour enlever aux pauvres toute possibilité d'accumulation de richesses. Toutes ces forces ont pour conséquence évidente une pauvreté, une détresse et une misère généralisées même dans certains des pays en développement les plus prospères et dynamiques. À notre avis, ces accidents de croissance sont souvent inévitables tout comme on peut largement corriger leurs manifestations indésirables dans la limite des ressources existantes des pays en développement.

Nous ne croyons pas que l'on puisse éliminer ni même réduire de façon significative la pauvreté ou l'injustice par les seules mesures énergétiques. Cependant, la plupart des mesures comportent une composante technique, y compris les mesures ayant une influence sur la pauvreté ou l'injustice, et toute technique renferme une composante énergétique. Les répercussions d'une mesure sur la répartition des revenus et la satisfaction des besoins fondamentaux peuvent être importantes et on devrait les explorer et les examiner au moment de formuler des politiques énergétiques. Qui plus est, des mesures dans le domaine de l'énergie peuvent accroître la productivité et fournir les moyens d'améliorer la répartition des revenus et la qualité de la vie. Plus important encore, les cas extrêmes de pauvreté et d'injustice introduisent des éléments d'instabilité et de fragilité dans les sociétés et rendent impossible leur développement rapide et harmonieux. Voilà pourquoi l'allégement de la pauvreté doit absolument constituer une partie essentielle d'une politique de développement, dont la politique énergétique fait partie intégrante.

L'avènement de l'industrie moderne a favorisé l'émergence d'un grand nombre de produits, activités et métiers nouveaux, dont bon nombre sont en grande partie confinés aux pays industrialisés. Cette spécialisation, jointe à la concentration de la production industrielle des pays industrialisés, confère à ces derniers une influence considérable sur la situation économique des pays en développement — influence qu'exercent non seulement les administrations publiques, mais aussi les grandes sociétés transnationales qui ont leur siège social dans les pays industrialisés. Il est raisonnable d'attendre de ces gouvernements et de ces sociétés qu'ils exercent leur puissance dans les pays en développement avec modération, équité et justice, par exemple dans les échanges commerciaux et financiers ainsi que dans le transfert de la technologie. C'est dans ce sens que nous favorisons un ordre économique mondial plus juste.

Nous reconnaissons aussi que le monde est divisé en États-nations dont le développement, quel que soit le niveau de l'aide internationale, repose largement sur les efforts des peuples à l'intérieur de leurs propres frontières. Pour qu'un pays puisse se développer, il est donc essentiel qu'il prenne à sa charge certaines activités et compétences et qu'il devienne autonome dans quelques domaines fondamentaux. Mais lorsqu'on tente de préciser ces domaines et de tirer une ligne entre l'autonomie et l'autarcie, la controverse s'installe. Toutefois, on constate une plus grande

unanimité sur l'existence d'une catégorie d'activités essentielles. La possibilité d'un gouvernement de décider lui-même de la politique énergétique qu'il désire adopter dans l'intérêt national constitue un exemple évident à cet égard. À partir de cette décision, il est nécessaire que la capacité de recherche puisse prendre des décisions informées et que la capacité de production puisse soutenir cette recherche et utiliser ce qu'elle produit. L'autonomie constitue donc une condition préalable aux réalisations économiques et technologiques issues de la souveraineté nationale.

Il est impossible d'examiner une vaste question théorique, y compris une politique énergétique, sans prendre conscience des facteurs externes. L'utilisation de combustibles fossiles par certains peut être nuisible à d'autres sous diverses formes, par exemple la pollution et les pluies acides. Nous croyons que les désaffectations et les injustices produites par l'activité économique devraient être rigoureusement calculées et retranchées des bénéfices nets de telles activités, et qu'elles devraient aussi être tenues de subir avec succès des contrôles environnementaux.

Les facteurs extérieurs sont le fruit non seulement de l'interaction entre les peuples mais aussi entre les générations. Par exemple, la quantité de combustibles fossiles existant sur cette planète est clairement limitée; quiconque consomme aujourd'hui réduit l'approvisionnement disponible pour les générations à venir (Georgescu-Roegen 1976). Bien que nous ne voulions pas laisser entendre par là qu'il faudrait passer rapidement des ressources épuisables aux ressources renouvelables, nous insistons sur la nécessité de tenir compte des intérêts des générations à venir.

Le concept d'efficacité nous tient à coeur, en ce sens que toute activité qui peut être entreprise avec un apport réduit de matière première devrait l'être. Cette préférence peut paraître banale mais elle est aussi très générale puisqu'il n'existe aucune mesure unique de l'efficacité. Une mesure basée sur un seul facteur — par exemple la productivité du travail — peut être trompeuse lorsqu'il y a de nombreux facteurs de production; signalons aussi que l'on peut pondérer de mille et une façons ces facteurs de production pour obtenir une mesure de l'efficacité. Une pondération selon le prix est pratique mais les prix sont des variables. En particulier, beaucoup de pays en développement doivent importer leur énergie et connaissent des chances fort inégales lorsqu'ils désirent accroître leurs exportations. Ces fluctuations du coût économique des importations peuvent conférer une certaine utilité à la recherche et aux investissements sur les produits de substitution des importations, y compris l'énergie, dans certains pays en développement, même lorsque ces derniers ne sont pas favorisés par le cours international du change. Il est donc nécessaire d'élargir son plan de vision et de prévoir le moment propice à de telles décisions; ainsi, un pays qui s'attend à un affaiblissement de sa balance des paiements peut anticiper cette situation en mettant en place de nouvelles techniques énergétiques bien avant qu'elles ne deviennent économiques au taux de change courant. De façon plus générale, afin de pouvoir être utilisé, le concept d'efficacité doit tenir compte de multiples facteurs de production tout en étant adapté aux conditions locales et aux objectifs nationaux.

Les grandes incertitudes

L'unanimité sur laquelle repose le présent rapport est le fruit d'un processus itératif. Guidés par certaines lignes directrices, et compte tenu du champ d'observation établi par les membres du Groupe, ceux-ci ont d'abord mis au point un

ensemble d'énoncés ayant pour but de définir une certaine position unitaire; ces énoncés ont par la suite été modifiés, revus et affinés d'après les commentaires des membres à la suite de trois ébauches successives. Ce processus d'interaction n'a pas fait ressortir de désaccords sur des points fondamentaux mais on a constaté qu'un certain nombre de situations futures ou hypothétiques pouvaient admettre plusieurs jugements de valeur émis avec plus ou moins d'autorité. Parmi ces situations se sont retrouvées quelques-unes des questions les plus fondamentales au coeur du débat sur l'énergie. Illustrons notre propos par quatre exemples.

Le prix futur du pétrole Au cours des douze dernières années, on a examiné, élaboré ou mis à jour toute une batterie de techniques dans l'attente d'une hausse soutenue des prix du pétrole. Si les prix avaient continué leur mouvement ascendant, un certain nombre de ressources et de techniques de rechange seraient devenues progressivement concurrentielles à des niveaux différents du prix du pétrole; plus rapide aurait été la hausse, plus tôt ces ressources et techniques seraient devenues concurrentielles et plus tôt également aurait-on justifié la recherche et le développement (R&D) pour les améliorer. Par contre, si le prix du pétrole demeurait sous le niveau de rentabilité des produits de substitution pendant encore une longue période, l'investissement dans la recherche sur de tels produits de substitution aurait été prématuré, voire gaspillé. L'évolution future des prix du pétrole ne fait absolument pas l'unanimité chez les chercheurs; il n'est donc pas surprenant qu'ils ne s'accordent pas sur l'opportunité d'effectuer des travaux de recherche sur les énergies de rechange. Toutefois, si l'on examine la question en détail, on voit que la fixation des prix du pétrole est un mécanisme complexe et obscur (Singer 1983, 1985). Même s'il était transparent, certaines variables, comme le rythme de l'évolution technologique et des découvertes de gisements pétroliers, feraient leur apparition dans ce mécanisme de la fixation des prix du pétrole dont l'évolution demeure fort incertaine (Adelman et al. 1983). Dans ces conditions, une foule d'arguments tout aussi valables les uns que les autres peuvent être avancés sur l'évolution future des prix du pétrole.

Le taux de réchauffement futur Il est extrêmement inquiétant de constater à quel point une élévation de la concentration de gaz carbonique peut modifier radicalement les climats régionaux et entraîner la submersion de grandes régions côtières par la fonte de la calotte glaciaire de l'Antarctique. L'idée que l'on se fait de ce danger doit influencer profondément notre opinion à l'égard des sources d'énergie «bénignes» comme l'hydrogène et l'énergie nucléaire. Toutefois, notre incertitude à l'égard des émissions futures de gaz carbonique est grande et s'accroît à mesure que les projections s'étendent à un avenir encore plus lointain. Dans un groupe de prévisions calculées à partir de valeurs plausibles pour un nombre limité de variables, on a constaté que les écarts types des émissions prévues étaient à peu près égaux aux moyennes pour l'année 2025 et qu'ils les dépassaient de 30 % à 60 % en 2075 (Edmonds et Reilly 1985b). Ainsi, on constate que l'importance probable des émissions futures est disséminée sur une très grande gamme de possibilités. Dans la mesure où certaines des variables indépendantes peuvent être modifiées au moyen d'une politique, elle-même tributaire de la perception du danger d'un réchauffement global que se fait le décisionnaire, les émissions de gaz carbonique sont en elles-mêmes imprévisibles. Et même si elles étaient prévisibles, leur relation avec le climat du globe ne rallie pas tous les suffrages, comme nous le verrons à la deuxième section du chapitre 12. Ici encore, on peut émettre un certain nombre de jugements de valeur tout aussi valables les uns que les autres.

Cycles et croissance de la demande mondiale De façon générale, plus la croissance de la demande globale dans le reste du monde est rapide, plus il est facile

aux pays en développement de tirer de leurs exportations les revenus nécessaires à leurs importations, y compris celles d'énergie. Dans le quart de siècle qui a suivi la Seconde Guerre mondiale, il y a eu une croissance relativement rapide de la demande mondiale ainsi que des importations de pétrole des pays en développement (pays importateurs de pétrole). La montée subséquente des prix du pétrole, alliée à une croissance moins rapide des pays industrialisés après 1973, a fait chuter cette demande. Pour l'avenir, plus l'économie mondiale manquera de vigueur, plus les pays en développement connaîtront les mêmes problèmes en matière de balance de paiements. Plusieurs d'entre eux seront amenés à substituer d'autres produits aux importations de pétrole, même lorsque de tels produits ne seront aucunement concurrentiels sur le marché international. En conséquence, l'attrait des produits de substitution du pétrole pour les pays en développement est non seulement fonction des prix mondiaux du pétrole, comme nous venons de l'indiquer, mais aussi de la croissance mondiale. Bien que le processus de croissance mondiale semble se faire par cycles, les forces qui les produisent ne sont pas encore assez bien connues pour permettre des prévisions fiables (Freeman et al. 1982).

Subventions directes et indirectes Selon l'un des principes reconnus de la politique économique, il est préférable, pour améliorer la répartition des revenus, d'accorder un montant général qui peut être consacré à un large éventail de produits plutôt qu'une subvention qui est conditionnelle à la consommation d'une marchandise donnée. Toutefois, l'application de ce principe dans divers pays donne lieu à de graves difficultés. Chaque pays présente des conditions particulières qu'il faut évaluer pour déterminer si le principe peut lui être appliqué. Ici encore, l'expérience antérieure n'est pas assez concluante pour nous permettre d'établir le juste milieu entre le possible et l'optimal, d'où la validité des divers jugements de valeur que l'on peut formuler à cet égard.

Ce ne sont là que quelques-unes des questions auxquelles les membres du Groupe pouvaient rattacher divers points de vue aussi valables les uns que les autres. La neutralité du présent rapport sur ces questions et d'autres se base sur la possibilité d'écarts rationnels, ce qui n'empêche pas les membres d'avoir chacun leur propre opinion.

Chapitre 3 La recherche et son environnement

La recherche doit présenter un caractère utile et valable fondé sur la qualité des relations qui existent entre les chercheurs, les directeurs et les utilisateurs de la recherche.

Les gouvernements sont des institutions servant à résoudre des litiges ; le rôle central de l'énergie, l'ampleur des investissements énergétiques et le coût d'importation ou les gains d'exportation d'énergie obligent les gouvernements des pays en développement, peu importe leur idéologie, à prendre des mesures dans ce domaine. La politique énergétique doit être orientée vers les choix de l'avenir afin de pouvoir en retenir quelques-uns et de sélectionner les instruments qui permettront d'atteindre les objectifs nationaux ; c'est à ce moment que la recherche peut améliorer la prise de décision à chaque étape. Mais pour ce faire, il est essentiel que la recherche puisse être entreprise par des institutions spécialisées munies des fonds nécessaires et capables de fournir des conseils en toute liberté. Le gouvernement doit être un acheteur informé plutôt que l'auteur des travaux de recherche.

Bon nombre d'entreprises des pays en développement peuvent procéder à une analyse poussée de leur environnement et doivent être encouragées à le faire. Les gouvernements ont le devoir d'accorder leur aide à cette tâche, et non à la R&D en tant que telle, ainsi qu'à la création de structures commerciales concurrentielles qui incitent les entreprises à innover, plutôt qu'à la mise au point d'innovations particulières. Les établissements de recherche au service des petites entreprises doivent entretenir des relations étroites avec des producteurs et prendre sous leur aile des innovations jusqu'à ce que les risques inhérents à leur commercialisation soient réduits au minimum.

Pour plus d'efficacité, les établissements de recherche doivent accumuler l'expérience, transmettre leurs connaissances intellectuelles, veiller à l'emploi approprié de leur actif intellectuel et regrouper diverses disciplines pour s'attaquer aux problèmes. Les fonds de programme dont ces établissements disposent devraient servir à constituer une base intellectuelle et matérielle dans certains secteurs de la recherche, et les projets devraient être mis au point pour utiliser cette base. Les directeurs des établissements de recherche jouent un rôle de premier plan dans la coordination des chercheurs, problèmes, programmes et projets. Pour être de bonne qualité, la recherche doit absolument reposer sur la formation et la communication.

Les organismes d'aide internationaux jouent un rôle neutre, sinon négatif, dans l'établissement d'une capacité de recherche dans les pays en développement. Les grands organismes de ce genre financent les travaux de recherche de grande envergure destinés à des projets particuliers d'immobilisation et laissent aux petits organismes d'aide les travaux de moindre importance qui n'ont généralement aucun rapport avec la production ou la commercialisation. Il ne leur incombe pas d'établir les liens entre la politique énergétique, la production et l'utilisation

d'énergie, d'une part, et la recherche d'autre part. Cette désarticulation caractéristique des pays en développement découle de la domination des sociétés multinationales employées à la production de matériel énergétique nécessitant l'apport de capitaux considérables, de la faiblesse des entreprises nationales des pays en développement et enfin du manque d'agressivité des politiques énergétiques adoptées par les gouvernements des pays en développement. On constate aussi que les organismes internationaux d'aide contribuent à cette désarticulation et font bien peu pour corriger les points faibles des établissements de recherche des pays en développement.

Le présent chapitre s'intéresse à la recherche énergétique mais une grande partie de nos propos seront de portée plus générale.

La recherche comporte deux caractéristiques essentielles mais difficiles à définir : son utilité et sa qualité. Lorsqu'elle est soumise à une évaluation sociale ou économique, la recherche doit, directement ou indirectement, servir un but pratique; mais cela ne suffit pas. Toute recherche qui débouche sur des conclusions erronées aura des conséquences néfastes proportionnelles à l'importance de ses applications. La recherche doit donc être à la fois utile et valable.

La recherche est un produit intermédiaire qui peut servir à la réglementation, à la production ou à la consommation. Dans ces activités, plusieurs choix s'offrent à elle : diminuer les risques afférents aux décisions, augmenter le nombre d'options, réduire les coûts ou améliorer la qualité des biens et services. On ne pourra donc juger de son utilité qu'en fonction des conséquences qu'elle aura.

Toutefois, ces conséquences se situent toutes dans des domaines extérieurs à la recherche. Les avantages de la recherche profitent donc aux utilisateurs en aval — c'est-à-dire les décideurs, les producteurs ou les organismes d'aide. Ces utilisateurs doivent savoir comment utiliser les résultats de la recherche afin de pouvoir en tirer des décisions pratiques; il leur faut donc posséder une certaine formation dans les disciplines propres à la recherche. Nous soulignerons l'importance d'utilisateurs éclairés dans la mise en place d'une recherche valable dans les diverses industries, notamment l'industrie du pétrole et de l'électricité, mais dans un sens plus général : plus vaste sera la formation des utilisateurs de la recherche, plus nombreuses seront les applications qu'ils pourront en retirer. Par exemple, le concept de la tension superficielle pourrait sembler beaucoup trop complexe au profane pour avoir une application pratique, mais on lui connaît au moins deux usages dans le domaine de l'énergie : la prévention de l'entartrage dans les tubes des chaudières mécaniques et l'économie d'eau chaude pour les opérations de lavage et de nettoyage.

Un directeur de recherche éclairé est tout aussi important qu'un utilisateur éclairé, mais son besoin de connaissances est différent. On sait que la classification des connaissances ne suit pas un principe d'utilité mais repose plutôt sur des théories et des outils. En conséquence, lorsqu'un problème pratique se pose, il faut décider à quel domaine de la connaissance il appartient et, souvent, le répartir en plusieurs sous-problèmes auxquels pourront s'attaquer des chercheurs individuels ou de petites équipes; de la même manière, les résultats que ces derniers obtiendront devront ensuite être regroupés pour constituer des solutions pratiques. Ce processus de subdivision des problèmes et d'intégration des résultats exige que le directeur de la recherche possède une compétence particulière.

On tentera dans les sections qui suivent de définir les répercussions de ces principes au niveau des principaux établissements qui utilisent et effectuent la recherche.

Les administrations publiques

Les administrations publiques effectuent ou commandent beaucoup de recherches à caractère politique ; parallèlement, d'autres chercheurs, qui veulent influencer la politique, entreprennent à leurs frais, pour le compte de ces administrations, un nombre encore plus important de travaux de recherche. Essentiellement, les gouvernements sont des institutions qui ont pour but de résoudre des litiges et de réglementer les forces en jeu dans le domaine politique, cependant, pas toujours avec la même sagesse et les mêmes pouvoirs. Les règles qu'ils adoptent dans la résolution des litiges varieront entre un laisser-faire absolu et un interventionnisme intégral. Mais quelle que soit l'idéologie des gouvernements, les problèmes à caractère énergétique ont presque toujours obligé les administrations publiques à prendre des mesures dans un grand nombre de domaines, notamment les suivants :

Balance des paiements La gestion des réserves de devises étrangères est toujours entre les mains de l'État. La hausse des prix du pétrole a forcé un certain nombre de gouvernements de pays en développement à adopter diverses mesures correctives portant, par exemple, sur la réglementation des importations, la substitution à l'importation, le développement des exportations, la fluctuation du taux de change et les transactions financières internationales. Malgré un fléchissement des prix du pétrole, quelques-uns de ces gouvernements ont encore beaucoup de mal à régler la note de leurs importations de pétrole, passées ou présentes, ainsi que les importations de matériel et d'équipement énergétique divers. Trois facteurs ont contribué à aggraver les difficultés de paiement des pays en développement : une chute des prix réels des matières premières, une hausse des taux réels d'intérêt et des restrictions aux importations imposées par quelques pays industrialisés. Dans la mesure où les importations ou exportations d'énergie d'un pays en développement influent sur la vulnérabilité de sa balance des paiements, ce pays devra continuer à adopter des mesures correctives rigoureuses.

Gestion des ressources nationales Lorsqu'un pays exploite des ressources énergétiques épuisables ou dont il ne peut assurer le renouvellement à partir d'un certain seuil d'exploitation, son gouvernement se voit alors forcé d'établir les directives suivantes : identifier les exploitants, fixer les prix, déterminer le rythme d'exploitation, cerner le taux d'imposition ou le volume des subventions, mettre au point une méthode de rationnement en cas de pénurie et enfin adopter une politique en matière de rentes.

Délais de gestation et périodes d'incertitude Certaines formes de production à caractère énergétique (il peut s'agir d'exploitation de mines de charbon, de forage et de production de pétrole, de construction de centrales de production d'énergie) ainsi que les fluctuations des schémas de consommation qui entraînent le remplacement d'équipement doivent s'étaler sur bon nombre d'années et faire l'objet d'une longue planification. Pour certaines formes d'énergie, l'importance des investissements minimums requis nécessite l'harmonisation des courbes de l'offre et de la demande. Les investissements privés dans le secteur énergétique sont motivés par l'espoir d'un bénéfice, lui-même largement tributaire de la politique de l'État. Ainsi, toute mesure progressive d'un gouvernement peut réduire le coût des investissements dans le secteur de l'énergie et les rendre plus opportuns.

Besoins essentiels Il importe de partager les produits essentiels, y compris l'énergie, en cas de pénurie ou d'une forte montée des prix afin d'éviter une privation généralisée.

Monopoles Qu'ils soient naturels ou forcés, les monopoles doivent faire l'objet d'une réglementation pour prévenir la montée des prix ou l'inefficacité des entreprises. Les monopoles, y compris les monopoles d'État, sont monnaie courante dans le secteur de l'énergie. En outre, un certain nombre de pays, notamment les petits, importent leur pétrole ou exportent leurs ressources sans possibilité de négociation avec les fournisseurs ou les acheteurs.

Conflits d'intérêts Les grands projets comme les barrages, mines et corridors de transport d'énergie touchent des populations tellement vastes que les gouvernements doivent arbitrer les divergences d'intérêts des groupes économiques et des groupes sociaux. Bien que l'on reconnaisse le principe général de compensation des perdants par les gagnants, l'importance de cette compensation et les mécanismes nécessaires à sa mise en place peuvent varier d'un endroit à l'autre.

Politique énergétique

La place de plus en plus grande et l'importance critique qu'occupe l'énergie dans les économies nationales témoignent de l'intérêt que manifestent les administrations publiques, les chercheurs et les responsables du développement pour cerner les questions énergétiques et pour tracer les grandes lignes de la politique énergétique. Il importe d'analyser, de planifier et de gérer la politique énergétique pour assurer la plus grande efficacité et les meilleures retombées aux principaux projets, programmes et initiatives qui en découleront. Étant donné que la plupart des pays en développement consacrent au moins le tiers des investissements publics au secteur de l'énergie, et que certains importateurs de pétrole ont affecté 50 % ou plus de leurs recettes d'exportations à l'achat de pétrole importé au cours des dernières années, même de petites améliorations au niveau de l'approvisionnement et de l'utilisation de l'énergie sont à souhaiter.

D'un point de vue plus général, la planification de l'énergie fait appel à une série d'étapes ou de procédés permettant d'étudier et de comprendre à l'intérieur d'un cadre analytique explicite la multitude d'interactions qui existent entre la production et l'utilisation d'énergie. Les techniques de planification peuvent varier des simples méthodes manuelles au procédé complexe de modélisation par ordinateur. La complexité des problèmes en matière d'énergie a obligé les intéressés à utiliser de plus en plus cette dernière approche. L'analyse de la politique énergétique se veut un examen systématique des répercussions de certaines mesures ou d'une politique énergétique dans son ensemble sur l'économie et la société à tous les niveaux. La gestion de l'énergie, qui comprend à la fois la gestion de l'offre et de la demande, repose sur un ensemble choisi de mesures et de réglementation nécessaires pour atteindre les objectifs énergétiques et économiques visés.

Il importe que la recherche énergétique dans les pays en développement vise à améliorer la qualité de la planification énergétique, l'analyse des politiques et du processus de gestion. De façon particulière, ces études doivent aussi s'étendre aux méthodes utilisées pour assurer une mise en oeuvre plus efficace de la politique de l'énergie. Pour mieux comprendre le rôle de la recherche énergétique, commençons par tracer quelques-uns des buts généraux de la politique énergétique du point de vue national.

La principale raison d'être de la planification et de la formulation de politiques nationales dans les pays en développement est d'assurer la meilleure utilisation possible des maigres ressources disponibles afin d'accroître le développement socio-économique global et d'améliorer le bien-être et la qualité de vie des citoyens.

La planification énergétique constitue donc un élément essentiel de la planification économique d'un pays et doit être effectuée et mise en oeuvre en étroite coordination avec celle-ci (Munasinghe 1980). Toutefois, qu'on l'applique à l'économie nationale ou au secteur de l'énergie en particulier, le concept de planification ne doit pas nécessairement faire naître l'idée d'un cadre rigide comme celui que l'on retrouve dans les économies centralisées ou entièrement planifiées. Toutes les économies, par conception ou par omission volontaire, même celles où règnent en maître les forces du marché, font appel à une certaine forme de planification. La planification énergétique et la formulation d'une politique énergétique s'attachent principalement à une analyse détaillée du secteur de l'énergie, de ses rapports avec le reste de l'économie ainsi qu'à l'étude des interactions entre les sous-secteurs énergétiques.

Il convient de mettre au point un processus de planification et d'élaboration de la politique énergétique afin de pouvoir répondre aussi efficacement que possible aux nombreux objectifs nationaux en rapport étroit, et souvent contradictoire, les uns avec les autres. Parmi les buts particuliers habituellement énoncés, mentionnons : établir en détail les besoins en énergie de l'économie et y répondre pour atteindre le niveau prévu de croissance et de développement; choisir les diverses sources d'énergie qui serviront à satisfaire la demande future aux plus bas coûts possibles; minimiser le chômage; économiser les ressources énergétiques et éliminer la consommation inutile; diversifier les sources d'approvisionnement et réduire la dépendance aux exportations; satisfaire les exigences nationales en matière de sécurité et de défense; répondre aux besoins énergétiques fondamentaux des pauvres; économiser les rares devises étrangères; identifier les mesures particulières relatives à l'offre et à la demande d'énergie qui contribueront au développement prioritaire possible de régions ou de secteurs particuliers de l'économie; générer suffisamment de recettes à partir des ventes d'énergie pour financer le développement du secteur énergétique; stabiliser les prix; préserver l'environnement; et ainsi de suite.

Ainsi, les gouvernements joueront inévitablement un rôle important dans les domaines liés directement ou indirectement à l'énergie et pourront, si leurs politiques se basent sur des calculs macro-économiques rationnels, améliorer significativement la répartition de leurs ressources et diminuer les risques (Munasinghe 1984a). Mais pour prendre les bonnes décisions, il faut se doter d'un cadre politique pertinent. Dans le domaine de l'énergie, il s'agira (i) d'une prévision ou d'une vue à long terme, (ii) d'un plan ou d'un aperçu des problèmes et des solutions proposées et (iii) des instruments à utiliser pour mettre en oeuvre les solutions.

Prévisions

Les longs délais de gestation dans les investissements énergétiques et les modifications structurales de la consommation constituent la raison principale de l'établissement des prévisions. Celles-ci devraient au moins tenir compte des délais maximums de gestation, voire une période plus longue. Par exemple, des prévisions sur quinze ou vingt ans ne sont pas rares dans le secteur de l'électricité, de même qu'il serait justifié d'en établir de durée semblable ou supérieure pour les charbonnages.

Il est possible d'établir des prévisions naïves par une simple extrapolation des tendances passées; cela réduit au minimum les besoins en information et produit des résultats parfois aussi justes que des méthodes plus complexes. Toutefois, les prévisions n'ont pas simplement pour but de mettre au point un ensemble d'estimations futures, mais bien aussi de faire mieux comprendre les procédés en cause. Il

est donc souhaitable d'utiliser des modèles de prévision qui tiennent compte des secteurs énergivores ainsi que des principales contraintes d'ordre macro-économiques ; en fait, les prévisions énergétiques ont bien peu d'utilité sauf dans le contexte de l'avenir de l'économie perçu dans son ensemble.

Il est banal mais quand même important de souligner qu'une prévision doit comporter un jugement de valeur extérieur; elle ne sert pas à améliorer un jugement mais simplement à en définir les répercussions. Tout jugement sur l'avenir relève de l'imagination quelle que soit la masse de renseignements sur lesquels on s'appuie. Les renseignements portent sur le passé et le présent et pour établir de bonnes prévisions, il faut savoir interpréter les tendances inhérentes à l'histoire. Cependant, il est également nécessaire de prévoir et d'intégrer aux prévisions les grands changements entre le passé et l'avenir. Donnons un exemple de l'interprétation erronée d'un tel changement : de nombreux pays en développement importateurs de pétrole ont réagi à la flambée des prix du pétrole de 1973–1974 en contractant des emprunts à court terme ainsi qu'en accroissant leurs exportations et en remplaçant leurs importations à long terme. Comme cette stratégie avait donné d'excellents résultats, les pays ont cherché à la répéter lors de l'ascension des prix de 1979–1980. Or, cette stratégie ne pouvait pas être répétée parce que les circonstances avaient changé. En effet, les pays en développement importaient plus de pétrole en 1979 qu'en 1973 et disposaient donc d'une moins grande marge de manoeuvre pour y intégrer des produits de substitution; en outre, les débouchés favorables à une croissance des exportations se faisaient plus rares. En conséquence, les pays en développement n'ont pu rembourser les dettes qu'ils venaient de contracter et, dans certains cas, ont dû faire face à une situation d'endettement insurmontable (Campbell 1983).

La rupture entre le passé et le présent suscitée par la hausse des prix du pétrole a échappé au contrôle des pays en développement touchés. Mais il y a aussi des changements sur lesquels on peut exercer un contrôle. Dans le langage de la modélisation, on fait une distinction entre les variables exogènes et les variables instrumentales et si les prévisions à partir de variables exogènes débouchent sur des situations inacceptables ou insoutenables pour l'avenir, il faudra introduire dans les variables instrumentales les solutions de continuité qui permettront d'obtenir des résultats plus réalistes ou mieux adaptés, ce qui est l'essence même de la planification. Cependant, le train des mesures à prendre suit un rythme dicté par l'ampleur des solutions de continuité introduites, ce qui fait souvent naître la controverse entre les planificateurs. C'est un débat de ce genre qui anime la conctroverse relative aux récentes prévisions mondiales en matière d'énergie. La planète fait face à un avenir inacceptable composé d'une baisse des approvisionnements pétroliers et d'un accroissement des niveaux de gaz carbonique dans l'atmosphère. Certains futurologues préconisent des modifications minimales qu'il faudrait apporter au mode de vie actuel et aux relations de puissance pour s'assurer un avenir supportable, alors que d'autres ont souhaité des changements plus fondamentaux (Goldemberg et al. 1985). De la même manière, des prévisions à l'échelle nationale suscitent des débats sur les voies du futur souhaitables, débats qui sont essentiels à l'émergence de choix sûrs et acceptables par la majorité.

Plans

Le but des prévisions est de déterminer l'avenir probable et improbable alors que les plans visent à choisir un avenir optimal parmi tous ceux qui sont réalisables et à tracer les étapes nécessaires à sa mise en oeuvre. La planification traîne une longue histoire derrière elle et a hérité de tout un bagage de connotations. Pour

prévenir toute mauvaise interprétation pouvant découler d'associations du genre, il faut souligner que les plans dont il est question ici ne désignent pas des plans quinquennaux; pour les fins de la gestion énergétique, un pays aurait besoin d'un certain nombre de plans interreliés pour des intervalles variés s'étendant sur des périodes beaucoup plus longues. Le plan ne désigne pas non plus ici l'orientation centrale de toutes les activités économiques. Parmi les pays en développement, certains se plient à une très forte centralisation qui a donné des résultats parfaitement valables sur le plan de l'économie ou de l'énergie. Cependant, une telle orientation n'est pas essentielle. Il faut plutôt permettre à l'État d'intervenir de façon sélective dans les activités à l'égard desquelles les pouvoirs publics doivent jouer un rôle actif afin d'éviter les crises majeures qu'entraîne une mauvaise gestion de l'énergie. Nous n'avons d'ailleurs pas à faire ressortir ici l'extrême gravité de ces crises au cours des dernières années.

Les récents travaux de modélisation sur l'intégration de la planification et de la politique énergétique nationales ont permis d'établir un cadre analytique plus structuré qui reconnaît au moins trois niveaux distincts d'analyse : l'analyse macro-économique, l'analyse par secteur et sous-secteur et enfin l'analyse des interactions entre ceux-ci. Cette méthode nous permet également de mieux situer les mesures à prendre. Tout récemment, l'avènement des micro-ordinateurs a donné aux analystes des pays en développement l'occasion d'utiliser un outil flexible, puissant et d'un coût relativement modeste pour les aider à développer et à appliquer quelques-uns de ces modèles (Munasinghe et al. 1985). Au niveau le plus élevé et le plus global de l'approche hiérarchique de modélisation, il importe de reconnaître clairement le secteur de l'énergie comme partie intégrante du système socio-économique global. En conséquence, la planification énergétique doit reposer sur une analyse des liens entre le secteur de l'énergie et le reste du système. Le deuxième niveau aborde le secteur de l'énergie comme une entité distincte composée de sous-secteurs comme l'électricité, les produits pétroliers, la biomasse et bien d'autres. Cela permet d'effectuer une analyse détaillée de certaines utilisations finales en s'attachant tout particulièrement aux relations entre les différents sous-secteurs, aux possibilités de substitution et à la résolution de tout problème au niveau de la politique. Le troisième et dernier palier dans la hiérarchie concerne la planification au sein de chaque sous-secteur. Par exemple, le sous-secteur de l'électricité doit déterminer sa propre prévision de demande et ses propres programmes d'investissement à long terme.

Instruments

Le processus de planification doit permettre la mise au point d'une stratégie souple et constamment mise à jour en matière d'énergie, qui puisse répondre aux buts nationaux dont nous avons fait mention précédemment. On peut mettre en oeuvre une telle stratégie au moyen d'un train de mesures et de programmes de gestion de l'offre et de la demande énergétiques (Munasinghe 1983).

Pour réaliser les buts nationaux définis, les gouvernements des pays du Tiers-Monde disposent d'outils politiques qui leur permettent une gestion optimale de l'énergie. Ce sont : des contrôles physiques; des méthodes techniques; des investissements directs ou des politiques de stimulation des investissements; l'éducation et la promotion; et la fixation des prix, l'imposition de taxes et l'octroi de subventions et d'autres stimulants fiscaux. Étant donné le lien qui existe entre tous ces outils, il convient de les coordonner étroitement pour obtenir un effet maximum.

Les *contrôles physiques* trouvent leur plus grande utilité à court terme lorsqu'il y a pénurie imprévue d'énergie. Toutes les méthodes de restriction de la consomma-

tion par des moyens physiques, comme les diminutions de puissance, les coupures rotatives d'énergie dans le sous-secteur de l'électricité, la diminution ou le rationnement des approvisionnements d'essence ou l'interdiction d'utiliser des automobiles pendant des périodes particulières, font partie de cette catégorie. Cependant, on peut aussi recourir aux contrôles physiques comme mesures à long terme.

Parmi les *moyens techniques* servant à gérer l'offre d'énergie, mentionnons l'identification du moyen le plus efficace de produire une forme donnée d'énergie, le choix de la combinaison de combustibles la moins chère, la recherche et le développement de combustibles de remplacement comme l'huile de schiste, le charbon ou le gaz naturel, la substitution de l'alcool à l'essence, et ainsi de suite. On peut aussi influencer la demande d'énergie par la technologie, par exemple en favorisant l'introduction de mécanismes d'économie d'énergie plus efficaces comme des automobiles à consommation moins élevée, de meilleurs poêles à bois et des recherches sur des appareils de chauffage solaire et la promotion de ces derniers.

Les *politiques d'investissement* ont un effet important sur les schémas de consommation et d'approvisionnement d'énergie à long terme. Parmi ces politiques, mentionnons le prolongement de réseaux de distribution de gaz naturel, la construction de nouvelles centrales alimentées par des combustibles plus accessibles comme le charbon, ou la mise au point de réseaux de transport en commun. Il convient de souligner que bon nombre de ces mesures peuvent très bien être entreprises par des secteurs autres que l'énergie — par exemple, des investissements dans les installations de transport ou l'installation ou l'électrification systématique de pompes d'irrigation pour puits profonds. De toute évidence, la réalisation de ces entreprises nécessite une collaboration étroite entre les planificateurs et les administrateurs de l'énergie.

L'éducation et la promotion peuvent contribuer à améliorer la situation de l'offre d'énergie en sensibilisant les citoyens à des façons rentables de réduire la consommation d'énergie, à la consommation découlant de l'utilisation de certains appareils ou véhicules et à la possibilité de substituer le capital à l'énergie (p. ex. une isolation adéquate).

Les *taxes et subventions* constituent des instruments de politique utiles qui peuvent également influer profondément sur les schémas de consommation de l'énergie à long terme. Par exemple, les pays qui ont imposé des taxes élevées sur l'essence ont généralement bien réussi à restreindre l'utilisation de l'automobile, à mettre en place des parcs de véhicules plus efficaces, et ainsi de suite. De la même façon, les subventions ont encouragé les immobilisations dans des projets d'économie d'énergie.

La recherche et la politique

Lorsqu'on se dote d'une politique énergétique fondée sur les trois éléments ci-avant — c'est-à-dire des prévisions, des plans et des instruments — on génère des besoins substantiels de recherche. Ce type de recherche n'est pas rare dans les pays en développement. Bien qu'il ait prévalu chez certains d'entre eux même à une époque antérieure, bon nombre en ont reconnu le besoin lorsque sont apparus les graves problèmes énergétiques des années 70. D'autres ont été forcés de présenter des plans aux organismes d'aide internationaux afin de justifier le montant du financement demandé pour leurs projets d'investissements. En outre, les organismes internationaux d'aide à la recherche ont naturellement considéré cette recherche comme un moyen relativement peu dispendieux de s'associer à l'élaboration des

politiques. La recherche «politique» n'a donc pas été négligée, mais sa qualité pourrait être améliorée par des changements organisationnels notamment.

Lorsqu'elle est bien articulée, la politique énergétique devrait avoir un effet considérable sur la recherche, et la recherche sur la politique. Or, nos spécialistes ont constaté que la relation entre les priorités nationales et les activités des centres de recherche était ténue pour ne pas dire absente (Bhushan 1984; Torres 1984). La plupart des travaux de recherche dans les pays en développement sont financés par l'État. Lorsque le gouvernement désire obtenir une opinion extérieure sur sa politique, il le fait inévitablement de façon rapide, mais il n'obtient pas une réponse aussi vite qu'il le voudrait des établissements de recherche indépendants. (Les délais de gestation dans la recherche sont supérieurs à ceux que l'on retrouve en formulation de politiques et le compromis qui s'opère entre la rapidité et la qualité est souvent différent pour le chercheur et le stratège.) En outre, beaucoup de gouvernements désirent influencer l'opinion des établissements de recherche d'où leur tendance à délaisser les centres de recherche indépendants et à mettre sur pied des instituts de recherche captifs, ou à embaucher leurs propres consultants. Les deux réagissent plus vite aux demandes ponctuelles mais la qualité de leur recherche en souffre.

Lorsqu'on exige des résultats rapides, on a moins de temps à consacrer à des travaux de recherche proprement dits et on doit alors se fier davantage aux connaissances accumulées. Malheureusement, ni les consultants ni les organes officiels de recherche ne possèdent les moyens appropriés pour accumuler une vaste somme de connaissances. Les deux ont tendance à survoler rapidement des domaines très divers afin d'y glaner les renseignements disponibles; ni l'un ni l'autre n'emmagasinent systématiquement les connaissances dans des bibliothèques, des bases de données ou du personnel. Il en résulte donc un travail répétitif et dérivé, surtout dans le domaine socio-économique, où la répétition est habituellement synonyme de rabâchage de lieux communs.

Dans les pays en développement, il est primordial que la recherche portant sur la politique énergétique puisse compter sur des établissements de recherche indépendants et spécialisés pouvant servir de dépositaires de la connaissance. Que les établissements indépendants ne répondent pas à ces besoins aujourd'hui constitue un manquement organisationnel et politique que l'on peut corriger. Parmi le train de mesures correctives nécessaires, celles qui suivent ci-dessous sont plus fondamentales.

En premier lieu, les gouvernements ne devraient pas accorder leur aide financière surtout aux établissements de recherche captifs; en outre, cette aide ne devrait pas englober toutes les formes de dépenses des établissements de recherche qu'ils subventionnent. Les fonds devraient être affectés à l'infrastructure des établissements de recherche, surtout aux fonctions qui sont essentielles à la qualité de la recherche, par exemple la bibliothèque, les instruments, les installations expérimentales, les installations informatiques et la formation de la main-d'oeuvre. Sur le plan de la main-d'oeuvre, les fonds devraient servir à la formation de chercheurs qui se spécialiseront dans l'étude des politiques énergétiques : il conviendrait donc d'intégrer ces spécialistes et leurs projets à des établissements de recherche équipés adéquatement. La rémunération et les autres conditions devraient être assez uniformes pour encourager des échanges actifs entre les stratèges, les chercheurs voués à la politique énergétique et les autres chercheurs.

En deuxième lieu, il importe que les gouvernements deviennent des acheteurs éclairés de la recherche. Pour cela, il faut que les fonctionnaires responsables de l'achat et de l'évaluation de la recherche disposent de la formation et de l'ex-

périence voulues : en fait, ils devraient pouvoir être interchangeables avec ceux qui produisent la recherche à leur intention et ils devraient effectivement se remplacer mutuellement de temps à autre. Les gouvernements font souvent appel aux gens d'expérience des entreprises et des établissements de recherche, mais la situation inverse a une importance tout aussi grande si les gestionnaires doivent devenir des évaluateurs compétents de la recherche. L'élaboration d'une politique énergétique est une fonction de responsabilité qui comporte souvent un aspect technique; bon nombre de gouvernements dans les pays en développement essaient d'obtenir à cet égard du personnel hautement qualifié en créant des structures administratives dotées de privilèges spéciaux ou en retenant à grands frais les services de consultants de l'extérieur. Mais il ne suffit pas au gouvernement de s'assurer un personnel à quotient d'intelligence élevé; il faut également alimenter cette intelligence à l'aide de connaissances que l'on puisera de temps à autre à l'extérieur du gouvernement.

En troisième lieu, la recherche socio-économique constitue une base utile à la recherche de nature politique même si elle n'y est pas directement pertinente ou qu'elle ne semble pas épouser la politique du gouvernement. La collecte de renseignements socio-économiques à grande échelle peut être un processus très coûteux et, à moins d'une subvention de l'État, ce type de recherche intégrée aura tendance à être négligé comme il arrive dans bon nombre de pays en développement. Le gouvernement peut stimuler la recherche socio-économique en recueillant et en publiant des statistiques et d'autres renseignements ainsi qu'en finançant la collecte et la diffusion de ces données par les établissements de recherche.

Il serait bon à ce moment de faire le point sur la question de la recherche «politique» et de la dissension. La recherche qui est directement liée à l'élaboration de politiques constitue seulement une partie de la recherche socio-économique; la recherche découle également en grande partie des activités routinières des chercheurs ainsi que de la critique formulée à l'égard des politiques. Dans les sociétés qui possèdent les mécanismes nécessaires à l'alternance pacifique des gouvernants et de leurs politiques, la critique sert à vérifier la validité des politiques et à étendre l'éventail des solutions de rechange possibles. Lorsque le changement n'est pas un processus institutionnalisé, la critique de l'État est souvent considérée comme une menace à l'autorité et supprimée. Vu que nous favorisons le changement systématique et pacifique dans nos sociétés, il va sans dire que nous ne sympathisons pas avec les régimes fragiles et non représentatifs. La capacité de faire progresser les connaissances et de les utiliser à des fins politiques est une ressource que ne peuvent facilement obtenir les gouvernements intolérants à la dissension intellectuelle.

Liberté de manoeuvre

De manière générale, plus un pays est vaste, moins il dépend du monde extérieur et plus il dispose d'une grande marge de manoeuvre dans l'élaboration de ses politiques. En outre, les retombées économiques de la recherche dépendent de son échelle d'application; c'est là une des raisons principales pour lesquelles la recherche a tendance à être concentrée dans les grands pays. Toutefois, la vaste majorité des pays en développement sont de taille restreinte. S'ils veulent acquérir une plus grande liberté pour énoncer leurs politiques, ils devront surveiller de plus près la recherche effectuée chez leurs voisins et coordonner entre eux les politiques qu'ils adoptent. S'ils souhaitent se doter de meilleurs moyens pour réaliser et utiliser la recherche, ils devront partager les coûts, les installations et les retombées de la recherche. À l'heure actuelle, les pays en développement se trouvent presque tous en Afrique, en Amérique latine et en Asie; la plupart de leurs voisins sont

d'autres pays en développement et la collaboration régionale entre eux suppose également une collaboration sud–sud.

Les producteurs

Les producteurs sont les praticiens et les principaux dépositaires de la technologie de production. Cependant, les producteurs de biens et services ne sont pas tous producteurs de technologie nouvelle ou améliorée. Les études techniques intensives ont tendance à être effectuées dans les établissements de recherche et d'enseignement. Au sein des industries, l'innovation technologique est susceptible de se retrouver dans celles qui exploitent des procédés équivalents ou semblables pour la fabrication d'un vaste éventail de produits, notamment dans les domaines du génie, de l'électricité, de l'électronique et de la biotechnologie.

L'absence ou la taille relativement petite de ces industries innovatrices dans les pays en développement explique en partie leur rôle négligeable au chapitre des innovations. Mais ce n'est pas la seule cause : à notre avis, il y en a d'autres qui peuvent être corrigées. Nous discuterons des possibilités d'intervention dans trois sphères : la R&D, la capacité technologique et l'infrastructure technologique.

Recherche et développement

On a coutume de déplorer la tendance des producteurs dans les pays en développement à importer leur technologie plutôt que d'en élaborer une qui leur soit propre (Cooper 1973; Stewart 1977). Dans le domaine de l'énergie, nous avons observé des cas exceptionnels d'innovations inspirées par la R&D, par exemple des automobiles fonctionnant à l'alcool et des fonderies de fer au charbon de bois au Brésil (Torres 1984). Mais dans l'ensemble, la portée et l'efficacité de la R&D dans les pays en développement laissent beaucoup à désirer.

Dans son interprétation usuelle, le concept de la recherche et du développement comporte deux éléments. Le premier est la mise à l'essai de procédés sur une petite échelle, ou de prototypes uniques ou fabriqués en série, en vue de minimiser les coûts et de réduire les risques inhérents à une production à grande échelle. Le second est l'étape de développement qui a pour but d'intégrer les résultats de la recherche dans un système de production viable. La recherche appliquée est connue et bien comprise dans les pays en développement; en fait, on pourrait dire qu'il y a trop de recherche appliquée et pas assez de développement. C'est d'ailleurs ce que suggère la répartition des 365 projets de recherche sur les sources d'énergie nouvelles et renouvelables en Amérique latine, projets énumérés par la Banque interaméricaine de développement et l'Institut pour l'intégration de l'Amérique latine en 1981. Seulement 7 % d'entre eux visaient directement «le développement de masse», c'est-à-dire la commercialisation, alors que 28 % étaient de grands projets qui pourraient éventuellement avoir des répercussions significatives sur la substitution de produits énergétiques. Toutefois, bon nombre de ces projets appartenaient à des domaines où il était encore trop tôt pour commercialiser les résultats de la recherche.

La plupart — peut-être la totalité — des projets indiqués au tableau 1 ne comptent pas parmi ceux des producteurs; l'une des causes du déséquilibre entre la recherche appliquée et la commercialisation dans les pays en développement vient

Tableau 1. Répartition (%)[a] de 365 projets de recherche sur les sources d'énergie nouvelles et renouvelables en Amérique latine, 1981.

	Argentine	Brésil	Colombie	Costa Rica	Mexique	Uruguay	Moyenne
Genre de recherche							
Recherche de base	22	14	27	23	25	45	26
Recherche et développement	66	81	61	73	68	55	67
Développement de masse	12	5	12	4	7	0	7
Genre de technologie							
Simple, petite échelle, faibles répercussions	55	21	58	35	46	41	41
Complexe, niveau intermédiaire, répercussions importantes	32	44	4	27	27	4	31
Complexe, grande échelle, répercussions imp.	12	35	38	38	27	55	28

Source : Banque interaméricaine de développement et Institut pour l'intégration de l'Amérique latine (1981).
[a]Parce qu'ils ont été arrondis, les chiffres ne totalisent pas toujours 100.

de la plus grande générosité financière de l'État envers les établissements de recherche qui ne sont pas rattachés à des producteurs, et dont bon nombre appartiennent à l'État. Les producteurs bénéficient de stimulants fiscaux pour leurs dépenses de R&D, mais ils reçoivent rarement des subventions directes pour leurs travaux de recherche et de développement. Plusieurs raisons sont invoquées : par exemple, les producteurs devraient financer leur R&D vu que celle-ci contribue à leurs bénéfices; les résultats de la R&D ne seraient pas largement diffusés; les producteurs ont des comptes à rendre à un propriétaire privé, etc.

Dans de nombreuses économies de marché développées, les politiques sont différentes puisque l'État finance la R&D des entreprises privées. En effet, l'État considère ce traitement de faveur des entreprises privées comme un avantage national au niveau de la concurrence internationale. En outre, en finançant directement la recherche, les gouvernements peuvent influencer son orientation, ce qu'ils ne pourraient faire par des stimulants fiscaux. Aux États-Unis, en France et au Japon, l'administration publique a particulièrement bien réussi à influencer le développement technologique de quelques-unes des industries énergétiques du pays.

Ainsi, le recours aux deniers publics pour financer la chaîne complète de R&D dans les entreprises de fabrication représente un instrument que les pays en développement pourraient utiliser plus à profit pour produire de nouvelles technologies adaptées à leur environnement. Une telle stratégie pourrait ne pas fonctionner lorsque les entreprises productrices sont des multinationales puisqu'elles pourraient ignorer les besoins nationaux de la recherche pour se concentrer sur la recherche et le développement dans leur pays d'origine. L'émergence d'entreprises productrices nationales est donc une condition préalable à une stratégie nationale de R&D.

Le développement n'est pas simplement affaire de financement, mais nécessite aussi des compétences spéciales en gestion. Il suppose la construction de grandes usines dans le cas d'industries de transformation, et des installations de production de masse dans le cas d'industries de fabrication. Comme les usines nécessitent

presque toujours un apport important de l'extérieur, le directeur du développement aura pour tâche de coordonner les différents facteurs de production de façon à pouvoir mettre en place des usines au moindre coût en vue d'une production de haute qualité. Cette coordination fait appel à une combinaison de compétences techniques et commerciales, celles de l'acheteur éclairé. Voilà pourquoi il est impossible de séparer le développement du producteur.

Ainsi, il faut délaisser les projets de R&D pour s'employer à donner aux producteurs des pays en développement les moyens d'entreprendre des travaux de R&D ou d'élaborer, de commercialiser et de diffuser des produits inspirés de la recherche étrangère (Munasinghe 1984b).

Capacité technique

La R&D est une catégorie statistique découlant de la recherche sur les sources d'innovation. Cependant, qu'un producteur innove ou non n'est pas invariablement lié à la présence d'un service de R&D ou au budget qu'il y consacre. Ce qu'il importe de savoir, c'est s'il observe l'environnement commercial et s'il y réagit sur le plan technologique. Plus le taux de changement technologique s'accélère, plus cette fonction de surveillance prend de l'importance pour les petites entreprises notamment. Les changements au niveau de la science, de la technologie et du marché apportent des modifications rapides à l'environnement extérieur d'une entreprise. L'entreprise qui n'est pas vigilante et qui ne prévoit pas les changements sera victime de bouleversements inattendus; cependant, l'entreprise qui étudie les changements peut adapter sa technologie en conséquence et transformer la menace en une occasion favorable. Une installation de R&D constitue une ressource, pas la seule cependant, pour mettre au point et accélérer des solutions technologiques face aux changements extérieurs (Freeman 1982).

La surveillance de l'environnement pour modifier les produits et les procédés comporte des avantages évidents même lorsqu'une entreprise importe de l'extérieur la plus grande partie de sa technologie. Ainsi, l'observation technologique complexe est à la portée de bon nombre d'entreprises des pays en développement et mérite des encouragements directs et indirects — par exemple, par des centres coopératifs de surveillance industrielle, des consultants, des bibliothèques, etc.

La connaissance du marché est l'un des aspects qui découlent de cette observation éclairée. L'interaction technologique entre l'acheteur et le vendeur est une source importante d'innovation dans les pays industrialisés; et une caractéristique de premier plan du développement technologique dans les industries du pétrole, du charbon et de l'électricité par exemple. Ainsi, il est utile de pouvoir apprendre de l'expérience des autres, non seulement dans les industries de fabrication de matériel, mais aussi parmi les producteurs de pétrole, les entreprises de charbonnage et les sociétés d'électricité des pays en développement.

Conditions extérieures

Dans les deux sections précédentes, nous avons indiqué que la R&D et la capacité technologique constituaient deux aspects de l'ajustement technologique à l'environnement économique. De ces deux aspects, la mise en place d'une capacité technologique est accessible à une proportion beaucoup plus grande de producteurs et autant pour ces derniers que pour ceux qui s'occupent de R&D, les sources extérieures d'idées représentent un facteur très important dans le processus d'inno-

vation, en fait plus important que leur propre contribution (Pavitt 1984). Le lien qui existe entre l'innovation et l'information qui a servi à la produire n'est cependant ni direct ni prévisible; les renseignements clés proviennent souvent d'une recherche étrangère au processus en question (Munasinghe 1984b). Ainsi, la recherche effectuée à l'extérieur du secteur commercial peut fortement contribuer à l'innovation (comme nous le verrons dans la prochaine section), mais une interaction fréquente entre les techniciens de l'industrie et de la recherche scientifique n'en demeure pas moins essentielle. Des relations de ce type s'installent d'autant plus facilement qu'il y a eu des contacts antérieurs entre élèves et enseignants entre les deux groupes et elles seront beaucoup plus fréquentes et efficaces si elles se font verbalement. On a constaté que la consultation de scientifiques à l'extérieur des entreprises et leur participation directe contribuaient à l'innovation (Price et Bass 1969).

Les innovations importantes sont rares et espacées; le plus souvent, on exploitera plutôt une série d'améliorations technologiques sur de longues périodes. C'est ainsi que l'on a pu rehausser l'efficacité des usines thermiques en augmentant progressivement la pression et la température de la vapeur, que l'on a accru la capacité des grues à bennes traînantes dans les mines de charbon ou que l'on a amélioré l'efficacité des piles photovoltaïques. Dans ce genre de changement graduel, l'exemple et l'émulation sont importants, mais l'émulation le sera davantage si un producteur peut observer des concurrents déployant les plus récentes techniques. Les débats interminables sur l'effet de la structure du marché et du changement technologique n'apportent pas de conclusion probante (Kamien et Schwartz 1982), mais ce qui importe n'est pas la structure particulière du marché, mais bien la possibilité pour les producteurs de se mesurer à des concurrents ayant adopté les dernières innovations technologiques.

Lorsqu'on regarde les pays en développement, on peut difficilement dire qu'un type de propriété est supérieur à un autre : il y en a une grande variété et les écarts de performance semblent aussi grands à l'intérieur de chaque type qu'entre ceux-ci. Toutefois, le concept de propriété influe indéniablement sur la capacité technologique, à cause de l'autonomie de la direction, son niveau de complexité technique, son ouverture sur l'extérieur et la souplesse de l'organisation lorsque doivent être rapidement apportés des changements structuraux au sein de l'entreprise.

Petits producteurs

Ce qui précède touche les grands producteurs industriels qui peuvent se permettre un effectif et des ressources techniques considérables. Beaucoup plus nombreux sont les petits producteurs pour qui la recherche est pleine de risques. Le résultat de la recherche est incertain : certains projets de recherche pourront engendrer des superbénéfices alors que d'autres entraîneront des pertes. Un petit producteur ne peut pas entreprendre autant de projets de recherche et est plus vulnérable aux pertes imprévisibles de la recherche (Casimir 1983).

Dans de nombreux secteurs d'activité des pays en développement, on trouve généralement une multiplicité de producteurs qui sont trop petits même pour songer à des projets de recherche. Il serait faux de supposer que les innovations découlent uniquement de la recherche ou sont l'apanage des grands producteurs. Mais, si l'on effectue des recherches pour de petits producteurs, il importe que ces derniers puissent en utiliser les résultats. Par exemple, on rencontre au moins trois ensembles de programmes de recherche dans le domaine de l'énergie — sur le charbon de bois, les poêles à bois et les boisés — tous destinés aux petits producteurs. Il est

nécessaire à ce stade de se demander ce que l'on pourrait faire pour améliorer la technologie à la portée des nombreux petits producteurs qui disposent de moyens techniques limités.

En premier lieu, il est rare qu'une innovation touche uniquement une étape d'un processus de production. Habituellement, les innovations liées à des produits nécessitent des modifications de procédés de sorte qu'un changement à une partie d'un procédé se répercutera sur d'autres parties du même procédé. Dans une grande entreprise où l'on retrouve toutes les étapes propres à une innovation, ces ajustements structuraux proviennent de l'interaction entre les différents services de l'entreprise, par exemple le service de R&D, le service technique, le service des achats et les autres services hiérarchiques. En fait, la capacité d'innovation d'une grande entreprise repose fondamentalement sur le niveau de coordination entre les services qui génèrent des idées et ceux qui se chargent d'intégrer ces idées au processus de production. Dans le cas de petits producteurs, ces deux fonctions sont nécessairement distinctes : les idées doivent venir d'un établissement de recherche extérieur après quoi les producteurs les mettent en oeuvre. La coordination des deux fonctions se révèle plus difficile mais non moins nécessaire. Il est essentiel que les chercheurs gardent des contacts étroits avec quelques producteurs, dès le départ, de manière à connaître les réactions d'utilisateurs éventuels de la recherche. L'absence de relations étroites entre les deux mène souvent à un transfert prématuré des innovations avant qu'elles ne soient prêtes à être commercialisées, et donc à un échec.

En deuxième lieu, la centralisation de tout le processus d'innovation dans une grande entreprise garantit à cette dernière les retombées de l'innovation tant et aussi longtemps que des imitateurs n'envahissent pas son marché : il y a un lien direct entre l'investissement dans l'innovation et les retombées de celle-ci. Chez les petits producteurs, ce processus est rompu ; c'est l'établissement de recherche qui assume les coûts de l'innovation alors que les avantages reviennent aux producteurs. Il se pourra que l'établissement de recherche essaie de s'approprier une partie des bénéfices de l'innovation au moyen des redevances. Toutefois, l'ampleur des bénéfices qui pourront être détournés dépendra du temps pendant lequel les producteurs pourront conserver l'usage exclusif de l'innovation. Les petits producteurs copient habituellement si vite les innovations qu'il est difficile d'en restreindre l'utilisation à quelques-uns. Même si cela était possible, l'égalité d'accès à tous les producteurs et la diffusion rapide de l'innovation pourront être considérées d'intérêt public. L'intérêt public combiné à la difficulté de cerner les bénéfices de l'innovation milite en faveur de subventions de l'État dans la R&D chez les petites entreprises.

En troisième lieu, l'introduction d'innovations est souvent une entreprise risquée. Les petits producteurs ont une capacité de risque limitée et le coût d'un échec leur est beaucoup plus difficile à absorber à cause de la sous-capitalisation de leur entreprise et de la vive concurrence à laquelle ils font face. En conséquence, le transfert des innovations aux petits producteurs doit être assorti d'un mécanisme permettant d'éliminer ou de réduire les risques afférents. Les innovations qui s'adressent aux petits producteurs doivent avoir été mises à l'essai et perfectionnées beaucoup plus que s'il s'agissait de grandes sociétés, et même dans ce cas, il sera peut-être aussi nécessaire d'éliminer les risques ou de les partager à plusieurs.

En dernier lieu, dans la mesure où l'introduction d'une innovation fait appel à une mise de fonds ou à des compétences techniques, les petits producteurs ne pourront y avoir accès qu'en fonction de l'emprise qu'ils auront sur ces deux facteurs. De façon générale, les producteurs solidement établis et disposant d'une

plus grande capacité technique sont plus en mesure d'adopter des innovations. Ainsi, les retombées des innovations ont tendance à être mal réparties, ce qui se répercute sur la distribution inégale des ressources entre les petits producteurs.

La recherche pose donc des problèmes particuliers aux petits producteurs. Les autorités d'un certain nombre de pays en développement — et même de quelques pays industrialisés — connaissent ces problèmes et ont essayé de diverses manières de les résoudre. Un examen comparé de leurs tentatives serait d'une grande utilité pratique.

Fabricants de matériel

Le marché international conventionnel des sociétés d'électricité affiche un caractère extrêmement oligopole et une concurrence très faible. Soixante-dix pour cent des exportations d'équipement électrique dans le monde proviennent de quatorze entreprises situées dans cinq pays industriels — les États-Unis, la République fédérale allemande, le Japon, la France et le Royaume-Uni. Par l'intermédiaire de leurs filiales, ces entreprises se bâtissent des sphères d'influence dans les pays en développement; la concurrence est même moins forte au sein de chaque marché qu'à l'échelle internationale (Surrey et Chesshire 1984). Dans ces circonstances, un pays industrialisé se verra moins forcé de stimuler les exportations de ses entreprises nationales que sur des marchés plus concurrentiels, qui se satisfont plus ou moins des projets financés à parts égales par les institutions multilatérales. Cependant, comme l'indique le tableau 2, l'aide nationale bilatérale sert largement à financer les achats de matériel mécanique du pays donateur.

La concentration des marchés est encore plus grande dans le cas des centrales nucléaires. Des 194 réacteurs construits dans les économies de marché jusqu'en 1984, 132 provenaient de quatre entreprises — deux des États-Unis, une de la France et une du Canada, tous des pays exploitant d'importants programmes nationaux d'énergie nucléaire (Desai 1984). Le marché des pays d'Europe de l'Est est desservi par l'U.R.S.S. qui possède elle-même de grandes installations nucléaires (Chung 1985). L'influence des gouvernements de pays-hôtes sur l'exportation de matériel et de technologie est beaucoup plus forte dans le cas d'une centrale nucléaire que d'une centrale électrique conventionnelle, à cause de ses répercussions sur la prolifération du nucléaire. Aussi, la difficulté à acquérir la technologie a amené un certain nombre de pays en développement, y compris l'Argentine et l'Inde, à développer leur propre capacité de construction des centrales nucléaires.

Les marchés de l'équipement pétrolifère et gazier sont plus concurrentiels, mais ce sont des entreprises des États-Unis qui prédominent dans le secteur de la fabrication de ces types d'équipements. Toutefois, les projets d'exploitation du pétrole dans la Mer du Nord, en Asie du Sud-Est et en Chine ces dernières années ont permis à des fabricants de matériel pétrolifère au Royaume-Uni, en France et au Japon d'ouvrir leurs portes pour ensuite bénéficier souvent de prêts, officiels ou non, de la part de leur pays en vue de pénétrer le marché mondial.

Dans le domaine de l'extraction du charbon, les conditions locales varient beaucoup d'un endroit à l'autre et, de ce fait, on attache beaucoup d'importance à l'adaptation locale des machines et à la formation sur le tas. Les machines fabriquées dans chaque pays tiennent compte des conditions locales, conférant ainsi aux marchés de matériel un caractère hautement national. Toutefois, le Japon, dont la production de charbon est minime, a réussi à développer une vigoureuse industrie d'équipement minier axée sur les exportations. Le Japon, la République fédérale

Tableau 2. Prêts et crédits à l'exportation pour les pays en développement, destinés au secteur de l'énergie : A. 1975–1981 (millions de $ US).

	Charbon	Uranium	Pétrole et gaz	Électricité	Autre	Total
Institutions multilatérales	**376**	**17**	**1 748**	**14 511**	**528**	**17 180**
Banque mondiale	92	–	1 357	8 491	451	10 391
Banque africaine de développement	–	–	–	234	–	234
Banque asiatique de développement	51	–	120	1 779	–	1 950
Banque interaméricaine de développement	233	–	262	3 141	77	3 713
Banque européenne d'investissement	–	17	9	866	–	892
Crédits à l'exportation	**493**	**45**	**9 687**	**24 548**	**591**	**35 364**
Autriche	–	–	28	490	–	518
Belgique	43	41	184	206	–	474
Canada	123	–	473	2 995	–	3 591
Espagne	–	–	328	140	–	468
États-Unis	75	–	2 256	5 320	34	7 685
France	10	4	4 653	3 201	15	7 883
Italie	–	–	53	369	–	422
Japon	24	–	1 052	1 279	538	2 893
Pays-Bas	–	–	3	601	4	608
République de Corée	–	–	–	6	–	6
République fédérale allemande	182	–	113	4 415	–	4 710
Royaume-Uni	36	–	524	4 806	–	5 366
Suisse	–	–	20	720	–	740
Total	**869**	**62**	**11 435**	**39 059**	**1 119**	**52 544**

Sources : Rapports annuels des banques de développement africaine, asiatique et interaméricaine; Duersten (1983); et la Banque mondiale (1980a, 1983a).

Tableau 2. Prêts et crédits à l'exportation pour les pays en développement, destinés au secteur de l'énergie : B. 1980–1982[a] (millions de $ US).

	Développement énergétique	Pétrole	Gaz	Charbon	Nucléaire	Hydro-électricité	Transmission et distribution de l'électricité	Combustible ligneux et charbon de bois	Alcool	Géothermique	Coopération technologique[b]	Biogaz	Énergie solaire	Non précisé	Total
Institutions multilatérales	**197**	**1 494**	**842**	**1 135**	**50**	**2 639**	**4 157**	**122**	**276**	**85**	–	–	–	**771**	**11 768**
Banque mondiale	189	1 244	324	504	–	1 473	1 898	–	250	76	–	–	–	506	6 464
Ass. internationale de développ.	8	142	123	525	–	203	752	100	–	–	–	–	–	172	2 025
Banque africaine de développ.	–	29	–	31	–	23	30	–	–	–	–	–	–	1	114
Fonds africain de développement (FAD)	–	–	–	–	–	2	29	12	–	–	–	–	–	10	53
Banque asiatique de développ.	–	–	158	–	50	175	580	–	–	–	–	–	–	52	1 015
BAD (Asie) (Fonds spécial)	–	5	66	–	–	8	207	10	–	–	–	–	–	29	325
Banque interaméricaine de développ.	–	50	155	75	–	682	498	–	26	9	–	–	–	1	1 496
BID (Opérations spéciales)	–	24	16	–	–	73	163	–	–	–	–	–	–	–	276
OPEP	–	**117**	**47**	**23**	–	**401**	**131**	–	–	–	–	–	**5**	**872**	**1 596**
Financement bilatéral de faveur	–	75	47	1	–	332	83	–	–	–	–	–	–	616	1 154
Financement multilatéral de faveur	–	42	–	12	–	56	48	–	–	–	–	–	5	219	382
Financement multilatéral ordinaire	–	–	–	10	–	13	–	–	–	–	–	–	–	37	60
Gouvernements	**70**	**660**	**449**	**1 775**	**61**	**1 930**	**1 231**	**26**	**11**	**172**	**(807)**	**8**	**2**	**1 440**	**8 642**
Australie	3	–	–	3	–	3	–	–	–	–	12	–	–	1	22
Autriche	–	22	–	–	–	7	–	–	–	–	–	–	–	144	173
Belgique	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	13	13
Canada	6	57	–	–	–	76	106	–	–	–	(30)	2	–	64	341
Commission économique européenne[d]	–	58	15	114	17	190	300	–	–	9	6	–	1	45	755

(suite)

Tableau 2B (fin).

	Développement énergétique	Pétrole	Gaz	Charbon	Nucléaire	Hydro-électricité	Transmission et distribution de l'électricité	Combustible ligneux et charbon de bois	Alcool	Géothermique	Coopération technologique[b]	Biogaz	Énergie solaire	Non précisé	Total
Danemark	–	7	–	–	–	–	30	–	–	–	2	–	–	1	40
États-Unis	42	11	–	5	–	94	77	6	–	–	(75)	–	–	206	516
Finlande	–	–	–	–	–	2	7	–	–	–	–	–	–	3	12
France[c]	13	63	11	40	35	179	56	3	–	–	(90)	6	1	196	693
Italie	–	–	–	–	–	–	–	–	–	5	(18)	–	–	82	105
Japon[c]	–	203	371	1 169	9	884	339	–	11	132	(244)	–	–	387	3 749
Norvège	–	3	1	–	–	13	2	–	–	–	(36)	–	–	5	60
Nouvelle-Zélande	4	–	–	–	–	–	–	–	–	4	6	–	–	4	18
Pays-Bas	–	6	5	1	–	6	48	11	–	–	(52)	–	–	19	148
Républ. fédérale allemande	–	65	3	170	–	310	234	–	–	–	111	–	–	217	1 110
Royaume-Uni[c]	–	165	41	273	–	97	27	5	–	22	(118)	–	–	27	775
Suède	–	–	2	–	–	61	5	1	–	–	(6)	–	–	25	100
Suisse	2	–	–	–	–	8	–	–	–	–	1	–	–	1	12
Crédits à l'exportation[e]	**–**	**5 553**	**1 325**	**411**	**2 123**	**1 686**	**850**	**–**	**42**	**63**	**–**	**–**	**–**	**6384**	**18 437**
Total	**267**	**7 824**	**2 663**	**3 344**	**2 234**	**6 656**	**6 369**	**148**	**329**	**320**	**(807)**	**8**	**7**	**9 467**	**40 443**

Source : Chiffres tirés des tableaux 5, 6 et 7 de l'Organisation de coopération et de développement économiques (1984).

[a] Les sources d'énergie nouvelles et renouvelables comprennent aussi, outre celles qui sont énumérées à part — hydro-électricité, combustible ligneux, alcool et géothermique — le biogaz, l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie motrice, la tourbe, les schistes pétroliers et les sables bitumineux ainsi que la traction animale. Toutefois, seuls des chiffres négligeables figurent pour les dernières catégories dans le système de déclaration du crédit sur lequel repose ce tableau. Ces chiffres sont compris sous la rubrique «Non précisé».

[b] Les données touchant la collaboration technique ne font l'objet que d'une divulgation partielle aux termes du système de déclaration du crédit et ont donc été estimées à partir des chiffres de l'Organisation de coopération et de développement économiques (1984), mais ne peuvent toutefois être réparties entre les secteurs secondaires. Les coûts de la collaboration technique sont compris dans les coûts des projets lorsqu'il y a des institutions multilatérales en cause.

[c] Comprend aussi les prêts ordinaires au développement : France — 170 millions de $ US; Japon — 1 514 millions de $ US; Royaume-Uni — 150 millions de $ US.

[d] Comprend la Banque européenne d'investissement (413 millions de $ US).

[e] Comprennent seulement les crédits officiels garantis comportant une échéance supérieure à 5 ans.

d'Allemagne et le Royaume-Uni sont les principaux exportateurs à recevoir l'appui de leurs banques et de leurs gouvernements nationaux respectifs.

Ainsi, les fabricants d'équipement énergétique s'approprient leur part du marché grâce à la maîtrise d'un type ou l'autre de technologie. Ils dépendent dans une certaine mesure des exportations, celles qu'ils acheminent vers les pays en développement constituant en général une faible proportion de leurs ventes totales à l'étranger. Les marchés sont souvent divisés en sphères d'influence. Lorsqu'ils doivent livrer concurrence, les exportateurs bénéficient de prêts (officiels ou non) dans leurs pays.

Dans ces conditions, quelques-uns des plus importants pays en développement peuvent mettre en place une capacité de production d'équipement en interrompant leurs importations, mais étant donné la faible envergure des marchés nationaux, les entreprises de ces pays doivent continuer à importer leur technologie. Leur accession sur le marché international est limitée à la fois par leur dépendance technologique et par les relations qui existent entre les fabricants d'équipement et les organismes de financement de leur pays. Dans ces pays en développement, les fabricants qui affichent une grande production énergétique sont parfois en mesure de changer cette situation et d'accéder éventuellement aux marchés internationaux, mais pour ce faire, ils devront bâtir leur propre capacité technologique et obtenir de leur pays un crédit considérable à l'échelle internationale. Étant donné l'importance des forces en jeu et du rôle majeur des pouvoirs publics, une collaboration entre pays voisins pourrait être particulièrement avantageuse à cet égard.

Les établissements de recherche

Nous avons dit précédemment que la capacité technologique des producteurs reposait sur les moyens à leur disposition pour modifier leurs procédés techniques en fonction du milieu socio-économique. Les établissements de recherche et de formation sont les dépositaires des connaissances accumulées et des compétences nécessaires au progrès de celles-ci. Les problèmes qu'ils s'emploient à résoudre doivent refléter les conditions de leurs pays et sociétés alors que les solutions qu'ils examinent doivent s'inspirer de leurs connaissances et expériences accumulées. Ils doivent entretenir des relations avec le gouvernement et l'industrie qui utiliseront les conclusions de leurs recherches. Voici les diverses fonctions qu'ils devraient assumer :

Accumulation d'expérience La qualité de la recherche est étroitement liée à l'expérience accumulée par les chercheurs à partir des applications soutenues jusqu'aux recherches méticuleuses, qui doivent toutes être effectuées dans des installations de bonne qualité. Les gouvernements et les producteurs appliquent la connaissance sur une courte période en fonction des utilisations et ils sont mal équipés pour accumuler des connaissances. Les établissements de recherche constituent des réservoirs de compétences auxquels d'autres utilisateurs peuvent puiser. Ils doivent posséder un minimum de compétence pour avoir une influence marquée.

Diffusion des compétences intellectuelles La somme des travaux que peut effectuer un chercheur au cours de sa vie est limitée. Pour faire progresser les connaissances, il est essentiel que les chercheurs travaillent ensemble, qu'ils accroissent leurs compétences et qu'ils les transmettent aux générations postérieures de chercheurs et enfin qu'ils fassent l'éducation de ceux qui ne sont pas engagés dans

la recherche. Les établissements de recherche et de formation doivent avoir les moyens de transférer leurs compétences intellectuelles.

Utilisation efficace du patrimoine intellectuel Les connaissances des établissements de recherche sont largement accessibles et du domaine public ; ces établissements doivent être situés de manière à permettre l'utilisation la plus vaste et la plus complète de leurs bibliothèques, salles de cours, instruments, etc.

Juxtaposition de disciplines diverses Les idées foncièrement différentes proviennent souvent de la juxtaposition de théories appartenant à des disciplines non apparentées. Bon nombre de problèmes pratiques nécessitent une combinaison de divers domaines de connaissances. Les établissements de recherche polyvalents devraient donc constituer des lieux de rencontre pour les diverses disciplines.

Financement de la recherche

Ce qui distingue — ou devrait distinguer — les établissements de recherche de ceux que l'on retrouve dans le secteur public et privé tient aux connaissances plus diverses et plus étendues qu'ils appliquent à la solution d'un problème, celles-ci devant aussi s'appuyer sur des installations de recherche supérieures — bibliothèques, laboratoires, installations informatiques, etc. Voilà précisément le genre d'éléments que délaisse le financement de projets orientés sur les résultats. Les organismes de recherche à l'échelle nationale et internationale s'emploient à acheter la recherche à son coût marginal qui se compose principalement de frais de personnel. On se retrouve donc avec une main-d'oeuvre sans moyens matériels adéquats, d'où la baisse de qualité de la recherche. Le financement des projets canalise également l'effort des chercheurs dans une série de projets de recherche à court terme sans aucun lien les uns avec les autres et leur enlève toute possibilité d'approfondir un sujet donné.

L'approche utilitaire débouche sur des établissements trop spécialisés. Les domaines prioritaires de la recherche changent constamment alors que les établissements éprouvent un besoin naturel de se perpétuer. Si l'on accorde une aide financière pour de nouveaux domaines à de vieux établissements versés dans une spécialité traditionnelle, il y a danger que les fonds soient détournés vers les anciens domaines. D'où la tendance à créer de nouveaux établissements pour de nouveaux domaines de compétence. Cependant, les disciplines ne suivent pas les priorités sociales, étant plutôt en constante évolution afin de conférer une plus grande efficacité à la recherche. Les sujets à la mode se divisent sans cesse de manière à ce que chacun puisse être étudié par un petit nombre de chercheurs qui peuvent communiquer les uns avec les autres, vérifier leurs travaux respectifs et profiter de l'expérience de leurs collègues (Menard 1971). Ainsi, la prolifération d'établissements bloqués dans une spécialisation définie selon l'utilité du moment donne lieu à des travaux de piètre qualité et à une faible productivité.

Le besoin d'investir à long terme dans la connaissance et d'adapter la recherche aux besoins changeants de la société représentent deux objectifs difficiles à concilier. Beaucoup de solutions ont été mises de l'avant un peu partout dans le monde mais aucune n'est idéale. Le financement de programmes a souvent été critiqué. Cependant, les organismes d'aide dans les pays démocratiques doivent justifier l'utilité de leurs activités auprès de leur gouvernement et du public et être en mesure d'évaluer et de prouver l'efficacité de leurs résultats dans des délais raisonnables. Ils préfèrent financer des projets à court terme, plus faciles à contrôler et à surveiller que des programmes qui nécessitent une méthode d'évaluation.

À notre avis, les considérations précédentes nous conduisent à un système de financement doté des éléments suivants :

Croissance par ajout Les grands établissements pluridisciplinaires partagent les installations, offrent de plus grandes possibilités d'interaction entre les chercheurs et, en conséquence, embrassent des domaines de recherche plus vastes. Parallèlement, les établissements doivent s'adapter aux nouvelles orientations de la demande. La solution n'est pas de laisser proliférer le nombre de petits établissements nouveaux, mais bien de permettre aux anciens de se développer en leur confiant les programmes conçus pour répondre aux nouveaux besoins.

Le financement de programmes comme moyen d'investissement Les établissements devraient bénéficier d'une aide financière à long terme pour tous leurs besoins matériels et humains dans les nouveaux secteurs qu'ils abordent. La création de nouveaux programmes ne devrait survenir que si l'on peut déjà compter sur des installations matérielles appropriées pour effectuer une recherche de qualité.

Les projets comme rendement de l'investissement Il ne faudrait pas considérer les projets comme une méthode de financement de la recherche, mais plutôt comme un investissement financier dans un programme auquel on peut recourir. Lorsqu'on étudie la mise en place de nouveaux programmes, il faut tenir compte du volume de projets que ceux-ci peuvent attirer. Le choix des programmes et l'affectation des crédits à chacun d'eux reposeront alors sur la quantité de projets qu'ils sont susceptibles de générer.

Orientation décentralisée des programmes Pour assurer le succès d'un programme, il est de la plus haute importance de lui conférer autonomie et continuité dans son orientation. On se doit de diriger les établissements de recherche comme des coopératives de programmes. Du même coup, une gestion active des programmes est essentielle à une mise en oeuvre efficace des projets.

Centralisation du processus de planification et d'affectation des ressources L'affectation à court terme des chercheurs et des autres ressources mobiles se fait en fonction des besoins des projets. Mais pour utiliser pleinement les chercheurs et leur offrir une carrière qui les amènera à devenir des personnes-ressources compétentes et expérimentées, il faut choisir chaque programme de manière à donner à ces chercheurs une expérience utile. En outre, la recherche est un long processus alors que ses utilisateurs veulent obtenir les résultats sans délai. On peut combler partiellement cet écart en instaurant des programmes de recherche axés sur une prévision des besoins. C'est à la direction des établissements qu'incombe cette capacité de prévision et la gestion des ressources nécessaires à l'accumulation d'expérience et de connaissances.

Orientation de la recherche

À notre avis, le programme doit constituer l'unité de gestion de la recherche. Celui-ci doit bénéficier d'un financement sur une assez longue période — entre cinq et dix ans — pour ensuite être continué ou augmenté en fonction des projets qu'il attire, ou éliminé. Le programme doit être l'instrument permettant de transformer l'investissement en un projet réussi. Pour assumer cette fonction, il importe de conférer au programme une autonomie considérable dans la façon de dépenser son budget, d'embaucher son personnel, de cerner des projets et de les mener à bien. C'est pourquoi nous considérons que la plupart des fonctions administratives et des pouvoirs devraient ressortir à des directeurs de programme; il conviendrait donc que ces derniers disposent à la fois d'un pouvoir d'autonomie et de contrôle.

La tâche du directeur de programme comporte des responsabilités énormes. D'une part, il est chargé de répartir les tâches sous forme de travaux de recherche entre des chercheurs ou des équipes et, d'autre part, de coordonner les résultats et de les présenter sous une forme pouvant être utilisée par le client. Le directeur de programme a donc besoin d'un savoir-faire technique et d'une compétence en gestion et sera considéré comme une espèce rare qu'il faudra traiter avec les plus grands égards.

Si le directeur du programme fait bien son travail, on n'a pas à se préoccuper de la plupart des tâches quotidiennes de gestion dans la direction globale de l'établissement de recherche. Essentiellement, le directeur s'emploie à gérer les ressources communes — y compris les fonds à répartir entre les programmes, pouvant provenir soit de subventions extérieures, soit de recettes générées par les projets eux-mêmes — et à procéder à leur planification.

Recherche et formation

La recherche et la formation diffèrent l'une de l'autre par de nombreux aspects :

- La recherche a pour but de produire des données de haute qualité pour les utilisateurs; l'objet de la formation est d'accroître la capacité intellectuelle du stagiaire. La recherche comporte un aspect de formation et la formation peut englober un élément de recherche. Si l'on utilise la recherche pour la formation, on risque d'obtenir de maigres résultats et de gaspiller le temps de tout le monde; par contre, si l'on affecte les stagiaires à une recherche, ils pourraient bien n'acquérir qu'une formation négligeable.
- Les intervalles en cause sont différents. Pour garantir et surveiller le progrès des stagiaires, on divise habituellement la formation en courtes périodes uniformes. Dans le cas de la recherche, l'intervalle est plus souple et généralement d'une plus longue durée.
- Bien que cela ne constitue pas une différence absolue, la formation met en relation un stagiaire et un enseignant; dans la recherche, il est habituellement essentiel de constituer des équipes et de coordonner le travail de chacun. Dans la formation, les problèmes doivent être assez simples pour pouvoir être résolus par un seul stagiaire dans une période relativement courte. On ne peut imposer aucune restriction de ce genre aux travaux réels de recherche; dans la recherche, la taille de l'équipe est dictée par l'ampleur du problème.

Ainsi considérées, la recherche et la formation peuvent toutes deux perdre de leur utilité si elles sont intégrées d'une façon trop étroite. Cependant, leur séparation serait aussi indésirable car elles sont complémentaires. Elles requièrent toutes deux un matériel similaire. La recherche peut amener un chercheur à se poser des questions et à mettre à l'épreuve la valeur de ses idées. Il est donc souhaitable que la recherche et la formation se fassent dans des établissements parallèles qui partagent les mêmes installations et s'échangent du personnel.

Communication de la recherche et informatique

La recherche a pour but de faire avancer les connaissances, mais elle peut aussi les redécouvrir. Pour faire progresser les connaissances, les chercheurs doivent en connaître très bien l'état actuel. Bien que l'un des buts de l'éducation et de la

formation ait été de donner à tous les chercheurs un stock initial minimum de connaissances, le niveau de connaissance varie considérablement d'un chercheur à l'autre dans la même discipline; l'accès à des bibliothèques bien garnies et à des collègues expérimentés peut être fort différent selon les établissements de recherche, et ce problème affecte les établissements des pays en développement. Le piètre état des communications dans les pays en développement contribue à cette inégalité de l'accès.

Cependant, les récents progrès technologiques dans le domaine de l'informatique permettent de réduire cette inégalité (Munasinghe et al. 1985). Les techniques automatisées de stockage et de repérage de l'information font leur entrée dans les bibliothèques. Les systèmes actuels sont soit petits et d'une capacité limitée, soit imposants, dispendieux et conçus sur mesure. L'absence de systèmes moins coûteux et plus normalisés s'explique ainsi : les principales bibliothèques des pays industrialisés ont un âge vénérable et une collection imposante, les coûts de conversion de leur système de catalogage sont élevés et leur système manuel de catalogage impose des exigences particulières au produit informatisé qui les remplacera. Ces contraintes touchent moins les bibliothèques plus récentes et plus petites des pays en développement. Il est donc dans leur intérêt de promouvoir la mise en place et l'adoption de systèmes de catalogage informatisés d'une polyvalence et d'une utilité plus grandes pour les chercheurs.

Grâce à l'informatique et aux techniques d'automatisation, le transfert de l'information devient plus facile et moins coûteux. L'emploi de satellites a réduit considérablement les immobilisations d'établissement de réseaux de communications et a permis la transmission auditive, visuelle ou codée (par exemple sous forme écrite) des données. L'application de ces techniques de communication bon marché et pratiques aux pays en développement doit attendre la rénovation de leur réseau actuel de télécommunications et l'installation de terminaux. Cependant, les énormes avantages que l'on peut retirer de meilleures applications de l'informatique et des communications dans le domaine de la recherche énergétique, sous forme d'une meilleure qualité et d'une élimination des chevauchements, sont évidents.

L'élimination des chevauchements prend une importance encore plus étendue aux yeux des utilisateurs de la recherche et des organismes de financement que chez les chercheurs, car une familiarisation plus grande avec l'état actuel des connaissances peut éviter le gaspillage de ressources pour des recherches répétitives. Il s'ensuit donc que les utilisateurs de la recherche et les organismes de financement devraient considérer les dépenses au titre des bibliothèques, des communications et des réseaux de recherche comme des façons d'accroître l'efficacité de leur programme total de dépenses en matière de recherche.

Les organismes internationaux d'aide

Il est paradoxal de constater que les organismes internationaux d'aide constituent le seul groupe pour lequel nous disposions de statistiques complètes et intéressantes sur ses activités.

Investissements

Les organismes financent deux genres d'activités, l'investissement et la recherche. Au total, les prêts bonifiés et autres consentis à l'énergie par les économies de

marché développées à des pays en développement entre 1975 et 1981 ont atteint 92 milliards de dollars US, qui se répartissent comme suit : prêts multilatéraux, 17 milliards de dollars US; prêts bilatéraux bonifiés, 10 milliards de dollars US; prêts de banques commerciales, environ 30 milliards de dollars; et le reste, 35 milliards de dollars, sous forme de crédit à des fournisseurs non assortis de conditions libérales (estimations de la Banque mondiale (1983a)). À l'exception du matériel fabriqué dans quelques-uns des grands pays en développement, surtout au Brésil, en Chine, en Inde, au Mexique et en République de Corée, presque tout l'équipement servant à la transformation et à la production d'énergie à grande échelle a été importé par des pays en développement et la presque totalité de ces importations ont été financées dans une large mesure par des prêts et des crédits à l'exportation. Ainsi, le financement d'une grande proportion des investissements dans l'énergie de nombreux pays en développement s'est fait grâce à des prêts consentis sous une forme ou une autre.

Des estimations plus détaillées figurent dans deux sources et sont résumées au tableau 2; les deux comportent cependant des lacunes. Nous ne possédons pas la répartition des prêts officiels bilatéraux pour la période 1975–1981, alors que pour 1980–1982, les crédits à l'exportation comprennent uniquement les crédits assortis d'une garantie officielle et d'un terme de plus de cinq ans : sont exclus les crédits de moins de cinq ans assortis d'une garantie officielle, que l'on évalue à environ la moitié des crédits de plus de cinq ans, ainsi que les crédits ne comportant aucune garantie officielle et pour lesquels nous ne disposons d'aucun chiffre.

Fait à remarquer dans ces chiffres, presque tous les prêts multilatéraux sont destinés à la production d'énergie (par opposition à ceux consacrés aux économies d'énergie) et une forte proportion sont destinés au secteur de l'électricité. Leur part des prêts est également plus élevée dans le secteur de l'électricité que dans toute autre industrie. Ce secteur affiche certaines caractéristiques qui le rendent attirant pour les organismes de financement. Ses centrales constituent des ensembles bien définis dont il est facile de prévoir les immobilisations. Elle exige une technique normalisée et il est plus difficile, mais pas impossible, de mal la gérer. Dans la plupart des pays en développement, la demande d'électricité s'est accrue rapidement et une centrale électrique est donc moins susceptible de souffrir de l'absence de la demande. Enfin, ces centrales sont tout simplement raccordées à des réseaux; l'électricité n'a besoin d'aucune mesure spéciale de commercialisation aussi longtemps que la demande s'accroît. Toutefois, ces caractéristiques sont suffisamment intéressantes pour amener tous les organismes de financement et non seulement les établissements multilatéraux à accorder des prêts aux sociétés d'électricité. Les pays en développement préfèrent emprunter des établissements multilatéraux à cause du taux d'intérêt plus faible et de la période de remboursement beaucoup plus longue qu'ils offrent, alors que les établissements, à titre de prêteurs privilégiés, choisissent les prêts qu'ils désirent assumer.

D'autre part, à cause de leurs conditions de prêt favorables, les établissements multilatéraux sont impopulaires auprès des organismes de financement, qu'il s'agisse d'organismes officiels nationaux ou de banques privées; en outre, la pression politique que ces derniers exercent tient les établissements multilatéraux en dehors des marchés qui intéressent tout particulièrement leurs concurrents.

Le volume des prêts internationaux au titre des investissements dans l'énergie non traditionnelle est extrêmement faible et se limite principalement au charbon de bois, à l'alcool et à l'énergie géothermique, toutes des industries à plus ou moins grande échelle. La plus grande partie du financement provient d'établissements multilatéraux.

Recherche

L'information sur le financement de la recherche n'est pas aussi détaillée que celle sur le financement des investissements. Les seules données qui nous permettent d'établir les comparaisons utiles aux fins de notre rapport s'appliquent à un ensemble de projets dans les pays-membres de la Banque asiatique de développement (tableau 3). Nous avons réparti les organismes en cinq catégories : les banques internationales, la famille des Nations Unies, les établissements multilatéraux secondaires, les organismes nationaux des grands pays industrialisés qui construi-

Tableau 3. Analyse des projets de recherche en Asie financés de l'extérieur[a] (nombre de projets).

	Banques	Organismes des Nations Unies	Organismes multilatéraux secondaires[b]	Organismes nationaux		Total
				Grands pays[c]	Petits pays	
Énergie	**23**	**38**	**4**	**11**	**11**	**87**
Collecte de données, évaluation et planif.	14	13	1	3	6	37
Demande et prix	1	2	0	0	0	3
Énergie rurale	0	2	0	1	1	4
Ressources, équipement et technique	1	2	0	3	2	8
Économie d'énergie	2	3	2	1	0	8
Main-d'oeuvre et formation	5	14	1	2	1	23
Études socioéconomiques	0	2	0	1	1	4
Industrie	**0**	**3**	**0**	**1**	**0**	**4**
Transports	**2**	**7**	**0**	**0**	**0**	**9**
Pétrole	**11**	**2**	**1**	**0**	**0**	**14**
Exploration	4	0	1	0	0	5
Raffinage	2	0	0	0	0	2
Généralités	5	2	0	0	0	7
Électricité	**37**	**16**	**3**	**38**	**10**	**104**
Production	4	2	1	1	3	11
Petite centrale hydro-électrique	3	3	2	4	1	13
Distribution	4	0	0	1	0	5
Électrification rurale	3	2	0	4	1	10
Énergie nucléaire	0	1	0	0	0	1
Autre (y compris la formation)	23	8	0	28	5	64
Gaz naturel	**7**	**1**	**0**	**4**	**4**	**16**
Charbon, lignite, tourbe	**5**	**9**	**0**	**4**	**6**	**24**
Énergie renouvelable	**1**	**5**	**1**	**8**	**3**	**18**
Énergie de la biomasse	**2**	**4**	**1**	**3**	**1**	**11**
Combustibles ligneux	**4**	**14**	**3**	**5**	**6**	**32**
Bois	4	13	0	5	6	28
Charbon de bois	0	1	1	0	0	2
Poêles à bois	0	0	2	0	0	2
Biogaz	**0**	**1**	**3**	**0**	**1**	**5**
Gaz de gazogène	**0**	**0**	**1**	**0**	**1**	**2**
Éthanol	**0**	**1**	**0**	**2**	**0**	**3**
Huile végétale	**0**	**0**	**2**	**0**	**0**	**2**

(suite)

Tableau 3 (fin).

	Banques	Organismes des Nations Unies	Organismes multilatéraux secondaires[b]	Organismes nationaux		Total
				Grands pays[c]	Petits pays	
Énergie solaire	**1**	**3**	**7**	**2**	**1**	**14**
Photovoltaïque	0	0	3	1	0	4
Autre	1	3	4	1	1	10
Énergie éolienne	**0**	**2**	**0**	**0**	**6**	**8**
Énergie géothermique	**3**	**1**	**0**	**3**	**4**	**11**
CETO[d]	**0**	**0**	**0**	**0**	**1**	**1**
Stockage	**0**	**1**	**0**	**0**	**0**	**1**
Total	**96**	**108**	**26**	**81**	**55**	**366**

Source : Chiffres tirés du rapport de la Banque asiatique de développement (1984).

[a] Sauf la Chine, la Mongolie et la République démocratique populaire de Corée.

[b] Les organismes multilatéraux secondaires comprennent : Le Fonds du Commonwealth pour la coopération technique; la Réunion régionale des chefs de gouvernement du Commonwealth; la Communauté économique européenne; l'Organisation des pays exportateurs de pétrole; et la Commission du Pacifique Sud.

[c] Les grands pays sont ceux qui possèdent une base industrielle pour la fabrication du matériel des centrales électriques (c.-à-d. le Canada, le Japon, le Royaume-Uni et les États-Unis).

[d] Conversion de l'énergie thermique des océans.

sent des centrales d'énergie électrique et enfin les petits organismes nationaux qui se consacrent au financement de la recherche.

Les études macro-économiques demeurent le seul domaine de la recherche auquel s'intéressent tous les organismes et ce, pour une raison bien simple : ces études sont essentielles pour mettre en perspective les propositions de micro-projets d'investissement et de recherche. Il est logique qu'un organisme de financement veuille obtenir une analyse macro-économique et une idée des flux macro-énergétiques avant de choisir les micro-projets qu'il désire financer. Toutefois, cette perspective globale reflète également la relation symbiotique entre les organismes de financement et les administrations publiques. Dans l'ensemble, les organismes de financement préfèrent travailler étroitement avec l'État et utiliser le pouvoir de ce dernier pour faire avancer les choses. De son côté, l'État se tourne vers les organismes internationaux pour des questions d'argent, de postes et de déplacement à l'étranger de son personnel. En outre, la recherche que l'on peut effectuer au sein des administrations publiques ou dans les institutions d'État touche naturellement l'élaboration de politiques adoptées par l'État. Ainsi, les intérêts des pouvoirs publics et des organismes de financement se rejoignent dans la recherche à caractère politique.

Les organismes des Nations Unies se divisent en deux catégories : les organismes spécialisés et les commissions régionales. Les organismes spécialisés ont tendance à se concentrer sur des sujets dans leur propre domaine de spécialisation : l'Organisation internationale du travail, sur les questions de main-d'oeuvre et de formation; l'Organisation pour l'alimentation et l'agriculture, sur les forêts et le bois de feu, etc. L'appauvrissement du système des Nations Unies au cours des années 70 et 80 a amené les organismes à se disputer âprement les fonds extérieurs qui, entre autres choses, ont pris la forme de secteurs d'entrée alors populaires auprès des organismes de financement. L'énergie était l'un de ces secteurs dans les années 70.

Dans la mesure où les gouvernements nationaux renferment des ministères spécialisés tout comme les organismes des Nations Unies, le financement de leurs

recherches et investissements dans l'énergie semble dépendre également de l'influence et du pouvoir de négociation des ministres et des ministères. La seule différence réside dans le fait que l'économie d'énergie impose au gouvernement un fardeau à cause de la demande des secteurs de production et de consommation. La distinction entre un gouvernement et les Nations Unies s'en trouve donc accentuée et le danger de répartir des fonds sur la base de l'influence ou du pouvoir de négociation d'organismes spécialisés est beaucoup plus élevé dans le système des Nations Unies.

Laissons de côté les organismes des Nations Unies et abordons les deux catégories d'organismes de financement de la recherche : il y a ceux qui appartiennent aux pays qui mettent en place des centrales électriques, et les autres. La différence entre leur méthode de financement de la recherche est frappante. Une très forte proportion des projets financés par les organismes de la première catégorie se rapporte à des secteurs où ils s'attendraient à financer les investissements. L'électricité est de loin le plus important mais ceux du pétrole, du gaz et du charbon sont également pris en compte. Parmi les énergies renouvelables, on favorise les secteurs possédant ou étant sur le point de posséder une technologie d'utilisation à grande échelle, par exemple l'énergie géothermique ou l'énergie à base d'alcool.

De leur côté, les organismes de recherche indépendants favorisent résolument les technologies autonomes à petite échelle : biomasse, bois, biogaz et solaire. Ce sont également des technologies dont le financement ne touche qu'un petit nombre de producteurs établis dans les pays en développement. En conséquence, la recherche est susceptible de demeurer en plan ou de perdre son efficacité.

Il convient alors de se demander pourquoi les organismes de financement indépendants boudent les grands secteurs de l'énergie. Il y a deux réponses à cette question. En premier lieu, les grands secteurs énergétiques présentent une chaîne ininterrompue à partir des fabricants de matériel dans les pays industrialisés jusqu'aux producteurs des pays en développement. Les gouvernements des pays en développement entrent dans cette chaîne à titre de propriétaires d'entreprises qui achètent le matériel ou comme garants des dettes de ces dernières, alors que les organismes de financement le font à titre de prêteurs qui financeront d'abord et avant tout la recherche nécessaire à leur décision de financer ou non le projet. Étant donné que la recherche s'applique à un endroit particulier, elle figure comme des travaux de recherche dans les pays en développement. Cependant, cette recherche vise un projet particulier plutôt que de présenter un caractère général et elle est souvent effectuée par des spécialistes de l'étranger. Les organismes indépendants de financement de la recherche n'ont aucune fonction dans la chaîne des investissements. En deuxième lieu, ils sont beaucoup plus petits que les organismes de financement des investissements. Les crédits que la plupart d'entre eux accordent couvriraient le coût de seulement quelques études de faisabilité, d'enquêtes préalables à des investissements ou de rapports détaillés de projet.

Vu sous cet angle, le domaine de la recherche énergétique se divise entre les petits et les grands organismes de financement de la recherche. Les grands organismes de financement s'occupent des travaux de recherche à grande échelle particuliers à un emplacement et nécessaires aux projets d'investissement, alors que les petits organismes de financement s'occupent de la recherche à petite échelle n'ayant habituellement que peu de rapport avec la fonction de production ou de commercialisation. Ils ne s'occupent pas de l'absence de relation entre le secteur politique, la production et l'utilisation, d'une part, et la recherche, d'autre part, phénomène caractéristique des pays en développement : cette désarticulation provient de la domination des sociétés multinationales dans la production de matériel énergétique

à forte intensité capitalistique, de la faiblesse des entreprises nationales des pays en développement et enfin des politiques énergétiques passives des gouvernements de pays en développement. Toutefois, les organismes de financement internationaux contribuent à cette désarticulation et font bien peu pour corriger les faiblesses des établissements de recherche des pays en développement.

Chapitre 4 Gestion et analyse de la demande

La demande d'énergie s'accroît pendant le processus de développement, à la fois parce qu'elle comporte une expansion de la production et de la consommation et parce que leur structure tend à devenir de plus en plus énergivore. D'où l'importance d'étudier les facteurs qui déterminent la demande.

Dans la plupart des pays en développement, les statistiques sur l'énergie sont disséminées et mal organisées, ne permettant que des agrégations et des analyses imprécises. La recherche effectuée dans les limites de ces données doit se poursuivre à court terme, mais on devra aussi s'efforcer d'améliorer la base de données afin de pouvoir procéder à des estimations plus détaillées et plus fiables. Les bilans énergétiques sont un exemple où l'on peut organiser des statistiques détaillées, mais elles ne permettent pas en elles-mêmes de produire des analyses.

L'élasticité-revenu de la consommation d'énergie permet de résumer une relation, mais elle ne dit rien sur les facteurs qui la modifient ou qui l'établissent. Il en est ainsi des fonctions «translog» qui cherchent à mesurer le caractère substitutif de l'énergie et des autres facteurs de production. Les modèles d'entrée-sortie présentent la relation entre la production et la consommation, d'une part, et l'utilisation de l'énergie, d'autre part, avec de nombreux détails et permettent l'étude d'un grand nombre de situations hypothétiques. Mais ils délaissent d'autres influences et, en mesurant les flux en terme de valeurs, mêlent les changements de quantité et de prix. Les modèles techniques ou techno-économiques cherchent à débrouiller les deux en travaillant avec des quantités physiques. Cependant, on ne peut représenter fidèlement le comportement des producteurs et des consommateurs par des données physiques. Celui-ci s'exprime en valeur monétaire et est essentiellement instable. Il n'existe donc aucune méthode parfaite pour étudier la demande globale d'énergie.

La variabilité et la complexité du comportement humain qui déstabilisent les relations à l'origine de la demande globale touchent également des relations plus désagrégées. Dans ce dernier cas, il est plus facile de composer avec un ensemble d'influences, mais il n'est pas toujours aisé de déduire l'effet de chacune. La portée des deux genres de micro-études de la demande est particulièrement vaste, notamment celles qui placent la demande d'énergie dans le contexte des décisions globales touchant la consommation des ménages et celles qui considèrent la collecte de combustible ligneux comme une partie de la répartition des tâches au sein des familles rurales.

On peut utiliser les modèles de la demande d'énergie pour étudier et manipuler l'intensité énergétique totale au moyen de mesures politiques dont les taxes et les subventions constituent la majorité. La mise au point de taxes et de subventions qui combinent justice sociale et précision d'impact doit reposer sur l'ingéniosité et représente un défi pour la recherche. Les taxes et subventions destinées à une forme d'énergie comportent souvent d'importants effets de substitution non prévus ; il est donc nécessaire que les chercheurs mettent au point des mesures plus neutres et plus appropriées à cette fin.

La tarification au coût moyen, qui est basée sur des coûts historiques, est un phénomène courant dans les industries de production d'énergie à grande échelle. Ce phénomène fausse le niveau des bénéfices, les schémas d'investissement et la concurrence entre les sources d'énergie. Il importe d'effectuer de la recherche sur une meilleure réglementation des prix et sur l'utilisation des structures du marché pour réglementer les prix et stimuler le changement technologique.

Il est essentiel de disposer d'un excédent agricole pour subvenir aux besoins de la population à l'extérieur du secteur de l'agriculture. La productivité du travail dans l'agriculture est trop faible pour générer un excédent important dans bon nombre de pays d'Afrique et dans quelques-uns d'Asie. Ceux-ci doivent accorder une priorité élevée à l'augmentation de cette productivité dans leur plan de développement; pour cela, il leur faudra compléter le travail de la main-d'oeuvre par des apports en énergie. Les études qui traitent de l'intensité énergétique de l'agriculture ne sont pas très fructueuses et il est nécessaire de se tourner vers la désagrégation et l'innovation conceptuelle. Il importe d'étendre les études aux systèmes agricoles périphériques comme la culture de céréales secondaires et des tubercules vivaces en terres arides. Les études de la mécanisation pourraient être utiles en distinguant les opérations en période de pointe des autres. La recherche destinée à améliorer l'efficacité des techniques mécaniques et non mécaniques suscite un intérêt particulier : par exemple, des études visant à étendre aux pays en développement une agriculture comportant un minimum de labour. On peut également augmenter l'efficacité énergétique en utilisant à meilleur escient les facteurs de production agricole énergivores : par exemple, les engrais, l'eau et les pesticides. Une façon d'accroître leur efficacité consiste à développer des cultures à cette fin.

Il s'est fait beaucoup de recherche sur l'économie d'énergie dans le secteur industriel des pays en développement; on a également cerné les industries à forte intensité énergétique. De même, en repérant les gros utilisateurs d'énergie parmi leurs industries et en adaptant les connaissances à leur disposition, les pays en développement peuvent accroître l'efficacité énergétique de leur secteur industriel.

Les transports représentent le lien entre la politique énergétique, la politique commerciale et la politique environnementale. La recherche doit créer une base permettant la coordination des trois. Les schémas de localisation déterminent les besoins en transport et la relation qu'ils affichent n'offre pas beaucoup de souplesse. En outre, il est difficile d'accroître la capacité de transport des routes et chemins de fer dans les régions déjà développées. Il est donc préférable de planifier l'emplacement des activités et des populations plusieurs décennies d'avance de manière à diminuer les besoins éventuels en transport. Les meilleurs schémas d'emplacement reposent sur deux considérations opposées : une petite ville a l'avantage de réduire le trafic suburbain, mais la concentration d'activités économiques à quelques endroits choisis rendra plus rentables les investissements dans l'infrastructure des transports. La gestion à court terme de la circulation présente des problèmes qui se prêtent à une recherche puisqu'il faut respecter la capacité de circulation et coordonner l'emploi de la tarification et de l'imposition des combustibles, des véhicules et des routes. Parallèlement, la recherche offre des voies prometteuses dans l'étude des fluctuations de la capacité du transport, de la rentabilité des véhicules selon leur taille et de la concurrence du transport rail-route. Parce qu'ils sont à forte intensité capitalistique, les chemins de fer se prêtent bien à une recherche pour en améliorer l'utilisation, surtout au niveau de la communication et de la planification de la circulation, de la structure tarifaire et de la qualité du service.

Les ménages qui consomment de l'énergie peuvent se classer en trois catégories : les cueilleurs, les producteurs et les acheteurs d'énergie; leurs schémas de comportement diffèrent tout comme les méthodes servant à les étudier. La théorie de la demande mise au point dans les pays industrialisés peut s'appliquer aux acheteurs, mais il importe d'affiner les concepts destinés à l'étude des cueilleurs et des producteurs de subsistance. La proportion de main-d'oeuvre allouée à d'autres utilisations est essentielle pour connaître le comportement des cueilleurs et des producteurs. Ces études doivent également englober leurs rapports avec les villes avoisinantes et permettre de jeter quelque lumière sur les variations que l'on rencontre d'une région et d'une catégorie à l'autre. Il faut également que la recherche sur la collecte de bois de feu fasse l'objet d'observations plus directes de l'environnement et que l'étude de son utilisation soit reliée à son produit : par exemple, avec la qualité et la composition des aliments cuits avec ce combustible.

L'accroissement de la production des biens et services, qui forme une partie essentielle du développement, doit habituellement reposer sur une augmentation de la consommation d'énergie. En outre, le développement englobe une série de modifications structurales qui sont susceptibles d'accroître la place de l'énergie dans le revenu national.

- Lorsque les gens augmentent leur train de vie, on constate une hausse de l'énergie utilisée pour l'éclairage et le fonctionnement des appareils ménagers. Quelques appareils électriques (p. ex., ventilateurs électriques, appareils radio) sont achetés par des personnes ayant des revenus peu élevés, et d'autres par des consommateurs avec un revenu supérieur. Ainsi, même si la consommation d'énergie pour la cuisson domestique n'augmente pas, la consommation à d'autres fins continue de s'élever en fonction du revenu; cette nouvelle demande intéresse surtout l'électricité. L'électricité est également la principale force motrice utilisée. Étant donné que les combustibles utilisés dans la production d'électricité perdent entre 60 % et 70 % de leur énergie, le changement vers l'électricité thermique que l'on peut observer dans la composition finale des sources d'énergie suppose une croissance plus rapide de la demande en combustibles primaires.
- Un grand nombre de pays en développement doivent intensifier leur agriculture pour nourrir la population croissante et pour faire face à la pénurie de terres arables. Toutes les grandes méthodes d'intensification agricole — eau, engrais, pesticides, machines — consomment de l'énergie.
- Une élévation soutenue du niveau de vie général engendre une augmentation de la productivité des travailleurs et un grand nombre des façons connues d'accroître la productivité nécessite une quantité accrue d'énergie pour chaque travailleur.
- À mesure que les pays en développement génèrent des revenus plus élevés, les structures de leur demande et leurs modes de production se déplacent vers le secteur industriel, dont la croissance exige une augmentation de la consommation d'énergie.
- Une hausse du niveau de vie entraîne une consommation accrue de biens et une utilisation correspondante des transports. Qui plus est, l'urbanisation et l'industrialisation accroissent la distance entre le producteur et le consommateur — ainsi qu'entre le travailleur et son lieu de travail. Les besoins de transport augmentent proportionnellement, donc plus rapidement que le taux de production.

Ainsi, l'énergie est un facteur crucial qui peut limiter le développement — mais on peut en atténuer l'effet en adoptant des changements structuraux qui

diminuent l'apport de l'énergie dans la production totale en procédant à des substitutions entre les combustibles afin de remplacer des sources d'énergie plus rares par d'autres plus abondantes et enfin, en mettant en place des mesures d'économie d'énergie visant à accroître l'efficacité globale de l'énergie. Parmi ces trois moyens, nous examinerons dans le prochain chapitre l'économie d'énergie; nous traiterons de l'analyse de la demande énergétique, d'abord au niveau global puis au niveau de chaque secteur d'utilisation — l'agriculture, l'industrie, les transports et les ménages.

La demande globale

Lorsqu'ils analysent la demande d'énergie, les chercheurs doivent choisir entre des méthodes qui exigent une faible quantité de données et de calcul, mais qui donnent des résultats rapides de portée limitée, et des méthodes plus puissantes pouvant fournir des résultats plus détaillés et plus cohérents mais qui nécessitent, cependant, une collecte de données et des calculs plus étendus et dont l'efficacité dépend de la qualité de l'information recueillie et des modèles développés. Au nombre des premières méthodes figurent les études relationnelles énergie-PIB (produit intérieur brut) et les études micro-économiques de la demande. L'autre catégorie renferme des modèles macro-économiques constitués d'une base d'entrées-sorties ainsi que des modèles techno-économiques destinés à l'analyse de l'utilisation finale. La question n'est pas simplement de choisir entre une méthode rapide donnant des résultats approximatifs et une autre plus lente mais fournissant des conclusions plus précises. Les études micro-économiques peuvent mieux exploiter les données disponibles ou utiliser les données provenant d'enquêtes spéciales conçues en fonction du problème à examiner, alors que les grands modèles macro-économiques doivent souvent recourir à des données de qualité et de fiabilité variables regroupées pour satisfaire le besoin d'exhaustivité. En outre, les études micro-économiques peuvent s'accommoder d'une plus grande diversité de formes fonctionnelles et donner ainsi une meilleure approximation des relations sous-jacentes, tandis que les grands modèles à équations multiples ont surtout été utilisés jusqu'à maintenant pour l'observation de relations simples et de formes fonctionnelles linéaires. Or, l'augmentation récente de la puissance de calcul et la miniaturisation des ordinateurs affecteront probablement ces deux types d'étude. L'effet pourra être même plus marqué dans les pays en développement à cause de l'apparition de micro-ordinateurs bon marché. En conséquence, les études macro et micro-économiques de la demande laissent augurer des progrès pour les années à venir.

Le choix des méthodes est limité par la disponibilité des données à court terme; cependant, il faudrait s'efforcer à long terme d'éliminer cette contrainte en recueillant des données plus détaillées pouvant servir à des modèles plus perfectionnés. Les bilans énergétiques constituent l'une des méthodes possibles pour la collecte de renseignements détaillés sur les flux énergétiques.

Bilans énergétiques

Les données nationales sur l'énergie, une fois désagrégées, peuvent être totalisées sous forme d'un bilan énergétique. Celui-ci présente le secteur de l'énergie en ses diverses composantes. Pour chaque composante, il y a correspondance entre la consommation et la somme de la production, du commerce international et

de la variation des stocks. En outre, un bilan énergétique répartit la consommation selon les diverses utilisations, en distinguant entre l'énergie employée pour la transformation et celle destinée à une utilisation finale.

Depuis les années 50, l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) publie des bilans énergétiques pour les pays de l'OCDE. Au cours des années 70, l'Agence internationale de l'énergie (AIE), une filiale de l'OCDE, a éveillé l'intérêt des pays en développement pour les bilans énergétiques. Les bilans énergétiques dont elle avait commandé la mise au point ont été présentés et discutés lors d'un colloque tenu en 1978 (Agence internationale de l'énergie 1979a, 1979b). On les a récemment mis à jour jusqu'en 1982 (Agence internationale de l'énergie 1984).

Fondée en 1973, la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE) a également stimulé l'intérêt des pays d'Amérique latine pour les bilans énergétiques. À la suite de ses efforts, des bilans énergétiques ont été mis au point pour tous les pays membres de l'OLADE, à l'exception de la Barbade, de Cuba et du Paraguay; pour quelques-uns de ces pays, des bilans énergétiques sont publiés chaque année depuis 1970. La qualité des statistiques a également connu une amélioration avec les années. Toutefois, la précision des détails varie d'un pays à l'autre (voir par exemple El Salvador 1980, Organización Latinoamericana de Energía 1981; Chili 1982; Instituto de Economía Energética 1982, 1983). Un réseau de chercheurs en énergie travaillant sous l'égide de la Commission européenne a conçu un schéma pour préparer un bilan énergétique intégral, c.-à-d. un ensemble de bilans énergétiques interdépendants couvrant tout le système énergétique, à partir des ressources jusqu'à la consommation utile d'énergie (Commission des communautés européennes 1984). On a aussi augmenté les bilans énergétiques mis au point sous la direction de l'OLADE en y intégrant des estimations sur l'énergie utile.

Un bilan énergétique est essentiellement un tableau de statistiques sur la consommation et la production d'énergie. Sa préparation nécessite que l'on règle les questions de détail et de cohérence, lesquelles constituent un point de départ utile aux études nationales de l'énergie. Un bilan énergétique ne renferme pas en lui-même des renseignements sur les facteurs déterminants de la consommation d'énergie finale et ne peut donc être utilisé dans les exercices de prévision, de planification ou de modélisation. Toutefois, une série chronologique de bilans énergétiques fournira une liste temporelle de données sur la consommation par secteur, dont on pourra se servir pour étudier le comportement et les déterminants de la consommation sectorielle. Ces études sectorielles peuvent donner des modèles secondaires qui, une fois regroupés, pourront être employés pour prévoir ou planifier la production, la transformation et la consommation nationales d'énergie (voir p. ex., Moscoso et Barbalho 1983). On peut adapter les techniques appliquées à chaque secteur en fonction des données disponibles et des mécanismes causatifs en cause; ainsi, on peut recourir à des modèles très différents pour l'agriculture, l'industrie, le transport et les ménages. De cette manière, les bilans énergétiques, s'ils sont dressés à l'aide d'une méthodologie cohérente pendant un certain nombre d'années, fourniront un cadre souple se prêtant à des études nationales de l'énergie. Toutefois, si l'on met au point des modèles sectoriels indépendants, les estimations qui en découleront ne présenteront vraisemblablement aucune cohérence mutuelle et il faudra alors introduire un mécanisme supplémentaire pour les intégrer les uns aux autres.

Relation entre l'énergie et le PIB

Au dernier niveau d'agrégation, on peut considérer la consommation d'énergie comme tributaire du produit intérieur brut, lequel mesure la valeur de la production des biens et services finals dans une économie. Il existe une foule d'études sur la relation entre l'énergie et le PIB, entreprises dans divers pays et depuis fort longtemps. Les résultats fluctuent largement et illustrent une gamme étendue d'élasticités supérieures ou inférieures à l'unité. Dans les années 70, les élasticités sont en général inférieures à celles des années précédentes (Leach et al. 1986; Siddayao 1986). Toutefois, elles indiquent de façon typique que l'élasticité-revenu de la consommation d'énergie est supérieure dans les pays à faible revenu que dans ceux à revenu élevé. Cette conclusion a servi de base aux calculs qui prévoient une hausse de la consommation globale d'énergie des pays en développement (Martin et Pinto 1979). Mais avant de tirer cette conclusion, ou toute autre, des élasticités-PIB de la consommation d'énergie, il convient d'expliquer la signification de l'élasticité et la manière de la calculer.

Dans un processus qui ne subit aucun changement technique ni substitution entre les facteurs de production, la consommation d'énergie sera proportionnelle à la production et l'élasticité de sa production sera exactement égale à un. Cependant, si l'élasticité s'écarte de l'unité, la raison doit en être attribuée à quatre causes possibles :

- Les améliorations technologiques peuvent faire régresser l'apport de l'énergie dans la production; voilà la cause principale qui explique pourquoi l'élasticité de l'énergie des pays industrialisés est inférieure à l'unité. La substitution de technologies plus énergivores aura tendance à compenser ce phénomène.
- Des changements dans la structure du PIB peuvent faire déplacer l'accent vers des secteurs plus ou moins tributaires de l'énergie. Par exemple, la croissance relativement rapide de l'industrie et des transports dans les pays en développement représente un facteur expliquant l'élasticité élevée de la consommation d'énergie dans leur PIB.
- Les substitutions interénergétiques peuvent influer sur l'efficacité moyenne de l'utilisation de l'énergie. Dans les pays en développement, l'énergie commerciale remplace habituellement l'énergie non commerciale qui est souvent exclue des statistiques; on constate donc une hausse purement statistique de la consommation d'énergie et de l'élasticité-PIB estimée de la consommation d'énergie au cours des années. Ainsi, l'inclusion du combustible ligneux dans la consommation d'énergie entraîne une baisse importante des élasticités-PIB d'un pays à l'autre (Strout 1983). En tenant compte de ce combustible, son remplacement par le kérosène, le gaz ou l'électricité fera augmenter de façon générale l'efficacité de l'énergie et réduira le taux d'élasticité.
- Les changements du niveau de vie peuvent modifier le niveau de consommation d'énergie (directe ou indirecte). Même si cette répercussion ferait fluctuer l'élasticité, elle découle de la consommation et non de la production.

Étant donné que les effets de ces quatre phénomènes se retrouvent pêle-mêle dans la relation entre l'énergie et le PIB, il est difficile de préciser le concept d'élasticité. Plus particulièrement lorsque sont survenus des changements structuraux d'importance, comme pendant les crises du pétrole, les données sommaires sur l'élasticité énergie-PIB se sont révélées inaptes à la prévision à cause de leur instabilité et de leur imprécision.

Substitution parmi les facteurs de production

L'emploi de l'élasticité énergie-PIB suppose une relation stable entre le produit intérieur brut et la consommation totale d'énergie. Toutefois, il y a des possibilités de substitution entre diverses formes d'énergie ainsi qu'entre l'énergie et d'autres facteurs de production. La substitution parmi les facteurs de production peut être prise en compte de façon explicite dans les fonctions de production. Il y a un certain nombre de fonctions de production en usage; celle que l'on applique le plus au secteur de l'énergie est la fonction de production «translog» mise au point par Christensen et al. (1973). Quelques pays industrialisés l'ont utilisée et ont produit une vaste gamme d'estimations des élasticités de prix et de substitution (Hudson et Jorgenson 1974; Berndt et Wood 1975, 1979; Griffin et Gregory 1976; Ozatalay et al. 1979; Pindyck 1979, 1980). La principale différence entre leurs résultats vient de ce que certaines fonctions considèrent l'énergie et le capital (c.-à-d. la centrale et le matériel) comme facteurs de production substituables alors que d'autres leur attribuent un caractère complémentaire. Il en découle deux ensembles différents de prévisions sur l'effet d'une hausse des prix de l'énergie : le premier prévoit une augmentation des investissements en biens de capital tandis que l'autre est moins optimiste. Récemment, Gibbons (1984) a cherché une explication à la qualité variable des résultats au titre des biens en capital.

Les modèles «translog» ont été très peu appliqués dans les pays en développement (se reporter toutefois à Uri 1981; Apte 1983). Il est facile de les appliquer à l'industrie; les pays en développement possèdent des données relativement abondantes à ce sujet. Mais étant donné les problèmes que pose l'interprétation des élasticités de substitution qui en découlent, on peut douter de leur utilité opérationnelle.

Analyse d'entrées–sorties

Un tableau d'entrées–sorties illustre les mouvements d'entrée et de sortie de toute une économie, de la même manière qu'un bilan énergétique indique les flux d'énergie de l'économie. On peut considérer qu'un bilan énergétique se compose des colonnes d'un tableau d'entrées–sorties sur les sources d'énergie, avec cependant deux différences : les unités utilisées dans un bilan énergétique sont des unités physiques ou des unités énergétiques, alors qu'un tableau d'entrées–sorties exprime ses données sous forme de valeurs; et un bilan énergétique présente les chiffres des secteurs énergétiques sous une forme plus désagrégée qu'un tableau d'entrées–sorties.

Du fait qu'il présente les ventes d'un secteur ou d'une industrie à une autre, le tableau d'entrées–sorties prend aussi le nom de matrice d'échanges. Si l'on divise les entrées dans chaque industrie par la production de celle-ci, on obtient une matrice de coefficients d'entrées–sorties que l'on appelle aussi une matrice technologique. Cette matrice technologique constitue un outil très polyvalent :

- Elle peut servir à calculer les effets directs et indirects d'une fluctuation de la production.
- Elle présente le lien entre l'utilisation des biens finals (c.-à-d. des biens consommés ou investis) et des biens intermédiaires (en d'autres mots, des biens servant à en produire d'autres). On l'utilise pour établir dans toutes les autres branches d'activité les répercussions d'une variation observée dans la production d'une activité particulière.
- On peut représenter un changement technologique comme une modification des coefficients d'entrées–sorties et ses effets sur toute l'économie peuvent

être connus en modifiant la matrice technologique. On peut donc l'utiliser pour évaluer l'impact d'une technologie économisatrice d'énergie ou d'une substitution de combustible sur l'économie.

- Elle assure une cohérence mutuelle entre la production de diverses branches d'activités.
- En dernier lieu, à titre de composante de modèles de programmation linéaire, on peut recourir à une matrice technologique pour une optimisation à l'échelle de l'économie nationale ainsi que pour l'analyse des effets de certaines restrictions comme le besoin de balancer les opérations commerciales ou de rationner des approvisionnements en quantité limitée.

À cause de tous ces avantages, l'analyse d'entrées–sorties forme la base des modèles servant à la prévision macro-économique dans les économies de marché développées. Les bilans de matériel, que l'on peut considérer comme une variante des tableaux d'entrées–sorties, ont également servi à la planification en U.R.S.S. et dans d'autres économies planifiées.

C'est le groupe de recherche sur l'énergie de l'Université de l'Illinois (Bullard et Herendeen 1975) qui a appliqué pour la première fois l'analyse d'entrées–sorties aux problèmes énergétiques; sa méthodologie a d'ailleurs donné lieu à quelques ouvrages spécialisés (Bullard et al. 1978; Casler et Wilbur 1984). L'une des principales applications de l'analyse d'entrées–sorties au domaine de l'énergie a été le calcul des intensités énergétiques directes et indirectes ainsi que des intensités d'énergie incorporées ou extraites des biens (Costanza et Herendeen 1984).

Deux centres ont surtout contribué à l'application de l'analyse d'entrées–sorties dans les pays en développement — le Laboratoire d'énergie du MIT et le Laboratoire Brookhaven National. Les modèles d'entrées–sorties mis au point par Charles Blitzer et ses collègues aux fins de la planification du développement (Blitzer et al. 1975; Taylor 1979) ont trouvé une application au Mexique (Blitzer et Eckhaus 1983), en Jordanie (Blitzer 1984) et en Égypte (Choucri et Lahiri 1984). Dans les matrices technologiques conçues par le groupe Brookhaven, le secteur de l'énergie figure abondamment, les flux énergétiques sont mesurés en unités énergétiques alors que la consommation d'énergie est évaluée en termes d'énergie utile (c.-à-d. l'énergie finale consommée multipliée par l'efficacité d'utilisation). Cette approche a été utilisée au Pérou, en Égypte, en République de Corée et au Portugal (Mubayi et Meier 1981).

Les vastes calculs que nécessitent les modèles d'entrées–sorties détaillés expliquent en partie pourquoi même leur application aux pays en développement ne s'est pas répandue dans ces régions (voir, toutefois, Subba Rao et al. 1981; Vanin et Graça 1982; Behrens 1984). Toutefois, la miniaturisation et la chute du coût des ordinateurs permettent maintenant l'emploi de ces techniques même dans les pays en développement (voir Munasinghe et al. 1985).

Approches techniques

Les approches économiques aux problèmes de l'énergie se caractérisent par l'importance accordée aux effets du revenu, de la production ou des prix. Toutefois, ces relations économiques de base présentent l'image d'un comportement humain qui est imprévisible. En outre, il est nécessaire de formuler ces relations en termes de valeur, ce qui fait qu'il est impossible de distinguer les fluctuations de quantité et de prix. L'insatisfaction causée par ces instabilités a donné naissance à des modèles fondés sur des constantes technologiques.

Dans ces modèles, la consommation d'énergie finale F peut s'exprimer comme suit :

$$F = uA/e$$

où A représente le niveau d'activité, u l'énergie utile nécessaire par unité d'activité et e, l'efficacité de l'utilisation d'énergie. Cette équation a l'avantage de conférer à u une valeur fixe par rapport à la forme d'énergie et à attribuer au taux de substitution du combustible la valeur de 1 lorsque les facteurs de production du combustible sont exprimés en termes d'énergie utile.

Le niveau d'activité peut correspondre au niveau de la production d'une marchandise ou d'un service, ou d'un «besoin» dans le cas du consommateur. Ainsi, le modèle cherche à remplacer la demande d'énergie influencée par le comportement du consommateur par un besoin d'énergie défini de façon normative. La série de modèles «MEDEE» constitue sans doute les modèles les plus en vue (Chateau et Lapillonne 1978, 1979, 1984; Lapillonne 1983). Ils ont notamment été appliqués dans la Communauté européenne (1983), au Portugal (Neto et al. 1980), au Brésil (Prado 1981), en Équateur (Instituto Nacional de Energía 1984) et au Québec (Québec 1984).

On constate d'emblée la parenté des modèles «MEDEE» avec les autres approches normatives des problèmes de l'énergie : par exemple, avec les approches de l'énergie douce qui préconisent un abandon des combustibles fossiles sans tenir vraiment compte des événements probables. D'autres approches soulignent les possibilités d'économie d'énergie sans égard aux coûts (p. ex., Goldemberg et al. 1985). C'est la technologie qui détermine ce qu'il est possible de faire alors que le comportement social et économique établit les possibilités qui se réaliseront. Une approche technologique est naturellement assortie à la conviction que le monde devrait changer de façon plus rapide ou plus radicale; de leur côté, les approches économiques et sociologiques sont souvent associées à l'idée que le taux d'évolution est limité par des facteurs d'ordre comportemental et institutionnel. Les deux sont nécessaires mais ni l'une ni l'autre ne peut par elle-même changer le monde. On peut d'ailleurs le démontrer par le modèle «MEDEE-3» qui englobe une fonction de choix du consommateur. Les progrès dans les modèles macro-économiques à caractère énergétique dépendent moins de la découverte de constantes physiques que d'un affinement des fonctions comportementales.

La demande locale

La théorie économique traditionnelle de la demande a atteint un niveau d'évolution qui n'a pas permis de lui apporter beaucoup de changements ces dernières années (voir Goldberger 1967). On sait que le revenu et le prix constituent les principaux facteurs déterminants de la demande de *consommation*, auxquels peuvent s'ajouter des variables spéciales se rapportant à chaque situation : par exemple, la taille et la composition de la famille lorsqu'il s'agit d'une demande individuelle plutôt que familiale; ou il peut s'agir du prix et de l'approvisionnement de produits de remplacement lorsque ceux-ci occupent une place importante. Les facteurs déterminants de la demande *industrielle* sont autant liés aux objectifs économiques de l'industrie qu'aux procédés particuliers dans lesquels sont employés les facteurs de production. On peut les étudier dans le contexte d'un modèle généralisé de production industrielle, appelé fonction de production, ou dans le cadre de modèles

de procédés particuliers à l'industrie. Récemment, les effets de la qualité des approvisionnements en énergie sur la demande ont émergé comme un domaine prometteur de la recherche, plus spécialement à la lumière des pénuries chroniques d'énergie auxquelles font face les pays en développement (Munasinghe et Schramm 1983). Nous traiterons ici des modèles de la demande de consommation.

Bien que la théorie de la demande soit bien établie, l'estimation des fonctions de la demande présente de sérieux problèmes que l'on peut répartir en quatre catégories (Deaton 1978; Deaton et Muellbauer 1980; Wold 1982). En premier lieu, les quantités achetées et vendues sont ce que l'on observe dans la réalité et il est difficile, à partir de ces chiffres, de débrouiller les influences qui émanent des acheteurs et des fournisseurs. En deuxième lieu, les techniques de régression auxquelles on peut recourir pour l'estimation restreignent les formes fonctionnelles que l'on peut supposer entre la demande et ses facteurs déterminants. Si l'on a besoin d'une mesure sommaire de l'influence, l'élasticité, par exemple, la forme fonctionnelle est encore plus limitée. On peut employer des techniques graphiques pour examiner la forme fonctionnelle des relations, mais elles ne sont pas toujours efficaces lorsqu'on a affaire à un grand nombre de variables. En troisième lieu, il y a le problème de la délimitation de l'influence de chaque variable déterminante lorsque plusieurs sont en jeu; ce problème est d'ailleurs souvent difficile à résoudre et quelquefois insoluble. Enfin, les relations à plusieurs variables nécessitent un apport important de données et des techniques de régression relativement complexes qui, avant l'apparition du micro-ordinateur, étaient uniquement à la portée des chercheurs qui travaillaient dans les quelques établissements possédant un ordinateur central.

En conséquence, une large proportion des études sur la demande d'énergie effectuées dans les pays en développement recourt à des méthodes à deux variables assorties de totalisations et de graphiques bidimensionnels (Desai 1985; Howes 1985; Leach 1985). Appliquées aux études sur le terrain, les techniques à deux variables sont hautement productives. Si une étude fournit des renseignements sur «n» caractéristiques, on peut alors dresser des tableaux à deux variables $n(n-1)2$; la variation des intervalles de fréquence pourra étendre davantage la portée des tableaux. Au moins quelques-uns d'entre eux seront susceptibles de présenter des relations. Ainsi, les techniques à deux variables représentent un moyen relativement sûr d'obtenir des résultats. Pour cette même raison, elles ne sont pas très rigoureuses. Cependant, il est toujours possible qu'une technique à deux variables omette de déceler une relation à plusieurs variables ou qu'elle en donne une impression fausse.

Les techniques à deux et à plusieurs variables permettent donc d'obtenir des approximations de qualité inégale. Les statisticiens et les économétriciens se sont donné beaucoup de peine pour affiner les techniques d'estimation au cours des soixante dernières années. Si ces techniques ne sont pas toujours très fiables, c'est autant à cause de la complexité et de la variabilité des phénomènes économiques que des techniques elles-mêmes. Toutefois, deux avenues de recherche semblent prometteuses dans l'analyse des problèmes énergétiques des pays en développement.

La première avenue touche au problème de la répartition du budget chez le consommateur. Les consommateurs ne peuvent maintenir sur de longues périodes un niveau de dépenses supérieur à leur revenu; dans ce sens, il y a une restriction d'ordre budgétaire à l'égard de leurs dépenses totales. En outre, la consommation de différents biens fait ressortir des relations particulières avec le revenu. Par exemple, lorsqu'un bien est une nécessité, les consommateurs pauvres y consacrent une proportion plus élevée de leur revenu que les consommateurs riches, et vice versa dans le cas des biens de luxe, comme l'a observé Engel en 1857 (Houthakker

1957). C'est de cette double observation qu'est née une théorie de la répartition du budget du consommateur (Pollak et Wales 1978). Lorsqu'on applique cette théorie aux pays en développement, il est également nécessaire de tenir compte des fluctuations de prix (Weisskopf 1971 ; Sener 1977). Les répercussions du revenu et des prix sur des groupes de produits, y compris le combustible et l'éclairage, ont fait l'objet d'estimations pour la République de Corée, les Philippines, Taiwan (Chine) et la Thaïlande (Lluch et al. 1977). Une étude effectuée en Inde a également évalué les répercussions distinctes de la taille de la famille (Ray 1980). Tous ces ouvrages nous montrent comment la consommation d'énergie des ménages peut être considérée comme le résultat d'une répartition du budget. Des applications plus poussées dans les pays en développement nécessiteraient une modification des modèles. De façon particulière, la limite d'un budget dans un pays en développement peut ne pas toujours constituer une limite monétaire, puisqu'il pourra s'agir d'une restriction en termes de temps de travail ou de superficie agricole, comme nous le verrons à la section 6 ci-après. L'importance des limites pourra varier selon le niveau du revenu. Ce qu'il importe toutefois de souligner, c'est le besoin de placer la consommation des ménages dans le contexte de leurs décisions globales de consommation.

La seconde avenue de recherche porte sur l'étude de la famille comme unité de décision. On peut couramment observer que les fermes familiales emploient une main-d'oeuvre plus abondante par hectare que les fermes qui embauchent des journaliers (voir par exemple Deolalikar et Vijverberg 1983). Au sein de la famille, on sait que les femmes et les enfants prédominent habituellement parmi les cueilleurs de combustible ligneux (Reddy 1982; Cecelski 1984). Il est clair qu'il existe des règles sociales et économiques pour la consommation et la répartition des tâches entre les différents membres de la famille, et elles sont différentes des règles en usage au sein d'une entreprise commerciale, par exemple. L'application de ces règles dépend également du niveau de revenu; la répartition des tâches dans les familles pauvres diffère beaucoup de ce que l'on retrouve dans les familles riches. Le regroupement de ces observations fréquentes mais éparses dans une théorie a suscité l'intérêt des chercheurs de plusieurs disciplines, notamment en économique (Simon 1957; Pollak et Wachter 1975; Becker 1981; Mack et Leigland 1982; Pollak 1985), en sociologie (Demos et Boocock 1978), en anthropologie (Pryor 1977) et en histoire (Laslett 1972). Toutefois, ces diverses approches n'ont encore donné aucune image globale. Cependant, on peut considérer la cueillette de combustible ligneux comme un aspect de la répartition des tâches au sein de la famille, et une synthèse des diverses approches théoriques de la famille est susceptible d'en faire progresser l'étude.

Mesures axées sur la demande

On peut en principe se servir de la relation entre l'utilisation d'énergie et la demande finale pour faire diminuer l'intensité de l'énergie dans la dépense nationale brute en déplaçant les dépenses vers des composantes moins énergivores de la demande finale. Cela peut s'effectuer de la façon suivante :

- en influençant les composantes de la demande finale; par exemple, au moyen de taxes et de subventions à l'égard des biens finals (il peut s'agir de biens de consommation ou de biens de production);
- en influençant les facteurs déterminants de la demande finale; par exemple, les revenus au moyen de taxes et de subventions; et

- en influençant la répartition régionale de la demande finale, réduisant, de ce fait, les intrants dans le secteur des transports; par exemple, au moyen d'un contrôle du schéma de localisation.

Taxes directes et indirectes

Pour plus de simplicité, nous limiterons notre discussion aux taxes étant donné que les subventions peuvent être considérées comme des taxes négatives.

Certaines hypothèses valables au titre des préférences de consommation nous révèlent qu'un impôt proportionnel sur le revenu serait plus avantageux pour le consommateur qu'une taxe sur les biens qu'il achète, si toutefois il y avait égalité entre les recettes tirées des deux sources. Cette proposition bien connue dans la théorie des finances publiques, combinée à la possibilité de percevoir un impôt progressif sur le revenu, milite en faveur de taxes directes plutôt qu'indirectes (Newbery et Stern 1985).

Dans la pratique, toutefois, les pays dépendent tous en grande partie des taxes qu'ils imposent sur les marchandises, les pays en développement probablement plus que les économies des marchés industrialisés. Le choix de cette méthode par l'administration s'explique par son côté pratique. En effet, une administration a moins de difficultés à percevoir un impôt si le nombre des contribuables est peu élevés; les producteurs, conditionneurs ou commerçants auprès desquels sont perçues des taxes sur les marchandises représentent un groupe de peu d'importance et une cible plus compacte que l'ensemble de la population. On peut resserrer l'assiette fiscale des taxes directes en haussant le niveau des exemptions fiscales, mais si un pourcentage important de la population n'est plus assujetti à l'impôt, il deviendra plus difficile d'identifier les nouveaux contribuables admissibles et d'empêcher la fraude fiscale de la part de contribuables non identifiés. Qui plus est, le revenu constitue une assiette fiscale beaucoup plus imprécise que le volume des biens produits ou échangés.

On peut aussi donner d'autres raisons de principe à une méthode d'imposition des produits. Ainsi, bien que la pauvreté conduise à un état de privation non souhaitable, on peut affirmer que la privation de certains biens comme la nourriture, le vêtement et le logement est beaucoup plus grave que l'indigence en général : voilà le fondement de la méthode axée sur les besoins essentiels. De même, on peut affirmer que la privation de certains biens comme les boissons alcooliques n'a aucun effet sérieux pour personne et qu'une diminution de la consommation de biens de luxe n'entraîne pas de conséquences graves pour le riche. Cet argument peut servir à établir la base d'imposition des taxes sur les biens de luxe et le calcul des subventions sur les besoins essentiels. Toutefois, de telles taxes et subventions ne peuvent être facilement confinées à une tranche de revenu particulière puisqu'elles touchent tous les acheteurs, riches ou pauvres.

Une subvention pour les besoins essentiels a aussi l'inconvénient de ne pas tenir compte du fait qu'à mesure qu'une personne ou un ménage consomme plus, des quantités supplémentaires s'avèrent moins nécessaires. Idéalement, une subvention sur un produit de nécessité devrait viser le consommateur pauvre et s'appliquer uniquement à un certain achat minimum. Le rationnement, qui assure une quantité minimum fixe à tous à un prix subventionné, est une meilleure approximation de ce genre de subvention. On peut enlever la restriction qu'elle impose sur le choix du consommateur en permettant au pauvre qui n'a pas besoin de la ration de la vendre en toute liberté pour disposer d'un revenu supplémentaire. Toutefois, bien qu'elle

soit plus simple à administrer qu'une subvention basée sur le revenu personnel, cette méthode nécessite une machinerie administrative qui puisse rejoindre tous les ménages. En outre, le rationnement de produits subventionnés fait naître un double marché et l'administration doit être suffisamment forte pour empêcher le mouvement de produits subventionnés vers le marché non subventionné. En conséquence, l'administration publique efficace d'un programme de subventions doit reposer sur un mécanisme d'intégrité et de complexité qui n'est pas encore à la portée de tous les pays en développement.

Dans tous les pays, on compte un nombre beaucoup plus important de consommateurs que de producteurs et la satisfaction des consommateurs est un atout pour tous les gouvernements, qu'il s'agisse de démocraties ou de dictatures. Les gouvernements contrôlent donc les prix, ce qui suppose le subventionnement du consommateur aux dépens du producteur; ou alors ils subventionnent les biens de consommation. Les recettes affectées aux subventions proviennent habituellement de taxes imposées sur les biens, car il est plus facile de percevoir une taxe auprès d'un petit nombre de producteurs (ou d'importateurs) que d'un grand nombre de consommateurs. C'est ainsi que les taxes indirectes, les subventions indirectes et les subventions jumelées à un contrôle des prix deviennent la norme dans les pays en développement. Et si les subventions avantagent le pauvre, il devient difficile de les réduire ou de les éliminer. On introduit donc une plus grande rigidité dans la structure des prix qui ne peuvent alors plus être utilisés pour la répartition des ressources.

Pour éviter ce danger, il faut passer des méthodes indirectes à des méthodes directes pour réglementer la répartition des revenus. La pauvreté frappe les gens et non les marchandises et c'est au niveau de la personne qu'on doit chercher à l'atténuer. Bien sûr, des difficultés pratiques se posent : le revenu est facile à cacher et difficile à évaluer, les pauvres sont trop nombreux pour être aidés directement, les taxes et les subventions créent des stimulants qui en réduisent l'efficacité. Mais ces problèmes doivent aussi comporter des solutions pratiques. Les riches sont peu nombreux et affichent des caractéristiques faciles à reconnaître : maisons, automobiles, biens durables, instruction des enfants, etc.; un indice composite de ces biens pourrait bien être aussi précis qu'une évaluation directe du revenu. Le nombre de personnes indigentes est élevé, mais certaines catégories vulnérables — comme les parents seuls, les veufs et veuves, les orphelins — ne sont pas si nombreuses et peuvent être facilement identifiées. L'enregistrement des personnes ayant un emploi ne constitue pas une tâche administrative tellement difficile et là où cette pratique est adoptée, il est assez aisé d'accorder une subvention annuelle tant et aussi longtemps que le processus est réduit à sa plus simple expression. Ces suggestions ne sont pas nécessairement bonnes ni applicables de façon générale. Mais il n'est sûrement pas hors de portée des chercheurs d'élaborer de meilleures méthodes, plus ingénieuses et plus pratiques que les taxes et subventions indirectes pour alléger la pauvreté.

Imposition des sources d'énergie

Il n'est pas rare que les pays en développement réglementent les prix des sources d'énergie, plus particulièrement l'électricité et les produits pétroliers. Bien que de telles mesures ne soient pas toujours instituées en vue d'une gestion de la demande, leurs répercussions sur la demande deviennent évidentes; en outre, elles ont souvent un caractère imprévisible et non souhaitable. De façon plus générale, le gouvernement influence les prix par des taxes et des subventions. Cependant, le

contrôle direct des prix n'est pas rare surtout lorsque l'État possède les industries de production d'énergie. Les différentes sources d'énergie, notamment les produits pétroliers, le gaz, l'électricité, le charbon et le bois de feu, présentent différentes structures commerciales et, de là, des conditions différentes aux fins des programmes de taxes et de subventions.

Habituellement, les produits pétroliers sont vendus par un petit nombre d'entreprises qui étendent leurs activités de distribution jusqu'au consommateur, au moins pour les combustibles du transport. Étant donné que les produits pétroliers découlent de l'effort commun des raffineries, il est impossible de répartir avec précision les coûts de production entre chacune de celles-ci. En conséquence, il y a beaucoup de souplesse dans l'établissement des prix. La seule restriction que l'on constate à l'égard de leurs prix relatifs est que le schéma de la demande ne devrait pas s'écarter largement de celui des approvisionnements des raffineries. Toutefois, on peut modifier la gamme des produits des raffineries jusqu'à un certain point en apportant des changements, petits mais acceptables, aux caractéristiques des produits; il est également possible, mais dispendieux, de modifier encore plus cette gamme en mettant en place des procédés secondaires comme le craquage et la viscoréduction. Il est aussi possible d'équilibrer les schémas de l'offre et de la demande en important ou en exportant des produits raffinés. On peut donc jouir d'une grande marge de manoeuvre dans l'établissement des prix relatifs des produits raffinés ainsi que dans la perception de taxes ou l'allocation de subventions.

Habituellement, cette marge de manoeuvre se traduit par des taxes sur l'essence, justifiées parce que l'essence est utilisée par de riches propriétaires d'automobiles, et des subventions sur le kérosène, parce que le pauvre utilise ce combustible pour l'éclairage. Mais les deux ont des effets de substitution considérables. Lorsque l'on impose des taxes élevées sur l'essence, on restreint l'utilisation et le développement des moteurs à essence. On peut miniaturiser les moteurs à essence encore plus que les moteurs diesel et leur usage serait beaucoup plus répandu dans des applications à petite échelle, comme pour faire fonctionner des pompes d'irrigation, si le prix de l'essence s'approchait de celui du carburant diesel. La mise au point des automobiles à moteur diesel a été stimulée par les faibles taxes perçues sur le carburant diesel; dans la mesure où il y a rattrapage, on observe une érosion du caractère progressif de la taxe sur l'essence. Dans ce cas, les automobiles constituent une meilleure assiette fiscale que l'essence, car une taxe sur les automobiles pourrait être mieux dirigée vers le riche et plus difficile à éviter.

Le subventionnement du kérosène amène les gens «moins pauvres» à l'utiliser à des fins moins essentielles, comme la cuisson. Il y a alors altération du carburant diesel puisque l'on peut mélanger jusqu'à 20 % de kérosène avec du carburant diesel sans observer d'effets secondaires marqués. Les subventions empêchent aussi l'émergence de produits de substitution au kérosène, comme l'électricité qui donne un éclairage de meilleure qualité. À l'encontre de l'essence, il serait impossible de restreindre la portée de cette subvention en l'accordant à l'égard du matériel puisque le nombre de lampes au kérosène est beaucoup trop important. On peut aussi se demander si l'éclairage constitue en lui-même une base appropriée pour une subvention au pauvre. Si c'est le cas, on peut en restreindre l'impact pour le pauvre en lui vendant des contingentements à rationner, lui accordant ainsi un accès subventionné à ce produit. Même dans ce cas, une subvention à l'égard du kérosène amènera à lui substituer d'autres formes d'éclairage et on ne pourra éliminer l'effet de cette substitution qu'en accordant une subvention égale pour tous les produits d'éclairage (voir Reddy 1978).

On peut se demander s'il ne faudrait pas percevoir une taxe sur tous les produits pétroliers pour favoriser leur remplacement par une source d'énergie renouvelable (Lovins 1977). Le point qui milite en faveur des énergies renouvelables en est un de justice pour les générations à venir : plus on consomme de pétrole maintenant, moins il y en aura pour les générations futures. Toutefois, une taxe n'a pas pour effet direct de transférer quelque chose d'une génération à une autre, mais bien de transférer au gouvernement le pouvoir d'achat des acheteurs de pétrole de la même génération. Ce n'est que dans la mesure où la taxe réduira la demande de pétrole en canalisant celle-ci vers d'autres formes d'énergie que l'on assistera vraiment à un transfert des approvisionnements en faveur des générations à venir. Le cas échéant, il est préférable de veiller directement au remplacement des combustibles et d'y adapter les taxes et les subventions plutôt que de percevoir simplement une taxe sur des produits non renouvelables. En outre, la réduction de la consommation de pétrole par un pays en développement au cours d'une génération n'augmentera pas les approvisionnements dans l'avenir (sauf s'il s'agit de pétrole produit dans ses propres frontières — mais c'est là un argument qui favorise autant l'importation de pétrole que la réduction de sa consommation). Il n'est donc pas justifié d'établir alors un impôt différentiel. L'idée d'une subvention accordée à l'égard des énergies renouvelables ou des combustibles importés pourra toutefois avoir plus de mérite dans certains pays.

À l'encontre des produits pétroliers, l'imposition des autres sources d'énergie n'est ni généralisée ni systématique. Des taxes sur le charbon et l'électricité existent ici et là, mais elles ont généralement pour but de générer des recettes. Il y a également des taxes sur le bois ou le charbon de bois mais elles ne sont pas très courantes. Dans la mesure où la consommation de bois et de charbon produit beaucoup de fumée et de pollution, on rate peut-être ici une occasion d'imposer une taxe. En effet, on pourrait facilement lever une taxe aux portes de la ville sur les combustibles en vrac qui sont acheminés dans les régions urbaines, de même que l'on pourrait recourir à une taxe différentielle sur le bois et le charbon pour favoriser l'utilisation du charbon de bois et du coke.

Établissement des prix

Dans bon nombre de pays en développement, les principales industries de production d'énergie, notamment le charbon, le pétrole et l'électricité, appartiennent en majorité ou en totalité à l'État. Même dans le cas contraire, la structure de marché de ces industries oblige souvent le gouvernement à intervenir au niveau de la formation des prix. On constate donc que la fixation des prix est l'instrument utilisé le plus activement par les pays en développement pour gérer leur demande d'énergie (Munasinghe 1983). Toutefois, l'emploi de cet instrument est souvent vicié par la tarification au prix moyen basé sur des coûts historiques.

Entre autres choses, la tarification au prix moyen constitue une fausse stimulation (ou désincitation) pour le producteur. Dès que le prix cesse de représenter un indicateur des besoins en investissement, d'autres régulateurs des investissements doivent être mis en place. De façon typique, lorsque les rendements diminuent ou que la demande est excessive, les coûts moyens se situent en deçà des coûts marginaux et les prix fixés en fonction des coûts moyens sont trop bas pour justifier un investissement qui ferait correspondre la capacité de production à la demande. Pour convaincre les entreprises d'investir quand même dans ces circonstances, les gouvernements introduisent divers stimulants à l'investissement : par exemple, des taux d'intérêt faibles et stables, un amortissement généreux et des allocations

appréciables pour investissement et enfin des subventions croisées à l'égard d'une production dispendieuse. Chacun de ces stimulants fausse le schéma d'investissement en faveur des industries ainsi avantagées et, à l'intérieur de ces dernières, les technologies et les projets à intensité capitalistique.

La fixation des prix basée sur des coûts historiques tend à produire un déséquilibre entre les réserves pour amortissement et les fonds d'investissement nécessaires au remplacement du matériel. Lorsqu'il y a hausse du prix du matériel, les provisions pour amortissement n'atteignent même pas les sommes nécessaires au remplacement; il faut alors stimuler l'investissement à l'aide de mesures du genre mentionné précédemment. Dans le cas contraire et moins fréquent, l'amortissement dépasse les besoins en matière de remplacement.

Parmi les sources d'énergie exploitées à grande échelle, la fixation de prix uniformes d'une région géographique à l'autre favorise celles qui affichent de faibles coûts de transport. Les méthodes de fixation de prix ont donc probablement autorisé la pénétration du pétrole sur les marchés du charbon. Réciproquement, si l'on fixe les prix d'après les coûts de transport, il y aura monopolisation moins importante des marchés de l'énergie et une gamme plus étendue de sources d'énergie concurrentielles.

La sous-estimation des prix et des coûts de l'énergie produite par de grandes entreprises centralisées diminue la concurrence entre les petites formes d'énergie décentralisées et renouvelables et les empêche de détenir sur les marchés la place qu'elles occuperaient dans des conditions plus équitables. Comme on l'a fait remarquer à la section sur la demande globale, un abaissement des prix de certaines marchandises n'est pas la meilleure façon d'aider le consommateur ou de promouvoir une justice. Il faut délaisser la tarification au coût moyen et repenser la tarification pratiquée par des monopoles naturels ou créés par une situation politique.

Dans ces conditions, l'économiste a pour règle de favoriser une tarification au prix marginal à long terme. On entend par coûts marginaux ceux qui varient en fonction de la production. Toutefois, tous les coûts sont enclins à varier sur une longue période. La différence entre des coûts moyens et des coûts marginaux à long terme repose donc essentiellement sur le fait que les coûts moyens désignent habituellement des coûts engagés alors que les coûts marginaux s'appliquent à ceux qui sont susceptibles de l'être. Il faut avant tout se rappeler que l'estimation des coûts se fait de manière prospective plutôt que rétrospective. Cette différence aura probablement peu de poids si l'on procède à des achats fréquents d'intrants comme les matières premières. La différence sera toutefois plus substantielle dans le cas de biens durables comme des machines. Chez les fabricants de produits multiples, la tarification au coût marginal à long terme nécessite en plus que les prix de leurs produits sont au moins égaux aux coûts que l'on peut leur attribuer : en d'autres mots, il ne devrait pas y avoir refinancement des produits. En dernier lieu, tout comme les services publics devraient pratiquer des prix marginaux à l'égard de leurs ventes, ils devraient être disposés à payer le coût marginal des produits qu'ils achètent.

Ainsi, bien qu'un processus vigoureux d'établissement des coûts marginaux à long terme puisse sembler ésotérique et incompréhensible si ce n'est aux économistes avertis, il fournit quand même un point de repère pour l'établissement des prix et comporte un certain nombre de conséquences pratiques; par exemple :

- Les prix des produits doivent traduire les coûts attribuables à chacun; les prix doivent varier d'un endroit à l'autre pour refléter les coûts de transport.

- Les entreprises doivent être disposées à payer le plein prix des produits qu'elles achètent.
- Les sommes radiées au titre de l'amortissement doivent être calculées d'après les coûts de remplacement et non d'après les coûts engagés.

Ces règles ne sont guère plus compliquées que celles qui régissent l'établissement des coûts moyens ; on peut les adopter et les vérificateurs peuvent en assurer l'application. Ce ne sont pas les seules règles possibles et personne ne sait vraiment comment elles fonctionneraient dans la pratique. Il faudrait donc effectuer de nouvelles recherches sur les principes de la réglementation des prix et sur leurs applications à l'industrie de l'énergie.

Structure du marché

Les règles dont nous avons parlé ci-avant régissent l'application de prix minimums afin de protéger les petits producteurs d'énergie ; les gouvernements se préoccupent habituellement d'établir les prix maximums pour protéger le consommateur. La popularité de la tarification au coût moyen parmi les organes de réglementation s'explique par sa similitude à l'établissement des coûts minimums. Toutefois, il y a de nombreuses façons d'accroître les prix sans augmenter les bénéfices ; l'étoffement des coûts n'est pas rare en situation de contrôle des prix. Il conviendrait de chercher la solution à l'inflation des coûts, non pas tellement dans une réglementation des prix, mais bien dans la concurrence. Il n'est pas toujours nécessaire que la concurrence existe réellement puisque sa seule menace suffit souvent à maintenir les prix à un bas niveau (Baumol et al. 1982 ; Spence 1983). Ce qu'il importe, c'est de chercher dans la structure du marché et non dans une réglementation des prix le moyen de garder les prix à un niveau inférieur. La recherche de structures de marché assurant une concurrence efficace devrait englober également les industries énergétiques.

Selon un corollaire de la concurrence, l'accès au marché doit être libre et aucune entreprise ne devrait bénéficier de faveurs spéciales au détriment d'une autre. Ce critère est très souvent violé dans les pays en développement. Il est presque impossible dans un pays de séparer les affaires de la politique et cela est impossible dans les pays en développement où les hommes politiques établissent ou s'approprient des entreprises pour s'enrichir, ou vice versa. Il arrive souvent que des entreprises d'État soient créées pour éloigner les entreprises étrangères ou pour mieux les concurrencer. Mais dès qu'elles sont formées, elles détiennent une place privilégiée et empêchent les concurrents de se tailler une place sur le marché. Ainsi, peu importe à qui appartiennent les entreprises, il est essentiel qu'il n'y ait aucun lien de dépendance entre le gouvernement et le secteur commercial si l'on veut maintenir une concurrence loyale.

L'agriculture

On peut considérer l'agriculture comme une activité qui produit une biomasse utile pouvant servir à une diversité de fins — alimentation, fourrage, combustible, engrais et matières premières pour l'industrie. Sa production est tellement diversifiée qu'elle peut répondre à la plupart des besoins des populations rurales locales. Il y a beaucoup de systèmes agricoles hautement autonomes dans les pays en développement (bien que les pays eux-mêmes possèdent souvent une agriculture défici-

taire). Comme les échanges commerciaux des systèmes avec les autres secteurs sont peu importants, le coût des infrastructures, comme les routes et l'approvisionnement en énergie, nécessaires à une telle activité est élevé. Bien que les coûts de l'infrastructure varient et qu'ils soient mieux absorbés par les pays à revenu élevé et densément peuplés, ils représentent une restriction de taille sur le taux de développement rural. Un pays qui investit dans son infrastructure rurale ne bénéficie pas d'une production ni d'un rendement commercial élevés. Celui qui investit dans une infrastructure urbaine peut bâtir plus rapidement son secteur commercial et industriel mais pourra éprouver des problèmes de dualisme entre les régions urbaines et rurales et d'autres difficultés par suite de la migration entre ces deux types de régions.

Les régimes agricoles des pays en développement présentent deux caractéristiques communes : une forte proportion de la population est engagée dans l'agriculture, et une faible production par travailleur, laquelle constitue la norme du niveau de vie dans les régions rurales. Dans les pays en développement où la population s'alimente surtout à partir de céréales et de racines comestibles, un quart de tonne par adulte par année représenterait un volume d'aliments suffisant sur le plan quantitatif mais non au niveau qualitatif; une tonne par travailleur agricole suffirait, de façon très approximative, à nourrir quatre adultes ou un couple avec trois enfants. En pratique, la population agricole des pays dont le rendement par travailleur agricole est inférieur à une tonne est principalement engagée dans une production de subsistance; tous les pays qui affichent un taux élevé d'urbanisation et d'industrialisation ont une production supérieure à une tonne par travailleur agricole.

Le tableau 4 dresse la liste des pays où la productivité alimentaire par travailleur agricole se situe en deçà d'une tonne par année. Le tableau comporte des imperfections. Pour ajouter les tubercules et racines comestibles aux céréales, nous avons divisé la production de racines comestibles par trois pour ensuite établir son équivalent approximatif à l'état sec. Nous connaissions le nombre de travailleurs agricoles mais non l'effectif des travailleurs occupés à la production vivrière. Pour pouvoir comparer les deux chiffres, nous avons essayé d'évaluer la production d'aliments si toutes les terres agricoles étaient cultivées à cette fin : nous avons divisé la production alimentaire par la superficie en culture et multiplié le quotient par la superficie de toutes les cultures. Comme nous ne pouvions obtenir une évaluation directe de cette dernière, nous avons recouru à deux valeurs de remplacement bien imparfaites : la superficie des grandes cultures et la superficie en façons culturales. Les deux constituent cependant des estimations incomplètes de la superficie de toutes les cultures. Donc, notre estimation de la superficie de l'ensemble des cultures et, de ce fait, de la productivité alimentaire nationale, est inférieure à la réalité, mais la différence est minime. Plus sérieuse est l'hypothèse selon laquelle la superficie réservée aux autres cultures donnerait les mêmes rendements alimentaires si elle était affectée à la production vivrière. Quoi qu'il en soit, nous croyons disposer de chiffres valables pour les fins de notre étude.

Toutefois, l'image qu'ils révèlent n'est pas aussi bonne. À l'exception d'un pays (Haïti) en Amérique Latine et de quatre autres (Bhoutan, Bangladesh, Népal et Viêt-nam) en Asie, tous les pays à faible productivité sont situés en Afrique et disséminés sur tout le continent. Cinq autres pays d'Afrique (Tchad, Côte d'Ivoire, Malawi, Zaïre et Comores) avaient une productivité se situant entre 1 et 1,1 tonne.

Il est très probable que le tableau 4 cache quelques éléments. Les chiffres de productivité en haut du tableau sont tellement bas que la production alimentaire agricole ne suffirait pas à elle seule à subvenir aux besoins des familles. De toute évidence, les travailleurs agricoles de ces pays s'emploient probablement à d'autres

Tableau 4. Productivité potentielle par travailleur agricole en termes d'aliments, 1983.

Pays	Travailleurs agricoles (en milliers) [1]	Production pondérée (en milliers tonnes)[a] [2]	Productivité alimentaire (en kilo) [3 = 2/1]	Superficie en cultures vivrières (en milliers ha) [4]	Superficie en cultures[b] (en milliers ha) [5]	Superficies en façons culturales[c] (en milliers ha) [6]	Productivité potentielle I[d] (en kilo) [3 × 5/4]	Productivité potentielle II[e] (en kilo) [3 × 6/4]
Botswana	315	31,0	99	164	166	1 360	100	820
Mauritanie	436	54,5	125	173	174	208	125	150
Cap-Vert	59	9,8	166	15	17	40	188	443
Lesotho	604	148,8	246	154	154	298	246	476
Somalie	1 563	261,7	167	344	536	1 116	260	542
Gambie	239	65,8	275	87	90	160	284	506
Mali	3 416	975,2	285	1 789	1 899	2 058	303	328
Bhoutan	619	186,9	302	132	136	98	311	224
Burkina Faso	3 117	1 219,7	391	2 559	2 658	2 633	406	402
Guinée	1 867	687,2	368	637	708	1 574	409	909
Haïti	1 981	694,4	351	783	947	897	425	402
Mozambique	2 560	983,0	384	1 535	1 808	3 080	452	771
Swaziland	190	62,1	327	66	98	138	486	684
Rwanda	2 394	1 139,8	476	736	791	1 034	512	669
Burundi	1 746	1 104,2	632	850	900	1 306	669	971
Népal	6 612	4 506,0	682	2 543	2 605	2 332	699	625
Kenya	5 248	3 278,5	625	2 890	3 349	2 310	724	500
Libéria	532	358,0	673	307	367	371	805	813
Tanzanie	6 269	5 211,8	831	4 460	5 210	5 200	971	969
Bangladesh	26 804	2 3598,3	880	11 669	12 889	9 136	972	689
Vietnam	17 703	16 569,0	936	7 413	7 737	7 585	977	958

Source : Chiffres tirés des documents de l'Organisation pour l'alimentation et l'agriculture (1984).

[a] La production des cultures vivrières a été additionnée (en milliers de tonnes). On a calculé que les plantes racinaires et les tubercules représentaient 0,3 fois le tonnage des autres cultures vivrières, par rapport à leur plus faible teneur en calories par unité de poids.

[b] «Superficie en cultures» correspond à la somme de toutes les superficies consacrées aux cultures énumérées dans la publication de l'Organisation pour l'alimentation et l'agriculture (1984) pour lesquelles des chiffres existaient. La superficie consacrée aux fruits et aux noix n'a pu être obtenue.

[c] «Superficies en façons culturales» correspond à ce que l'Organisation pour l'alimentation et l'agriculture (1984, tableau 1) définit comme les terres arables plus les terres en cultures permanentes. Les terres arables comprennent «les terres en culture temporaire (les superficies à deux cultures sont comptées une fois), les prairies temporaires destinées à être fauchées ou pâturées, les superficies consacrées aux jardins maraîchers et aux potagers (y compris la culture en serre) et les terres en jachère et non cultivées» (Organisation pour l'alimentation et l'agriculture 1984:3).

[d] Productivité potentielle I = Productivité alimentaire $\times \frac{\text{superficies en culture}}{\text{superficies en culture vivrière}}$.

[e] Productivité potentielle II = Productivité alimentaire $\times \frac{\text{superficies en façons culturales}}{\text{superficies en culture vivrière}}$.

activités et ils doivent également puiser à d'autres sources alimentaires — par exemple la zootechnie.

Quoi qu'il en soit, les chiffres de productivité de beaucoup de pays d'Afrique—et de quelques pays d'Asie—semblent extrêmement bas ; à de tels niveaux de productivité, ces pays ne sauraient avoir grand espoir de restructurer leur économie. L'accroissement de la productivité agricole doit devenir l'une des premières priorités de ces pays — et l'une des principales pour la recherche.

Toutefois, il ne faudrait pas enlever le caractère prioritaire de l'agriculture une fois l'objectif d'une tonne par année atteint. Un certain nombre de pays fortement peuplés, en cours d'industrialisation, comme la Chine, l'Égypte et l'Inde, affichent une productivité variant entre 1 et 2 tonnes. Et pour eux, l'augmentation de la productivité doit demeurer un but important.

À cause de son faible niveau de vie, la population rurale est susceptible d'être attirée vers les régions urbaines lorsque la demande de main-d'oeuvre à cet endroit augmente. La migration vers les régions urbaines ne constitue pas en elle-même un phénomène indésirable. C'est l'une des causes principales d'une hausse générale de la productivité et du niveau de vie et elle a caractérisé le développement de tous les pays industrialisés. Cependant, lorsque la croissance de l'emploi dans les régions urbaines vise plutôt les services que la production de biens, certains pays subissent une baisse de la production agricole sans connaître une hausse compensatoire ailleurs et doivent alors accroître leurs importations d'aliments ; l'emploi dans les régions urbaines compte un certain nombre de migrants ruraux occupés à temps partiel. Ainsi, une hausse soutenue de la production agricole par travailleur facilite le développement.

Toute augmentation de ce genre se répercute sur la demande de main-d'oeuvre : une hausse de la productivité du travail diminue les besoins de main-d'oeuvre et fait augmenter le taux de chômage à moins qu'il n'y ait progression de la production totale. Une hausse de la productivité amène habituellement une augmentation des revenus réels, de la demande totale de biens et de services et enfin de la production et de l'emploi. Cependant, il n'est pas nécessaire que ces effets positifs et négatifs sur l'emploi s'annulent ni qu'ils se produisent toujours au même endroit. Tout programme de développement devra donc examiner et tenir compte des répercussions d'une croissance de la productivité sur l'emploi.

Qui plus est, une croissance de la production et de la productivité peut avoir de graves répercussions sur la répartition du revenu. L'agriculture est une industrie basée sur le capital foncier et, à l'exception des pays socialistes, il n'y a aucune propriété égale ou commune des terres. Lorsque la propriété des terres est mal répartie et que l'emploi salarié domine, toute augmentation de la productivité avantage les propriétaires terriens à moins qu'il n'y ait hausse concomitante des salaires ou une autre forme de redistribution (p. ex., des terres). Ainsi, le développement agricole peut aggraver la répartition du revenu. Il faut donc toujours étudier et tenir compte des répercussions des programmes de développement sur la répartition des richesses.

Plus récemment, un certain nombre de pays en développement ont observé, parallèlement à une croissance de la productivité agricole, une augmentation rapide de la consommation d'énergie commerciale, plus particulièrement de pétrole. Cette dépendance à l'égard du pétrole a rendu les systèmes agricoles aussi vulnérables aux chocs extérieurs que tout autre secteur de l'économie et obligé les autorités à inclure l'agriculture dans la recherche de solutions aux problèmes que rencontraient les secteurs de l'économie affectés par de tels événements.

Genres de facteurs énergétiques de production

Dans certaines études antérieures, on regroupait les facteurs énergétiques de production de l'agriculture; dans d'autres, on agrégeait la production agricole sous forme de valeurs énergétiques (voir p. ex., Makhijani et Poole 1975; Leach 1976; Pimentel 1980). Dans ces études d'agrégation, on constate que les systèmes de production alimentaire dont la main-d'oeuvre affichait une productivité élevée présentaient également d'autres facteurs énergétiques importants de production. Une analyse plus poussée conduirait peut-être à des conclusions plus précises (voir Smil et al. 1983). Cependant, de nouveaux modèles et formulations conceptuelles permettraient d'effectuer une analyse encore plus fructueuse de l'utilisation d'énergie dans l'agriculture.

Comme point de départ à une telle formulation, il conviendrait peut-être de désagréger les procédés agricoles et les apports énergétiques en cause. Reddy (1985) a mis au point et appliqué à la culture du riz une méthode qui permet de désagréger les procédés et ces apports. Dans le système agricole en général, il faut faire une première distinction entre les apports énergétiques directs et indirects; parmi ces derniers, l'irrigation, les engrais et les pesticides comptent au nombre des plus importants. On peut également diviser les apports directs en facteurs mobiles et stationnaires. C'est le genre de facteur qui détermine la possibilité de substitution entre ces derniers et entre les combustibles; l'ensemble des procédés, assorti des possibilités de substitution au sein de chacun, détermine les choix technologiques possibles.

Facteurs de production non évalués

L'agriculture dépend d'un apport vital d'énergie solaire, de gaz carbonique, d'azote et d'eau de son milieu. Il serait possible de mesurer ces facteurs uniquement dans des conditions expérimentales très rigoureuses. La plupart des études agricoles ne les mesurent donc pas, préférant plutôt recourir à des modèles partiels.

On accepte depuis longtemps l'existence de facteurs non contrôlés et non mesurés et c'est pour mieux les aborder que l'on a mis au point les techniques statistiques de l'analyse factorielle. En deux mots, on peut isoler l'influence de ces facteurs et les examiner en vase clos si l'on peut regrouper leurs fluctuations individuelles dans des échantillons différents; les variations d'un échantillon à l'autre peuvent alors servir à connaître les effets des facteurs non contrôlés alors que les variations au sein de chaque échantillon peuvent révéler l'effet des facteurs contrôlés.

De manière générale, les études agricoles ont avantage à englober un vaste éventail de variations et à stratifier leurs observations de manière à faire ressortir l'effet des variables non contrôlées comme le climat et le sol. Les études à la fois globales et particulières possèdent une synergie que ne sauraient exhiber des études exclusivement axées sur l'une ou l'autre de ces démarches. C'est le cas des études de l'utilisation d'énergie en agriculture : bien qu'un chercheur ou une petite équipe trouve plus facile de conduire des études portant sur un village particulier ou une entité plus petite, et d'obtenir des fonds à cette fin, les études comparables et simultanées menées dans diverses circonstances seraient beaucoup plus utiles (voir Dumont 1957).

Les trois grands systèmes de production vivrière du monde constituent une des omissions de la recherche agricole : la culture céréalière saisonnière sur l'ensemble des terres de l'Eurasie, la culture des tubercules pérennes des régions humides

d'Afrique, d'Asie du Sud-Est et du Pacifique et la culture saisonnière des céréales secondaires des régions arides de l'Afrique. Introduit il y a plusieurs milliers d'années, le système agricole d'Eurasie s'est adapté à une multitude d'environnements et a également diversifié ses techniques par suite de la mécanisation des pays industrialisés. Par contre, les deux autres systèmes conservent la même technique et la même productivité et connaissent une régression à cause de la concurrence des produits du premier système. La baisse de la production agricole dans certains pays d'Afrique et l'augmentation des importations alimentaires en Afrique et dans certains pays du Pacifique traduisent cette stagnation de la technologie. Les possibilités d'adaptation et d'amélioration des systèmes agricoles périphériques constituent un secteur de recherche de première importance dans un grand nombre de pays en développement.

Facteurs mobiles

Les facteurs mobiles désignent ceux qui sont requis pour la préparation du sol, l'ensemencement, le désherbage, l'épandage du fumier, les engrais et pesticides, la récolte et le transport des produits. La direction de ces opérations et le processus décisionnel qui leur est afférent nécessitent une main-d'oeuvre, mais celle-ci peut être remplacée par du matériel mécanique ou à traction animale dans les tâches physiques et, en conséquence, contribuer à accroître la productivité.

Lorsque les conditions climatiques ou la succession des cultures multiples déterminent la longueur de la campagne agricole, le raccourcissement des travaux de préparation du sol et de la récolte peut faire progresser le rendement. Ces opérations exigeant un approvisionnement énergétique de pointe, leur abrégement peut occasionner une hausse des bénéfices.

L'utilisation d'animaux pour les labours accélère les travaux de préparation du sol; c'est d'ailleurs l'usage auquel ils sont surtout destinés dans la plupart des systèmes agricoles. Bien que les premiers agriculteurs aux États-Unis faisaient appel à des chevaux, l'utilisation de dispositifs à traction animale pour la récolte est à peu près inconnue dans les pays en développement. Les animaux servent en grande partie aux opérations de prérécolte (et au battage dans certaines régions) et sur une période saisonnière très concentrée.

Le cycle d'utilisation de la main-d'oeuvre comporte deux crêtes — l'ensemencement et la récolte. C'est donc pour ces deux opérations que les pays industrialisés ont mis au point des dispositifs mécaniques sous forme de tracteurs et de moissonneuses-batteuses, respectivement, pour accroître la productivité humaine. Certains pays en développement, notamment le Brésil, la Chine, l'Inde et la Turquie, ont introduit des tracteurs et, dans une moins large mesure, des moissonneuses-batteuses.

La mécanisation a des effets différents sur l'utilisation de la main-d'oeuvre selon qu'on l'introduit dans des opérations de pointe ou ailleurs. Elle réduit le nombre d'heures-personnes dans toutes les opérations mais elle ne libère pas les travailleurs des opérations secondaires. Toutefois, si la mécanisation est introduite dans les opérations primaires, elle libère les travailleurs pour toute l'année. En d'autres mots, la mécanisation des opérations secondaires crée un chômage saisonnier alors que celle des opérations primaires crée un chômage permanent. Les tracteurs et les moissonneuses-batteuses suscitent donc une menace de chômage que l'on ne retrouve pas avec d'autres formes de mécanisation. La mécanisation des opérations principales peut augmenter la productivité par travailleur d'une manière que la mécanisation des autres opérations ne peut atteindre, mais pour qu'il y ait augmentation réelle de la productivité, les travailleurs devenus excédentaires doi-

vent être absorbés par les secteurs qui ont connu une hausse de production, ou ailleurs.

Comme on l'a souligné au début, une hausse de la productivité entraînera une progression du revenu réel, de la production et de l'emploi et aura donc tendance à neutraliser les déplacements de main-d'oeuvre causés par la mécanisation. Les conséquences directes de la mécanisation, qui se traduisent toujours par un déplacement de main-d'oeuvre, peuvent donc s'écarter des répercussions globales. Il n'est donc pas surprenant que les nombreuses recherches dans ce domaine n'aient pas encore apporté de conclusion définitive (voir p. ex., Hayami et Ruttan 1971; Poleman et Freebairn 1973; Organisation internationale du travail 1974; Binswanger 1978; Berry et Cline 1979). Même si ce secteur de la recherche a été examiné sous toutes ses coutures, il pourrait tirer profit de nouveaux travaux basés sur une conception plus claire des effets directs et indirects de la mécanisation.

La topographie, les caractéristiques du sol et l'approvisionnement en eau sont des facteurs qui restreignent la possibilité de mécanisation dans l'agriculture. Par exemple, les plateaux à texture légère ou facilement friables se prêtent bien à un labour mécanique. Les écarts que l'on observe dans ces facteurs expliquent la dissémination inégale des machines agricoles. L'adaptation de systèmes techniques à toute la gamme des conditions locales dans les pays en développement nécessite une application généralisée de la recherche.

Les relations observées entre le type de matériel, les conditions de culture et le rendement ont fait l'objet d'études et conduit à des améliorations progressives des tracteurs, moissonneuses-batteuses et dispositifs aratoires. Devant la montée des prix du pétrole, on ajoute aux paramètres de l'étude l'efficacité énergétique du matériel (Taylor 1977). On connaît mal le petit nombre de travaux comparables sur les animaux de trait et sur leurs dispositifs aratoires (voir Ramaswamy 1979; Ward et al. 1980).

En dernier lieu, l'opération de labour constitue en elle-même un facteur de production dans l'agriculture que l'on peut optimiser. Avec la montée des prix du pétrole, la possibilité de réduire les opérations de labour a suscité un intérêt considérable dans les systèmes agricoles mécanisés (voir Wittmus et al. 1975). Des occasions semblables d'optimisation des labours existent à n'en pas douter dans les systèmes agricoles des pays en développement, et ils nécessitent une exploration plus approfondie.

Facteurs stationnaires

Après la récolte, les activités agricoles sont stationnaires; aussi peut-on appeler leur apport d'énergie des facteurs stationnaires. Parmi ces activités, les trois qui font appel à l'énergie concernent le séchage, le battage et la mouture.

De ces trois, l'égrenage et la mouture sont des opérations mécaniques, comme le pompage vertical, et peuvent recourir aux mêmes formes d'énergie. Les travaux de recherche à ce sujet sont beaucoup plus restreints que sur l'irrigation mais toutes les techniques et formes d'énergie du pompage peuvent leur être appliquées. Nous allons aborder plus en détail la question du pompage dans la prochaine section. La discussion des séchoirs solaires figure au chapitre 9.

Facteurs indirects

Les facteurs indirects sont constitués par l'énergie servant à produire les 115 biens et services utilisés dans l'agriculture. Les principaux sont l'eau, les engrais et les pesticides. L'une des façons de réduire les facteurs énergétiques indirects

consiste à accroître le rendement des applications d'eau et d'autres facteurs. L'écart entre les rendements réels et ceux que l'on observe dans les expériences contrôlées est tellement grand que l'on peut considérablement les améliorer, semble-t-il, en changeant les méthodes et le moment d'application (voir p. ex., Rogers 1983).

L'utilisation de l'énergie dans l'irrigation a suscité beaucoup de travaux de recherche (Meta Systems Inc. 1980; Bhatia 1984a, b). L'irrigation par élévation d'eau compte un grand nombre de techniques de remplacement qui peuvent utiliser des combustibles solides, liquides et gazeux, de l'électricité, de l'énergie solaire et de l'énergie éolienne. Quelques-unes de ces techniques, comme l'énergie solaire et éolienne, dépendent des conditions locales. Chaque technique comporte des variations d'échelle et un coût en capital correspondant. En dernier lieu, la profondeur et le volume des réserves d'eau varient d'un endroit à l'autre, tout comme les prix. Dans ces circonstances, c'est une tâche presque impossible que d'assortir les technologies à chaque ensemble de conditions. Les nombreuses analyses coût-bénéfice examinent un aspect différent de cet enchevêtrement de faits, mais ne suffisent pas à les ordonner pour en permettre une utilisation rationnelle. Il serait beaucoup mieux si, au lieu d'essayer de définir à l'avance les segments de marché de chaque technique, chacune pouvait établir son propre secteur en concurrence avec les autres. Si c'est là leur effet, il importe d'éliminer les distorsions du marché qu'introduit une tarification inefficace, comme la tarification au coût moyen. En conséquence, il importe d'effectuer des études sur les prix axées sur les mesures à prendre si l'on veut mettre en place une meilleure structure commerciale dans l'irrigation.

Les études sur l'irrigation dans les fermes ne peuvent aborder un autre ensemble de questions, notamment celles qui touchent l'échelle optimum et la répartition dans l'espace des dispositifs d'irrigation. De façon générale, l'irrigation par gravité coûte moins cher et demande moins d'énergie que l'irrigation par élévation, mais seulement sur une échelle beaucoup plus grande. En outre, elle est susceptible de donner un faible rendement à cause des difficultés pour faire concorder la demande en eau et les approvisionnements. En outre, la plupart des dispositifs d'irrigation par élévation sont sujets à des économies d'échelle, certains plus que d'autres, mais il y a des limites à la taille de tous ces appareils. Enfin, plus la nappe phréatique est profonde, plus la quantité minimale d'énergie requise pour le pompage est grande. Ces trois facteurs favorisent une répartition optimale des dispositifs dans l'espace que l'on n'atteint presque jamais dans la pratique mais vers laquelle on pourrait mieux tendre si on adoptait des méthodes adéquates de tarification. Ainsi, les règles de distribution de l'eau et d'établissement des prix de cette denrée ont autant de conséquences sur l'efficacité énergétique que la tarification de l'énergie elle-même. C'est là un domaine fort délaissé par les chercheurs.

Politique

Nous venons de donner un classement des apports énergétiques à l'agriculture. Pour des fins politiques, il faut les combiner en solutions techniques de rechange et choisir ou inférer des choix au niveau global (pour une description et une application de la méthode à ce sujet, voir Reddy 1985). De tels choix ont souvent trait à la source d'énergie; par exemple, la décision de mécaniser suppose le remplacement de l'énergie animale ou humaine par une énergie mécanique. Bien qu'il s'agisse essentiellement d'une substitution interénergétique à la ferme, ce processus nécessite quand même la formulation d'une politique lorsqu'il a des répercussions

macro-économiques sur l'emploi total, la balance des paiements et l'utilisation des ressources énergétiques.

On peut également concevoir des mesures pour accroître l'efficacité de l'utilisation de l'énergie dans l'agriculture. Trois secteurs semblent fort prometteurs à cet égard.

Premièrement, l'accroissement du rendement des terres fait monter la productivité de tous les apports énergétiques liés aux superficies cultivées : apports dans le labour, application d'engrais et de pesticide, et irrigation.

Deuxièmement, un accroissement de la productivité des apports énergétiques indirects, surtout l'eau et les engrais. Il y a une différence énorme entre une irrigation à efficacité moyenne et optimale (Bos et Nugteren 1974). L'irrigation par rigoles à grande échelle pratiquée sous les tropiques doit composer avec des pertes énormes par évaporation et percolation bien avant que l'eau atteigne la ferme. À la ferme même, la technique d'application de l'eau a un effet marqué sur son efficacité. Dans bon nombre de pays en développement, le prix dérisoire de l'eau d'irrigation encourage son gaspillage. Dans le domaine des engrais, la mise au point de produits fortement concentrés solubles dans l'eau (surtout l'urée) a permis d'accroître de plus de 50 % l'apport d'azote dans les cultures. Cependant, l'apport de phosphore par la première culture se situe habituellement en deçà de 10 %, et celle de potasse, entre 20 % et 40 %. Bien que l'apport total soit supérieur à cause de la rétention de phosphore et de potasse dans le sol, il est quand même possible d'améliorer fortement l'absorption totale des engrais (Organisation pour l'alimentation et l'agriculture 1978). Ici encore, l'octroi généralisé de subventions pour les engrais peut encourager leur gaspillage.

Troisièmement, une meilleure utilisation des apports énergétiques indirects, surtout l'eau, les engrais et les pesticides, est en étroite relation avec la chimie du sol ainsi qu'avec la mise au point de cultures améliorées auxquelles ils peuvent être efficacement appliqués. Ainsi, il convient de coordonner soigneusement la recherche dans les trois domaines soit les apports énergétiques, les cultivars et les sols. La recherche biotechnologique visant à accroître les rendements et l'intensité de l'utilisation des terres est fort prometteuse comme méthode d'économie d'énergie.

L'industrie

En ce qui a trait à la gamme des sources d'énergie ainsi qu'aux procédés et aux dispositifs dans lesquels on les utilise, l'industrie est plus polyvalente que tout autre secteur. Dans le domaine du transport, le besoin de construire des véhicules légers, rapides et sécuritaires a permis la domination du moteur à combustion interne, sur lequel on a également concentré la recherche. Par contre, la taille du matériel énergivore dans le secteur domestique est limitée par la taille du ménage. Dans l'industrie, l'utilisation de l'énergie n'est pas tellement restreinte par des considérations de taille ou de portabilité. L'étendue des options qui s'offrent en matière d'économie d'énergie et de substitution interénergétique est également plus vaste dans l'industrie.

Les producteurs des pays industrialisés, surtout les grandes entreprises, effectuent beaucoup de recherche sur leurs techniques et procédés, y compris sur les choix énergétiques. Quelques-uns des résultats de cette recherche font l'objet d'un brevet alors que d'autres sont intégrés au matériel qu'ils fabriquent et communiqués

aux acheteurs éventuels. Une partie de cette information est publiée dans les journaux industriels et dans les comptes rendus de colloques. Le volume de publications à ce sujet est considérable, en particulier pour les industries à forte intensité énergétique comme celles de l'acier et du ciment; il aurait été impossible pour le Groupe de toutes les évaluer compte tenu des délais qu'on lui avait fixés et des ressources à sa disposition.

Le Groupe s'est donc limité à trois types de recherche. En premier lieu, il y a la recherche qui ne présuppose peu ou pas de connaissances préalables sur l'industrie en question et qui traite des mesures générales de la gestion de la demande dont nous avons discuté précédemment au début de ce chapitre. En deuxième lieu, il y a la recherche qui porte sur les types d'utilisateurs d'énergie et de matériel de stockage et qui, à notre avis, est très prometteuse pour les pays en développement. Étant donné que la portée de ces deux types de travaux de recherche dépasse le secteur industriel, elle fait l'objet du chapitre suivant. En dernier lieu, il y a la recherche sur l'intensité énergétique des industries, que nous aborderons maintenant.

Industries énergivores

La liste des matières dont la production exige un apport d'énergie, en tenant compte à la fois des besoins directs et indirects d'énergie, a pu être dressée sur la base des indices utilisés aux États-Unis; on remarque au tableau 5 les 17 matières principales dans cette catégorie. On définit les matières énergivores comme des biens relativement homogènes dont les procédés indirects et directs de production nécessitent des quantités extraordinairement vastes d'énergie primaire (Strout 1985). On calcule la consommation d'énergie globale de ces matières en supposant que les indices d'énergie utilisés aux États-Unis s'appliquent à l'ensemble du monde; d'après cette hypothèse, leur consommation d'énergie a compté pour 27 % de la consommation globale d'énergie commerciale et pour une part beaucoup plus grande de la consommation d'énergie industrielle dans le monde. Ainsi, en concentrant les efforts d'économie d'énergie sur les industries productrices de matières à forte intensité énergétique, ou en déplaçant la demande vers d'autres matières, on contribuerait rapidement et de façon importante à faire diminuer l'intensité énergétique globale dans le cycle de production. De même, le recyclage de ces matières amènerait une baisse de la consommation globale d'énergie.

Bien sûr, de telles mesures incomberaient à bon nombre de pays en développement, car dans les pays industrialisés, la consommation par habitant des dix matières les plus «énergivores» en 1970–1980 s'établissait entre une et deux tonnes par année; dans les pays en développement affichant un revenu par habitant inférieur à 1 000 $ US, ce chiffre est ordinairement de 100 kg ou moins. L'élasticité-revenu des matières énergivores régresse à la longue mais cet effet ne commence à apparaître qu'à des niveaux élevés de revenu. La production de telles matières à une échelle permettant d'accroître la consommation par habitant des pays en développement aux niveaux observés dans les pays industrialisés nécessiterait une augmentation si importante de la consommation globale d'énergie qu'il faudrait obligatoirement intégrer à la stratégie de croissance des pays en développement l'économie des matières énergivores ainsi que l'économie d'énergie.

Bien que l'on puisse supposer que les biens industriels nécessitant un apport important d'énergie dans les pays industrialisés joueront également le même rôle dans les pays en développement, leur coefficient de pondération variera d'un pays en développement à l'autre. Ainsi, chaque pays en développement devra dresser sa

Tableau 5. Production mondiale des principales matières à intensité énergétique 1969–1971 (moyennes sur 3 ans) et 1979–1980 (moyennes sur 2 ans) (1 000 t).

Groupe de marchandises	Coefficient énergétique (tec/t)[b] [1]	Production annuelle moyenne 1969–1971 [2]	Production annuelle moyenne 1979–1980 [3]	Utilisation annuelle moyenne de l'énergie[a] 1969–1971 [4 = 1 × 2]	Utilisation annuelle moyenne de l'énergie[a] 1979–1980 [5 = 1 × 3]	Rapport 1979–1980 à 1969–1971 [5/4]
Produits pétroliers raffinés	0,21	2 186 004	2 982 677	459 061	626 362	1,364
Pâte de bois	0,99	101 216	124 922	100 204	123 673	1,234
Papiers et cartons	0,40	127 291	174 250	50 916	69 700	1,369
Engrais chimiques (NPK)	0,77	71 484	121 796	55 043	93 783	1,704
Insecticides, fongicides, etc.	3,63	1 620	2 760	5 881	10 019	1,704
Plastiques et résines[c]	5,38	29 294	58 599	157 602	315 263	2,000
Caoutchouc synthétique	5,46	5 015	9 022	27 382	49 260	1,799
Fibres cellulosiques artif.	8,10	3 510	3 279	28 431	26 560	0,934
Fibres non cellulosiques	9,45	5 097	10 413	48 167	98 403	2,043
Ciment hydraulique	0,32	570 333	861 902	182 507	275 809	1,511
Briques de construction[c,d]	0,26	473 766	442 133	123 179	114 955	0,933
Produits en acier[c]	1,87	582 033	723 649	1 088 402	1 353 224	1,243
Cuivre de fonte primaire	4,47	7 394	9 394	33 051	41 991	1,270
Plomb de fonte primaire[f]	1,10	3 923	5 580	4 315	6 138	1,422
Zinc de fonte primaire	3,04	5 208	6 296	15 832	19 140	1,209
Aluminium de fonte primaire	8,97	10 217	15 613	91 646	140 049	1,528
Magnésium de fonte primaire	13,55	220	371	2 981	5 027	1,686
Étain de fonte primaire	1,42	220	234	312	332	1,064
Utilisation totale de l'énergie dans 17 groupes[a] de marchandises sans combustible				2 015 851	2 743 326	1,361
Pourcentage de la production mondiale totale d'énergie primaire				26,9	26,8	0,996
Production mondiale totale d'énergie primaire[g]				7 504 410	10 254 408	1,366

Source : Strout (1985).

[a] c.-à-d. en supposant l'utilisation de la technique américaine de 1967, de la structure industrielle, de la gamme des produits et de l'importance relative des produits intermédiaires importés.
[b] Tonne équivalent charbon 7 Gcal 29,3 GJ.
[c] Le champ d'observation est probablement moins étendu que pour les autres marchandises.
[d] Le nombre de briques est converti en tonnes métriques à un facteur de 2 038 t/millions de briques types ou 2,0 t/m3.
[e] En équivalent d'acier brut.
[f] Y compris le plomb antimonial de seconde fusion en 1979–1980.
[g] L'hydro-électricité, la géothermie et l'électricité nucléaire comprises comme leur équivalent dans les centrales thermiques, en supposant un rendement de production de 25 % au cours des deux années.

liste des industries auxquelles il devra appliquer plus rigoureusement de mesures d'économie et de substitution. Outre les matières énergivores, cette liste pourrait bien inclure les industries qui, bien que ne nécessitant pas une quantité importante d'énergie au stade de la production, consomment une forte proportion de l'énergie utilisée dans un pays à cause de leur taille considérable : par exemple, l'industrie des boissons et des aliments ou celle des textiles dans bon nombre de pays en développement.

On ne saurait également supposer que l'intensité énergétique d'une industrie sera la même dans un pays industrialisé et un pays en développement. La technique varie d'un pays à l'autre et d'une usine à l'autre et il faut arrêter des mesures d'économie et de substitution selon le contexte propre à chaque industrie. Des recherches considérables ont eu lieu sur l'utilisation de l'énergie dans l'industrie lourde à forte intensité énergétique comme celles de l'acier, du ciment et des engrais (voir p. ex., Metals Society 1981; Mudahar et Hignett 1982; Organisation des Nations Unies pour le développement industriel 1985). La recherche effectuée sur chaque industrie est trop volumineuse pour être examinée par le Groupe et sera mieux employée dans le pays ou l'industrie qui y trouvera son compte.

Politique

De façon générale, pour formuler une politique nationale ou infranationale, il faut effectuer un bilan énergétique de chaque industrie, cerner les mesures qui entraîneraient les économies énergétiques les plus importantes et enfin concevoir les politiques appropriées. On classe habituellement ces mesures en trois catégories (Tunnah 1985).

Mesures internes L'évaluation même des flux énergétiques dans une usine industrielle, comme celle que suppose un bilan énergétique, proposera des façons d'accroître l'efficacité énergétique sans aucun apport de fonds; par exemple, par un ajustement de l'excès d'air dans les chaudières, de la température dans les réactions chimiques ou du taux de chargement dans les procédés en continu.

Mesures nécessitant un investissement mineur Bien qu'un investissement dans un matériel moderne puisse faire économiser beaucoup d'énergie à de grandes industries à forte intensité énergétique, l'achat de petit équipement servant à utiliser et à transformer l'énergie, comme des moteurs et des chaudières, peut avoir un effet aussi significatif sur la consommation d'énergie lorsque cet équipement est employé à grande échelle. De même, le matériel qui peut récupérer la chaleur perdue offre également de grandes possibilités d'économie d'énergie. De l'avis du Groupe, ces deux types d'équipement offrent des perspectives fort prometteuses pour les pays en développement; voilà pourquoi nous aborderons ce sujet plus en détail au chapitre 5 qui suit. En dernier lieu, une isolation accrue et des mesures contre le gaspillage d'énergie nécessitent habituellement des investissements minimes dans une usine mais peuvent faire toute la différence. On tend à négliger ces petites économies d'énergie; lorsqu'on les compare aux investissements massifs destinés à l'économie d'énergie qui sont assortis de stimulants fiscaux et financiers élaborés, les mesures destinées à favoriser les petits investissements hétérogènes dans les économies d'énergie font bien piètre figure. C'est là un domaine où la recherche pourrait être particulièrement avantageuse aux pays en développement.

Mesures nécessitant des investissements majeurs La technologie des grandes industries utilisatrices d'énergie a évolué vers les économies d'énergie lorsque les prix du produit ont commencé à monter; les usines de facture récente affichent

un haut rendement énergétique, par exemple celles de l'acier, de l'aluminium et du ciment. Ainsi, le remplacement des anciennes usines par de nouvelles peut entraîner des économies d'énergie substantielles. De façon plus générale, l'établissement de nouvelles usines susceptibles d'influencer les besoins en consommation d'énergie d'un pays doit être considéré d'un point de vue national puisque les répercussions énergétiques d'un tel investissement persisteront pendant les décennies à venir. Les mesures fiscales visant à promouvoir l'efficacité énergétique, comme les crédits d'impôt, les allocations pour investissement et l'amortissement accéléré, peuvent être rentables lorsqu'il y a concurrence et que les perspectives économiques d'une entreprise dépendent de ses bénéfices. Cependant, si la structure industrielle est dominée par des monopoles ou des entreprises d'État, il pourra s'avérer nécessaire de promouvoir l'efficacité énergétique par une réglementation plus directe.

Il semblerait donc qu'il existe une multitude de connaissances au sujet de l'utilisation et de l'économie de l'énergie, l'industrie ne cessant d'en produire à tout moment; ce n'est pas tant de nouvelles recherches dans les pays en développement dont on a besoin mais plutôt d'un rassemblement, d'une diffusion et d'une application de l'information à des usines particulières.

Les transports

La prédominance des moteurs à essence à combustion interne a placé les transports au coeur du problème stratégique de la dépendance pétrolière des pays en développement. Les pays qui ont amorcé leur processus de développement au XIX^{e} siècle ont construit des réseaux ferroviaires, mais beaucoup d'autres en Amérique latine et en Asie, chez qui le développement est tributaire de l'essor pétrolier, dépendent exclusivement du transport routier et des produits pétroliers. Nous avons donc essayé d'identifier au tableau 6 les pays en développement où les transports occupent une place très importante. On peut s'attendre à ce que les prix des produits s'ajustent d'eux-mêmes en fonction des coûts du transport et que ce secteur maintienne à peu près le même niveau d'activité; en réalité, la fluctuation est énorme. Elle pourrait bien s'expliquer par les écarts observés dans les prix relatifs; les chiffres fournis par Moavenzadeh et Geltner (1984), dans la mesure où ils sont comparables, affichent des différences moindres. Parmi les autres facteurs suggérés, mentionnons les variations dans la taille du pays, la structure de production, les schémas de localisation, le niveau de motorisation et le taux de change. Cette fluctuation intrigante nous amène à en étudier les causes de même que les mesures pouvant lui être appliquées.

Pour les pays en développement, les transports constituent le lien entre la politique énergétique, la politique commerciale et la politique environnementale. Ils fournissent donc une base à la formulation d'une politique intégrée. Toutefois, l'état actuel de la recherche est un bien mauvais point de départ à cette fin. Le volume de la recherche est infime et la plupart des travaux touchent les moyens et les techniques de transport plutôt que les utilisations de celui-ci. La faiblesse de la recherche prend racine dans la pauvreté des données : même pour les pays industrialisés, les données ne sont pas très désagrégées.

On pourrait catégoriser la recherche sur les transports en deux types : la planification et la gestion des transports. Trois raisons expliqueraient les difficultés relatives à la gestion des réseaux de transport actuels.

- Les itinéraires de transport sont des monopoles naturels. Tant et aussi longtemps qu'une route demeure sous-utilisée, il est futile d'en construire une

Tableau 6. Intensité du transport dans le produit interieur brut (PIB), 1981.

Pays	Consommation d'énergie dans les transports (en milliers de tep[a]) [1]	PIB (en millions de $ US) [2]	Intensité du transport dans le PIB (en tep[a]/millions de $) [1/2]
Costa Rica	467	2 630	177,6
Tunisie	1 247	7 100	175,6
Argentine[b]	10 541	64 450	163,6
Équateur	2 186	13 430	162,8
Kenya	1 021	6 960	146,7
Sri Lanka	597	4 120	144,9
Trinité-et-Tobago	1 001	6 970	143,6
Venezuela	9 228	67 800	136,1
Panama[c]	473	3 490	135,5
Inde[b]	19 730	150 760	130,9
Colombie	4 255	32 970	129,1
Égypte[b]	3 375	26 400	127,8
Jamaïque	372	2 960	125,7
Pakistan	3 017	25 160	119,9
Zambie	398	3 430	116,0
Birmanie	669	5 770	115,9
Thaïlande	4 250	36 810	115,5
Mexique	25 260	238 960	105,7
Brésil[b]	25 318	248 470	101,9
Zaïre	540	5 380	100,4
Maroc	1 406	14 780	95,1
Pérou	2 154	23 260	92,6
Zimbabwe	537	6 010	89,4
Indonésie	7 251	84 960	85,0
Bolivie	661	7 900	83,7
République de Corée	5 495	65 750	83,6
Chili	2 523	32 860	76,8
Uruguay	669	9 790	68,3
Côte d'Ivoire	581	8 670	67,0
Algérie	2 611	41 830	62,4
Philippines	2 321	38 900	59,7
Guatemala	459	8 660	53,0
Arabie saoudite[b]	7 602	153 590	49,5
Libye	1 269	27 400	46,3
Nigéria	2 985	70 800	42,2
Malaisie	1 041	24 770	42,0
Bangladesh	431	11 910	36,2

Sources : Pour la consommation d'énergie : Agence internationale de l'énergie (1984). Pour PIB : Banque mondiale (1982b, 1983b, 1984).

[a] Tonne équivalent pétrole (tep) 10 Gcal 41,84 GJ.

[b] Chiffres de 1982.

[c] Chiffres de 1980.

autre. Par le temps où elle devient pleinement utilisée, les établissements divers installés le long de celle-ci empêcheront son élargissement ou la construction d'une route parallèle, la seule solution intéressante étant alors d'en restreindre l'accès.

- Les besoins en transport sont une fonction de l'établissement humain et des schémas de localisation des activités. Il est difficile de modifier la capacité d'une route et les schémas de localisation, à plus forte raison s'ils sont en discordance complète.
- Le matériel destiné aux usagers des transports nécessite des investissements considérables; si la densité de la circulation appelle un changement des

moyens de transport, il pourra s'avérer nécessaire de mettre au rebut les anciennes machines et d'investir de nouvelles sommes dans le projet.

Pour ces raisons, il est avantageux d'investir dans la recherche sur la planification des transports de manière à pouvoir éviter ou reporter les problèmes relatifs à la gestion de cette activité économique (Thomson 1983).

La planification des transports tient également compte des schémas nationaux de localisation et de la spécialisation régionale, de la conception et de la planification de nouvelles villes et enfin du choix des moyens de transport entre les villes et au sein de celles-ci (Meier 1974). Ces trois aspects comportent des répercussions sur le plan de l'énergie.

La planification des schémas nationaux de localisation vise en partie à minimiser l'intensité des transports et, de ce fait, l'apport d'énergie. Des villes à croissance non planifiée dans des pays en développement ont souvent atteint une taille qui restreignait le choix des sources d'énergie qu'elles pouvaient utiliser. Ainsi, l'approvisionnement de bois de feu ou de charbon de bois dans les grandes villes nécessiterait un déboisement continu de très vastes superficies, ou une dépendance à l'égard des combustibles liquides. Il faudrait prévoir la relation à long terme entre les villes et l'arrière-pays au moment de planifier la taille et l'emplacement des agglomérations urbaines. Les investissements requis dans les réseaux ferroviaires (y compris les voies ferrées et le matériel roulant) dépassent largement ceux des transports routiers, mais la capacité du réseau ferroviaire est également supérieure. D'où la justification économique des chemins de fer au-delà d'une certaine densité de circulation. À l'encontre du transport routier, le chemin de fer présente un choix considérable au niveau des combustibles et des techniques de traction. Par exemple, on peut économiser le pétrole en installant un réseau électrifié. Dans une situation donnée, le volume de la circulation limitera les possibilités de substitution entre les routes et le chemin de fer. À long terme, cependant, la planification des emplacements pourra permettre de concentrer le flot de la circulation entre un nombre restreint de points, justifiant ainsi l'installation d'un réseau ferroviaire (Banque interaméricaine de développement 1982; Alston 1984; Moavenzadeh et Geltner 1984).

Le transport interurbain est rarement engorgé mais lorsque cela se produit, c'est habituellement à cause de choix limités. Toutefois, les engorgements dans la circulation urbaine sont beaucoup plus fréquents. La capacité d'une route est fonction de sa largeur et de la vitesse moyenne de la circulation. Dans les pays en développement, les gens marchent davantage et recourent moins à un moyen de transport particulier. L'homme et l'animal servent également davantage au transport des biens et des personnes. Tous ces moyens de transport sont lents et accaparent une bonne partie des routes; du même coup, leur remplacement par un transport mécanisé serait une entreprise coûteuse qui pourrait avoir des effets néfastes sur l'emploi (Thomas 1981). Les pays en développement utilisent divers moyens bon marché de transport mécanisé qui réduisent également la capacité des routes de diverses manières : vitesses réduites, conduite dangereuse, pannes plus fréquentes, etc. (Ocampo 1982). Aussi, bon nombre de villes à ces endroits ont connu un ralentissement de la circulation, une diminution de la capacité et un engorgement des routes, alors que d'autres ont assisté à l'élimination de la circulation lente au détriment des populations à faible revenu.

Ces problèmes sont particuliers aux pays en développement et proviennent des caractéristiques de leur économie et de leurs transports; on doit donc les attaquer à l'étape de la planification. L'utilisation accrue des automobiles particulières a

amené les pays industrialisés à effectuer des recherches considérables sur la conception des villes (voir Buchanan et al. 1980); les nouvelles villes témoignent de ce fait et sont beaucoup moins congestionnées que les anciennes métropoles. Parallèlement, les métropoles qui ne pouvaient ni prévoir ni résoudre les problèmes naissants (p. ex., la migration des mieux-nantis vers les banlieues, la dépopulation et l'appauvrissement du centre des villes et l'augmentation de la circulation automobile) se sont gravement détériorées sur le plan social et environnemental. Les problèmes urbains des pays en développement sont différents mais ils mèneront à des conséquences aussi radicales s'ils ne sont pas solutionnés à temps.

À l'étape de la planification, il faut étudier les répercussions des caractéristiques particulières de la circulation dans les pays en développement. Par exemple, si la marche constitue un mode de transport courant, il faut prévoir plus d'espace pour les piétons sinon ils risquent d'empiéter sur les routes. Il est également avantageux d'aménager les lieux de travail à une distance raisonnable de marche du domicile des travailleurs. Ainsi, bien que les techniques d'urbanisme appliquées dans les pays en développement soient semblables à celles des pays industrialisés, les données servant à dresser les plans, de même que ceux-ci, seront très différentes.

Toutefois, on ne saurait résoudre tous les problèmes par la planification. Dans les villes existantes où les schémas de localisation et le flot de la circulation sont déjà établis, il faut gérer la circulation en tenant compte de la capacité des routes disponibles. Dans ce cas, deux solutions de base s'imposent. En premier lieu, on peut recourir à diverses techniques pour séparer la circulation et restreindre l'accès des routes afin de rationner la capacité de celles-ci (Organisation de coopération et de développement économiques 1973). Mais il existe aussi d'autres façons moins coercitives de gérer la circulation. Les administrations publiques possèdent au moins trois assiettes d'imposition dans le domaine des transports, notamment les combustibles, les véhicules et les routes; parmi celles-ci, on a très peu exploité la taxation des routes et le financement des autoroutes par l'intermédiaire de postes de péage (Yucel 1974). Quoi qu'il en soit, il est bon d'examiner globalement la tarification et l'imposition des trois — combustibles, véhicules et routes — par rapport à une circulation bien gérée.

En second lieu, on peut accroître la capacité de circulation par une substitution intermodale; les chemins de fer de banlieue (sur terre et sous terre) et les réseaux de transport rapide en commun constituent les principaux moyens utilisés. Lorsqu'on les introduit dans des villes existantes, leur mise en place coûte extrêmement cher pour plusieurs raisons : les réseaux de transport à grande vitesse destinés à départager efficacement la circulation exigent des coûts en capital élevés, le sol urbain est dispendieux et enfin la construction des systèmes doit perturber le moins possible les habitudes de vie et de travail des résidents. Leur coût d'investissement élevé justifie donc des études de rentabilité et de conception.

À cause de leur coût élevé, on peut rarement justifier un investissement dans ce type de réseau sur des motifs purement financiers et il faut alors compter sans cesse sur des subventions. Ces subventions peuvent se justifier lorsqu'on peut établir que la population à la périphérie des villes, donc celle qui utilisera le nouveau réseau sur un long trajet, est démunie. Essentiellement, cependant, les subventions accordées pour la construction de réseaux de transport rapide ne visent pas à venir en aide aux populations moins bien nanties mais bien à contribuer à la mise en place d'un transport suburbain sur longue distance. L'aménagement de telles installations de transport est également susceptible de créer sa propre demande en encourageant l'établissement d'une population dans la périphérie qu'elles desservent : ces réseaux façonnent les vastes conurbations autant qu'ils les servent. Si la planification

nationale ou régionale des schémas de localisation, prônée précédemment, permet d'éviter un investissement coûteux dans un réseau de transport rapide destiné à des villes surdéveloppées, sa valeur n'en sera que beaucoup plus grande.

Politique

On peut formuler les mesures à caractère énergétique à trois niveaux dans le secteur des transports : celles qui visent à réduire l'intensité du transport des activités économiques et sociales, celles qui visent à déplacer la circulation vers des formes de transport à plus grande efficacité énergétique, et enfin celles qui visent à accroître le rendement énergétique des véhicules, soit par une augmentation de leur taille soit par le remplacement du transport routier par le transport ferroviaire.

Intensité du transport

Comme on l'a fait observer ci-dessus, l'intensité du transport dans le produit intérieur brut affiche d'énormes différences d'un pays en développement à l'autre, laissant ainsi entendre qu'on pourrait le réduire d'autant dans bon nombre de pays. Mais on n'en connaît pas encore assez sur ses déterminants pour formuler des mesures vigoureuses. On peut présumer que les schémas de localisation, entre autres choses, déterminent l'intensité du transport mais on ne sait pas de quelle façon précise. Dans ce domaine, l'élaboration de mesures devra probablement attendre une recherche concluante à ce sujet.

Économies de la taille des véhicules

Ces dernières années, la hausse du prix du pétrole a suscité un intérêt marqué dans l'accroissement du rendement énergétique du transport par l'utilisation de plus gros véhicules. Dans le transport urbain, les véhicules plus gros consomment indéniablement moins de combustible. Outre ce fait, les autobus des réseaux publics sont nettement plus accessibles aux personnes défavorisées. Toutefois, les pays en développement, au fur et à mesure que les revenus augmentent, imitent les pays industrialisés en délaissant le transport en commun en faveur du transport privé, et les autobus au profit des véhicules particuliers. Ce phénomène élimine du transport en commun les passagers qui ont une plus grande capacité de payer et contribue à détériorer la viabilité financière du réseau. Dans les villes où le transport en commun a survécu et prospéré, on en a souvent attribué la cause aux inconvénients croissants de la conduite urbaine mais aussi, à l'occasion, au confort, à la ponctualité et au caractère pratique du moyen de transport en commun. Ainsi, sur une longue période, le fractionnement entre le transport privé et le transport en commun est moins le fait de l'évolution des prix que de la qualité du service. Cette situation permet plus que jamais de mettre en place pour longtemps des politiques de transport urbain plus affinées.

Les gros véhicules consomment sans doute moins d'énergie, mais les villes des pays en développement n'ont souvent que de petits autobus et d'autres moyens de transport en commun de moindre importance (Ocampo 1982). Il est clair que les coûts de l'énergie ne constituent pas un critère important dans le choix de la taille des véhicules; d'autres déterminants comme les besoins en capital, les caractéristiques de la circulation et la facilité de conduite doivent être pris en compte. L'efficacité énergétique tient également à des facteurs qui n'ont aucun rapport avec la taille des véhicules, par exemple l'état des routes, le niveau de congestion et la vitesse de la circulation. Il est donc important que les politiques orientées vers une

meilleure consommation de l'énergie ne se limitent pas à la taille des véhicules mais qu'elles prennent en compte l'ensemble des principaux facteurs.

Déplacement vers le transport ferroviaire

Deux raisons donnent plus d'attrait au transport ferroviaire qu'au transport routier : accroissement de l'efficacité énergétique et possibilité de délaisser les combustibles à base de pétrole au profit d'autres combustibles, surtout l'électricité. Toutefois, la question du fractionnement modal entre le transport routier et le transport ferroviaire est très complexe. Il est vrai que dans l'ensemble les réseaux ferroviaires nécessitent moins d'énergie par unité de transport, essentiellement à cause d'une friction moindre entre la voie ferrée et les véhicules qu'entre la route et le véhicule sur roues caoutchoutées. Cependant, cette diminution de friction signifie aussi qu'un véhicule sur rail aura besoin, à vitesse égale, d'une plus grande distance que le véhicule routier pour freiner (ou pour accélérer). Si un véhicule sur rail doit se déplacer sur un itinéraire congestionné parmi d'autres véhicules, comme le font les tramways, son avantage sur le plan de l'efficacité énergétique diminue. En gros, le transport ferroviaire a pu survivre lorsqu'il a pu grandement augmenter sa vitesse et couvrir des distances relativement longues sur des voies qui lui étaient réservées. En outre, le transport par rail nécessite une mise de fonds plus importante et une circulation à haute densité pour pouvoir concurrencer le transport routier. Ainsi, la répartition spatiale de la densité de la circulation détermine la limite de la concurrence entre le transport routier et le transport ferroviaire.

Dans la pratique, toutefois, la répartition rail-route de la circulation dépend également de leur étendue respective minimum. On peut élargir et améliorer les routes à mesure que la circulation s'accroît; de même, l'investissement dans les véhicules routiers nécessaires pour maintenir un service minimum est de loin inférieur à celui que l'on doit consacrer au matériel roulant ferroviaire. Ainsi, les installations de transport routier répondent à la demande lorsque la densité de circulation est faible et continuent de le faire à mesure que cette densité augmente. Passé un certain seuil, la densité justifie l'utilisation du chemin de fer, mais le réseau routier est déjà en place et son déplacement n'est plus rentable. Les principaux réseaux ferroviaires du monde ont tous été construits à une époque où le transport routier motorisé était à peu près inexistant. Depuis que le transport routier est devenu une activité bien établie, la plupart des lignes ferroviaires ont été construites là où la densité initiale de la circulation rendait le chemin de fer l'option la plus économique (p. ex., dans le transport des gros chargements de minerais entre les mines et les raffineries ou les ports) ou que la circulation était à ce point congestionnée que le transport routier ne pouvait plus suffire dans les limites physiques existantes (p. ex.,le navettage urbain).

Voilà pourquoi, si on laisse aux installations de transport le soin de répondre aux besoins de la circulation à mesure qu'ils surgiront, le transport routier accaparera probablement, sans justification économique et au détriment du transport ferroviaire, une part plus grande du marché. Pour développer un réseau ferroviaire viable dans un pays, il faut prévoir et planifier les principaux mouvements de la circulation pour quelques décennies à venir, et si l'on veut investir dans le chemin de fer au moment approprié pour répondre à la demande croissante, les prévisions devront se baser sur une recherche. Et même si l'on parvient à investir au bon moment dans le ferroviaire, son utilisation et, partant, sa viabilité reposeront sur trois facteurs critiques.

Ordonnancement de la circulation et communications sur les chemins de fer Étant donné que la circulation se déplace en chargements complets, il y a

toujours le risque que des wagons ne se trouvent pas à l'endroit où l'on en aurait besoin. Leur déplacement pour répondre à la demande nécessite l'utilisation d'une capacité de la voie qui peut devenir engorgée aux points de jonction. L'ordonnancement du matériel roulant et l'utilisation des voies ferrées entraînent donc des problèmes complexes de gestion.

Tarification Les chemins de fer étant considérés comme un service public, leurs tarifs sont souvent réglementés par l'État et les contrôles de la tarification servent à refinancer le transport de divers produits. Toutefois, lorsque les chemins de fer sont en concurrence avec le transport routier, ils sont susceptibles de perdre les marchandises hautement tarifées et, de là, les bénéfices qui leur servent à subventionner le trafic marchandise à bas tarif; c'est là une des raisons principales des pertes financières des chemins de fer. Il importe que la structure tarifaire des chemins de fer corresponde à leurs coûts réels; en outre, si les sociétés ferroviaires doivent continuer de subventionner le trafic marchandise ou le trafic passager, l'État devra les aider explicitement à cette fin.

Qualité du service L'avantage du transport routier réside dans la qualité de son service, sa vitesse et son caractère pratique. Il est rarement suffisant pour les chemins de fer d'offrir des tarifs réduits à l'égard de leurs marchandises ou de leurs passagers; ils doivent aussi offrir un service de qualité comparable. Pour ce faire, ils doivent être capables et désireux d'offrir à la fois le transport par rail et le transport auxiliaire par route qui est nécessaire pour acheminer les biens d'un endroit à un autre. Pour être viables, les sociétés ferroviaires doivent donc être exploitées comme une entreprise mixte rail-route dispensant un service intégré.

Les ménages

Dans les sociétés industrielles, le consommateur est à toutes fins pratiques toujours un acheteur. Il dispose d'un revenu monétaire qu'il peut consacrer à l'achat de biens de consommation. Beaucoup de consommateurs dans les pays en développement n'appartiennent pas à ce stéréotype : d'aucuns consomment les biens qu'ils auront produit eux-mêmes, d'autres les récoltent de terres cultivées en commun. Comme il n'y a aucun système d'analyse commun qui puisse s'appliquer à tous ces types de consommateurs, la recherche énergétique et les autres recherches doivent faire la distinction. Il est également nécessaire d'intégrer l'analyse de ces trois types pour se faire une idée de la demande intérieure globale.

Consommateurs–cueilleurs

Un grand nombre de consommateurs dans les pays en développement recueillent des combustibles sous diverses formes. Mais ce n'est pas la seule chose qu'ils collectent puisqu'il y a également l'eau et, souvent, la nourriture. Partout où ce genre de produit peut être recueilli dans la nature, la consommation peut dépasser les approvisionnements naturellement disponibles, c'est-à-dire la capacité de charge (Sahlins 1972; Odum et Odum 1976; Harris 1977). Même avant que cette capacité soit atteinte, la distance moyenne entre le domicile du consommateur et ses sources d'approvisionnement augmentera, tout comme le temps consacré à leur récolte. Plus souvent qu'autrement, c'est à la femme du ménage qu'incombera la tâche de recueillir le bois de feu et d'assumer les autres activités de survie (Reddy 1982; Tinker 1984). Le temps moyen de récolte du bois de feu a fait l'objet de bon

nombre de données et de chiffres au niveau local. L'examen de ces temps de récolte nous permet de conclure que les consommateurs–cueilleurs seraient dans une bien meilleure position s'ils devenaient des consommateurs–producteurs et commençaient à exploiter leur propre boisé. L'analyse paraît valable et conduit à la formulation d'une politique d'encouragement qui s'est toutefois révélée difficile à mettre en oeuvre.

À notre avis, ce domaine de la recherche illustre les dangers que comporte une étude excessivement restrictive dans laquelle les limites des systèmes comportent une définition trop rigoureuse. En effet, des études ont également révélé qu'une bonne partie de la demande de bois de feu provenait des villes. Au surplus, une forte proportion de l'énergie dans les régions rurales est consommée sous forme de brindilles et de branches mortes arrachées des arbres sans les abattre, alors que les villes consomment surtout des billes provenant d'arbres abattus (Reddy 1982; Reddy et Reddy 1983). Si tel est le cas, la responsabilité de l'épuisement du stock forestier incombe non pas au consommateur–cueilleur mais au cueilleur–vendeur : le système à établir ne se situe pas dans les villages mais bien dans le complexe rural-urbain. Les citadins utilisent presque invariablement d'autres combustibles de sorte qu'il faudrait inclure dans l'enquête non pas uniquement le bois de feu mais bien tous les combustibles concurrents. En outre, le bois en grumes destiné à la construction et au chauffage des logements constitue une proportion importante de la demande. Ici encore, il faut donc englober dans le système les matériaux de construction. En dernier lieu, la rareté relative du bois de feu varie d'un endroit à l'autre et révèle divers degrés et schémas de transition énergétiques. La recherche doit donc tenir compte des variations régionales. Si l'on s'attache à ces diverses perspectives, on étendra la portée et l'échelle des projets de recherche mais l'expérience qu'on en retirera sera plus enrichissante et les politiques de rechange, plus nombreuses : par exemple, les combustibles et matériaux de construction de remplacement seront plus nombreux de même que les techniques servant à les produire. Bien sûr, les coûts et les besoins de coordination augmenteront, mais l'un des arguments que nous avançons tout au long de ce rapport est qu'il faut adapter l'organisation aux besoins de la recherche, et non l'inverse.

Si une telle recherche globale nous permet de conclure que la population de consommateurs–cueilleurs impose un lourd tribut à la terre que l'on ne peut alléger en contrôlant un troisième facteur comme les matériaux de construction, il faudra alors songer à réduire la population ou à lui demander de modifier ses habitudes de manière à l'amener à exploiter son propre boisé ou à cuire ses aliments en consommant moins d'énergie. Cependant, il est peu probable que l'examen de toutes ces solutions de rechange pour l'ensemble des domaines connexes nous amènera à les considérer comme les seules ou les meilleures auxquelles nous pourrons recourir.

Consommateurs–producteurs

Les consommateurs–producteurs sont aussi appelés producteurs de subsistance. À l'instar des consommateurs–cueilleurs, ils n'achètent ni ne vendent et, en ce sens, il y a très peu d'occasions d'influencer leur comportement. Ni l'un ni l'autre ne peuvent faire l'objet d'une analyse de la demande du genre que les pays développés utilisent à l'endroit de leurs consommateurs–acheteurs. Comme il n'existe pas de formulation théorique plus appropriée, les chercheurs recueillent et décrivent une masse de données sans toutefois progresser dans la connaissance du phénomène (voir cependant Bliss et Stern 1978; Sen 1981).

Les tentatives mises de l'avant pour formuler des politiques à l'endroit des consommateurs–producteurs (et des consommateurs–cueilleurs), par exemple, la promotion de l'agroforesterie ou du biogaz, ont aussi tardé à produire des résultats. À notre avis, cette situation s'explique par une mauvaise interprétation du comportement de ce genre de consommateurs — c'est-à-dire de leurs objectifs dans la vie et au travail et de la répartition de leurs ressources.

Le travail est au centre de leurs ressources. Malheureusement, les économistes, anthropologues et physiologistes ont adopté des concepts fort différents du travail ou de la main-d'oeuvre dont aucun ne s'est révélé vraiment utile (voir la section sur l'énergie humaine au chapitre 11). Pendant ce temps, on effectuait beaucoup de recherche empirique sans toutefois faire avancer les connaissances de façon correspondante. Il faudra donc attendre de nouvelles théories dans ce domaine avant de pouvoir interpréter de façon valable la recherche empirique.

Consommateurs–acheteurs

Outre qu'il soit courant dans les économies développées, ce genre de consommateur est celui qui a inspiré l'analyse normalisée de la demande (que l'on a mentionnée à la section sur la demande locale). Ce genre d'analyse peut également s'appliquer aux consommateurs–acheteurs des économies en développement, mais avec des critères de base et des relations implicites souvent très différents. Elle peut servir tout particulièrement pour analyser l'effet des fluctuations de prix, de taxes ou de subventions sur les consommateurs à différents niveaux de revenu et, de ce fait, sur la répartition globale des revenus.

Toutefois, si les consommateurs représentent à la fois des cueilleurs, des producteurs et des acheteurs, comme il arrive souvent dans le cas des combustibles consommés dans les régions rurales, le problème prend une tournure beaucoup plus complexe, mais on ne peut encore s'y attaquer faute d'outils théoriques adéquats.

Cuisson

Ce domaine de la consommation des ménages est celui qui a suscité le plus grand nombre de recherches, mais la masse de chiffres à notre disposition ne permet pas de tirer beaucoup de conclusions valables. La plupart des études mesurent simplement la consommation totale des combustibles utilisés pour la cuisson et, en conséquence, délaissent deux aspects possiblement fort importants. En premier lieu, la cuisson suppose toujours une consommation de boissons et d'aliments; il doit donc y avoir une relation entre la quantité d'aliments cuits et de combustible utilisé (Reddy 1982). Si, comme les études sur les aliments le révèlent, la consommation alimentaire chez le riche et le pauvre peut varier selon un facteur s'échelonnant entre 1,5 et 3 dans les pays en développement, elle peut avoir un effet considérable sur la consommation de combustible. Pourtant, les chiffres à cet égard ne révèlent pas d'écarts tellement marqués (Leach 1985), ce qui laisse supposer une fluctuation probable du rendement énergétique des combustibles. En second lieu, des données restreintes mais fort révélatrices nous indiquent que les gros ménages consomment moins de combustible par habitant (Bialy 1979; Natarajan 1985). La cuisson est un processus d'échange de chaleur et il est logique de croire que la consommation de combustible diminue à mesure qu'augmentent les quantités. Il se peut également que la consommation d'aliments des gros ménages entraîne moins de gaspillage et, partant, des économies d'échelle.

Dans l'ensemble, la plupart des recherches énergétiques ne sont pas allées assez loin et n'ont donc pas examiné les véritables facteurs déterminants de la consommation de combustible. La recherche s'est plutôt confinée aux variables extérieures comme le revenu et le prix. Une recherche superficielle ne peut qu'entraîner des conclusions superficielles. On trouve la même situation dans le cas de la recherche sur la consommation alimentaire, qui a donné une multitude de chiffres sans toutefois jeter plus de lumière sur la question.

Éclairage

L'éclairage est un secteur de la consommation affichant une forte élasticité-revenu de la demande dans les tranches inférieures de revenu. Les ménages les plus défavorisés et ceux qui ne peuvent s'alimenter en kérosène ou en électricité se passent donc d'éclairage. Parmi ceux qui peuvent s'approvisionner en combustible, on constate que la qualité de l'éclairage varie selon le revenu. Il y a beaucoup de modèles de lampes au kérosène donnant chacun un éclairage différent et une consommation horaire différente. Les modèles de lumière électrique sont moins nombreux mais l'intensité et la qualité de l'éclairage fluctuent selon le revenu. On peut se procurer divers modèles de lumière électrique dont l'efficacité énergétique peut varier selon un facteur jusqu'à 4 des modèles les moins efficaces; si les lumières à haut rendement énergétique ne sont pas utilisées plus largement, c'est à cause de leur coût initial supérieur. Mais lorsqu'elles sont utilisées, il y aurait lieu d'adopter des mécanismes de remboursement de la taxe afin d'accroître l'efficacité énergétique de l'éclairage; il faudra cependant que de tels mécanismes reposent sur des recherches particulières à un endroit ou à un pays. Toutefois, outre les coûts, ce sont les différences de qualité perçues par le consommateur qui influencent également l'achat de lumières à haute efficacité énergétique. La recherche pourrait favoriser un meilleur équilibre entre la gamme des produits disponibles et les préférences des utilisateurs.

Appareils électriques

L'électricité est essentielle au fonctionnement de la plupart des appareils domestiques d'usage courant. Lorsque l'alimentation en électricité est disponible, le consommateur peut s'offrir une large gamme d'appareils dont le prix d'achat et les coûts de fonctionnement varient considérablement de l'un à l'autre.

Selon leur coût initial, différents appareils afficheront une courbe différente de pénétration du marché d'après le niveau de revenu du consommateur. L'achat d'appareils bon marché comme des fers à repasser, des radiateurs, des appareils radio et des ventilateurs s'observe chez des consommateurs jouissant d'un revenu assez bas alors que les consommateurs bénéficiant d'un revenu beaucoup plus élevé auront tendance à se procurer des appareils plus coûteux comme des climatiseurs (Brooks 1984). On doit analyser la demande de biens durables de consommation en termes de modèles d'ajustement des stocks puisque les modèles simples prix-revenus ne conviennent pas à cette fin. La demande d'énergie pour faire fonctionner les appareils est une demande dérivée qui dépend de leur consommation horaire, leur intensité d'utilisation et leur nombre en stock. Son analyse nécessite en outre des enquêtes sur le terrain et des modèles d'une complexité correspondante pour obtenir des données à leur égard.

La demande d'énergie des climatiseurs représente déjà une partie importante de la demande globale et cause de graves problèmes de pointe dans certains pays

d'Afrique. La demande provenant des appareils de refroidissement — ventilateurs, refroidisseurs, climatiseurs et réfrigérateurs — peut être importante dans d'autres pays tropicaux en développement; de toute évidence, les pointes journalières pendant la saison estivale causent des problèmes à un grand nombre d'entre eux. Il y a maintes solutions à ces problèmes — ajustement de la température des maisons, tarification de l'électricité selon l'heure d'utilisation et amélioration de l'efficacité énergétique des appareils électriques. Tout ce domaine n'a suscité que très peu de recherche.

Ménages ruraux

La demande de combustibles de cuisson et de chauffage est la seule composante de la demande d'énergie dans les régions rurales qui ait vraiment été examinée jusqu'ici maintenant (Howes 1985). La demande est une variable liée au comportement et son analyse doit reposer sur une théorie du comportement humain. Il y a bien une théorie acceptée de la demande selon laquelle tout le revenu du consommateur est monétaire, mais celle-ci ne convient pas aux ménages ruraux des pays en développement.

En effet, ces ménages ruraux tirent un revenu partiel en nature sous la forme des biens qu'ils récoltent, les combustibles pouvant en constituer une partie importante. Du fait que les biens récoltés sont gratuits (mais pas nécessairement en abondance), les ménages n'ont pas à calculer le coût des ressources. Par contre, ils doivent tenir compte de la quantité de la main-d'oeuvre qu'ils y consacrent. Les coûts de main-d'oeuvre perçus sont liés de façon non proportionnelle à la quantité de biens recueillis et à la distance sur laquelle ils sont transportés et occupent une place très importante au-delà d'un certain point. Il n'est pas possible d'évaluer la main-d'oeuvre engagée dans la cueillette au taux de salaire en vigueur puisqu'il n'est pas toujours disponible. Les occasions inégales d'emploi offertes aux hommes et aux femmes influent également sur les solutions de rechange et sont liées au rôle prépondérant de la femme dans le processus de cueillette. Dans le cas contraire, ou lorsque les revenus monétaires dans les régions rurales augmentent comme on l'a observé en Égypte ou en République de Corée, la population rurale abandonne facilement sa cueillette de combustible. Il est donc nécessaire d'explorer la relation qui existe entre le combustible recueilli (et d'autres biens récoltés) et les coûts de main-d'oeuvre associés à cette activité.

On a évalué les coûts de main-d'oeuvre en termes de temps de travail, mais à cause de la raison précédemment citée, les coûts de main-d'oeuvre perçus pourront ne pas être proportionnels à la durée du travail. Les estimations «élevées» du temps consacré par la main-d'oeuvre à la cueillette de combustible expliquent au moins en partie les efforts de recherche que l'on a déployés pour la production accrue de bois de feu et pour l'amélioration des poêles à bois. Toutefois, la valeur qu'une population donne à ce genre d'innovation dépend des coûts de main-d'oeuvre perçus et non de la durée du travail. Une population ne songera à économiser le temps de travail que s'il y a un manque à cet égard; celui qui dispose de beaucoup de temps de travail ou qui ne l'utilise que pour des activités de faible valeur devra chercher à savoir à quelles fins il pourra l'employer le mieux.

Cependant, à la lumière des recherches effectuées sur la production accrue de bois de feu et sur les poêles à bois, on peut se poser une question différente : à quelle fin cette recherche pourrait-elle servir ? La réponse? Là où ce genre d'activité est commercialisé : notamment, lorsque la vente de bois de feu est une activité

rurale établie et lorsque les poêles à bois servent à cuire des aliments destinés à la vente. Dès qu'il y a une utilisation commerciale reconnue, il est plus facile d'en assurer la diffusion.

Outre les combustibles recueillis, les ménages ruraux consomment également des combustibles cultivés ou produits sur la ferme sous forme de résidus de cultures et de résidus animaux. La documentation mentionne très peu de cultures énergétiques (p. ex., Pathak et al. 1980), mais ce sont en grande partie les résidus de cultures servant à d'autres fins que l'on brûle. Les résidus de certaines cultures vivrières devraient normalement fournir assez d'énergie pour cuire la partie comestible avec une efficacité énergétique assez faible de l'ordre de 10 % à 20 % (Desai 1985). Les ménages agricoles ont cependant coutume d'acheter ou de recueillir des combustibles ligneux à cause de leur meilleure qualité.

Dans le cas des ménages agricoles, on constate une inexplicité des modèles de comportement sur lesquels reposent les études de la consommation de combustibles. Les agriculteurs ne commercialisent pas tous leurs produits au même niveau. Les agriculteurs non commerciaux ou de subsistance utilisent l'agriculture pour transformer leur travail en biens et services, tout comme le font les cueilleurs de combustible, et le modèle qui s'appliquerait à ces deux types serait un modèle de répartition des flux de main-d'oeuvre. Par contre, les agriculteurs commerciaux qui exploitent des entreprises de rapport illustrent mieux les théories concernant l'entreprise ou la ferme. La plupart des agriculteurs des pays en développement se situent entre ces deux types et posent des problèmes conceptuels non résolus.

Les cueilleurs et producteurs obtiennent tous deux la biomasse combustible à partir de la végétation, mais leurs méthodes ont suscité des problèmes théoriques basés, comme nous le verrons à la première section du chapitre 12, sur des modèles simples. Ces problèmes ne sont pas nécessairement mal posés mais il importe de mieux préciser l'état de dégradation de l'environnement et de procéder à des observations plus directes de sa relation avec la demande de combustible. De cette manière, les études de la consommation de combustible doivent être intégrées à celles de l'environnement.

Qui plus est, si l'utilisation de la biomasse à des fins énergétiques dégrade l'environnement, les cueilleurs de combustible devront consacrer plus de temps à leur activité et les rendements des producteurs diminueront. Les études doivent être conçues pour tenir compte de ces effets : en d'autres mots, elles doivent s'étendre sur des périodes suffisamment longues ou englober des variations spatiales afin de simuler les transitions.

En dernier lieu, il faudrait pousser la recherche afin de mieux comprendre la portée du phénomène d'électrification des régions rurales et son effet sur les conditions de vie, la productivité, la modernisation et le développement du milieu rural (Munasinghe 1986).

Ainsi, pour favoriser l'émergence de théories plus valables, il importe d'intégrer et de mettre à l'épreuve les modèles que les chercheurs empruntent aux disciplines mères de l'économique, de l'anthropologie et de l'agriculture afin de les appliquer à l'étude de la consommation de combustible en milieu rural.

Ménages urbains

À plusieurs égards, il est plus facile d'analyser la consommation d'énergie des ménages urbains. En premier lieu, ces ménages achètent l'énergie. Leur concentration géographique les empêche de tirer leur combustible de cuisson de la biomasse

locale et explique pourquoi ils doivent l'acheter à l'extérieur. En deuxième lieu, ce sont d'importants consommateurs d'énergie pour l'éclairage et les appareils électriques. Ce double aspect les fait davantage ressembler à des consommateurs de pays industrialisés et les modèles mis au point dans ces pays pour analyser la demande d'énergie des ménages urbains peuvent alors s'appliquer à eux avec moins de risque d'erreur.

La concentration de la demande de combustible dans les agglomérations urbaines exige que ces combustibles soient transportés en grande quantité de l'extérieur. C'est-à-dire le pétrole ou le charbon dans les pays qui les produisent ou qui peuvent les importer, mais dans d'autres qui sont trop pauvres, trop éloignés ou à court de devises étrangères, il s'agit de charbon de bois et de bois de feu. La consommation de ces deux combustibles entraîne le déboisement autour des villes sur des circonférences de plus en plus grandes. Vu que les résidus animaux et agricoles remplacent le bois dans les régions rurales qui en manquent, la faible densité énergétique et, partant, les coûts de transport élevés de ces produits de substitution les rendent non concurrentiels avec le bois dans les villes, même aux prix élevés pratiqués à l'égard du bois de feu. Lorsque ces produits sont concurrentiels, le faible coût des foyers améliorés en comparaison des poêles à gaz ou au kérosène pourrait quand même amener le consommateur moins nanti à recourir au bois (voir Reddy et Reddy 1983; Alam et al. 1985).

La hausse des prix du bois de feu est à la base des plantations énergétiques dans certaines régions. Mais il y a des villes, surtout dans les régions arides de l'Afrique, où la culture commerciale des arbres a bien peu évolué malgré les coûts élevés du bois de feu. On s'explique mal les raisons mais deux facteurs semblent ressortir : en premier lieu, la région aride de l'Afrique est également celle qui importe le plus d'aliments ou qui connaît les plus fortes pénuries d'aliments, ou les deux. En théorie, un agriculteur commercial qui vend sa production à la ville cultivera des aliments, produira un combustible ou toute autre culture plus rémunératrice. Si ce choix à la ferme n'augmente pas les ressources urbaines en combustible, c'est peut-être que les villes ont dépassé la capacité de leur base agricole d'approvisionnement. Comme nous l'avons indiqué plus tôt à la section intitulée «Mesures axées sur la demande», les régions arides et sub-équatoriales de l'Afrique ont le plus bas niveau de productivité agricole par travailleur dans le monde; leur agriculture est donc capable de soutenir un nombre infime de personnes en dehors de la ferme. La capacité de ces pays a diminué encore plus lors du changement pour les cultures de rente dans les années 50 et 60, au moment où les pays industrialisés en avaient grand besoin. Les villes se sont donc développées autour des industries d'exportation et les exportations ont servi à payer, entre autres, les aliments importés. Comme le ralentissement de la croissance des pays industrialisés a fait fléchir la demande d'exportations, il est devenu nécessaire de réduire la dépendance à l'égard des exportations, de créer un marché intérieur ainsi qu'une base de ressources avant de pouvoir songer à une reprise de la croissance. Il s'agit donc d'une crise économique générale et non pas simplement d'une crise du combustible. En deuxième lieu, les régions tropicales arides ont un climat peu propice aux plantations forestières, la végétation naturelle étant composée de graminées annuelles et d'arbustes. Dès que les forêts naturelles sont détruites, il est difficile et coûteux de les remplacer. Quelques pays de l'Asie de l'Ouest et de l'Afrique du Nord connaissent aussi ce problème mais ont la chance d'avoir des gisements de pétrole qui est devenu leur principal combustible national.

Ainsi, en ce qui concerne les ménages urbains et ruraux, une formulation étroite en matière de consommation de combustible peut conduire à des conclusions

erronées, et il serait alors utile d'intégrer l'utilisation des combustibles dans le contexte plus général de l'économie et des ressources.

Politique

Nous avons distingué précédemment trois types de consommateurs domestiques — ceux qui récoltent le combustible, ceux qui le produisent et ceux qui l'achètent. On a également signalé que ceux qui collectent le combustible ne cueillaient pas nécessairement tous les autres biens de subsistance. Du point de vue politique, il est plus sensé de catégoriser les gens sur la base de leur activité de cueillette, de production ou d'achat d'aliments — c'est-à-dire de distinguer entre les nomades, les populations sédentaires rurales et les consommateurs urbains.

Il est presque impossible d'appliquer des politiques efficaces aux peuples nomades. Les seules mesures d'application facile sont celles qui restreignent, réglementent ou influencent leur migration. Les mesures visant à établir les nomades dans des villages permanents ou à empêcher les populations humaines de vivre dans les réserves forestières, par exemple, ne sont pas rares, mais elles n'ont pas pour objectif principal de solutionner des problèmes énergétiques; de fait, elles s'en éloignent largement. Toutefois, les restrictions imposées à la cueillette du bois de feu — et, en pratique, à tous les types de bois — peuvent constituer un aspect important d'une politique de lutte contre le déboisement.

Il est plus facile de formuler des politiques à l'égard des populations établies, et surtout celles à vocation agricole. La taxation des produits agricoles représente l'un des points d'appui des finances publiques dans beaucoup de pays en développement. Même les économies agricoles non monétisées peuvent recourir à des taxes ou à des subventions en nature. Toutefois, les taxes ou les subventions visant à influencer la production ou la consommation de combustible ou à stimuler une substitution par d'autres combustibles dans les régions rurales ne sont pas habituelles, exception faite des subventions destinées à l'électrification des régions rurales.

Par contre, on voit très souvent des mesures fiscales adoptées en vue d'influencer la demande urbaine de combustibles. Toutefois, elles ne s'attachent pas aux ménages comme tels mais bien aux combustibles que ces derniers achètent, ou aux appareils dans lesquels on les utilise. Pour cette raison, nous les abordons dans le chapitre qui suit.

Chapitre 5 Économie d'énergie

On peut aborder sous trois grands aspects la question de l'économie d'énergie : l'amélioration des procédés, l'investissement dans l'économie d'énergie et l'amélioration de l'efficacité du matériel utilisateur d'énergie. Cette dernière approche convient plus particulièrement aux pays en développement. On peut améliorer la conception du matériel en cours de production ; mais plus important encore, on peut étudier les stocks du matériel en usage et améliorer leur mode de fonctionnement afin d'accroître le rendement énergétique. Le présent chapitre illustre quelques moyens d'y parvenir avec certains types communs de matériel.

La mise en place d'un entraînement hydraulique ou d'un entraînement à fréquence variable peut grandement accroître l'efficacité énergétique d'un moteur. Pour être économique, l'entraînement hydraulique doit être installé partout dans une usine et s'accompagner d'une révision technique des machines. Les entraînements à fréquence variable nécessitent des composantes micro-électroniques pour donner un bon rendement.

La taille et l'importance des fabricants de véhicules dans les pays industrialisés ont donné lieu à des recherches intensives sur les moteurs à combustion interne ; un grand nombre de conceptions innovatrices sont en cours de préparation ou de développement. L'utilisation de véhicules à deux roues prend de l'ampleur dans les pays en développement et quelques-uns d'entre eux en ont produit suffisamment pour justifier une recherche visant à améliorer les moteurs destinés à ce genre de véhicule.

La recherche sur les moteurs à cycle Brayton dans les pays industrialisés s'attache à leurs utilisations sur des véhicules. Les pays en développement qui fabriquent des turbines à gaz pourraient tirer profit d'un examen plus approfondi de ces moteurs.

La recherche sur les chaudières conventionnelles visera probablement à accroître leur taux de chaleur en y incorporant des outils d'analyse et des systèmes de surveillance en direct. Parmi les chaudières à lit fluidisé, les chaudières à circulation d'eau offrent les meilleures perspectives. Le nombre considérable de chaudières les rend particulièrement appropriées aux études des diagnostics et aux programmes de remplacement.

La popularité des nouveaux poêles de cuisson à combustible solide a souffert quelque peu en raison de l'importance surfaite dans les pays en développement de la pénurie des combustibles solides et de l'inefficacité des poêles traditionnels ; on a donc négligé l'étude des marchés potentiels pour les nouveaux poêles. Il importe d'effectuer une recherche pour connaître les secteurs qui perçoivent le combustible comme étant d'un coût élevé ainsi que la valeur qu'accordent les consommateurs à diverses améliorations apportées aux poêles, notamment une meilleure efficacité énergétique.

Nous avons discuté, dans la section traitant des politiques industrielles, de la méthode prédominante d'économie d'énergie dans l'industrie. Toutefois, les occasions d'économie d'énergie ne sont pas confinées à l'industrie. Il serait avantageux d'explorer des méthodes plus générales à cet égard, dont trois peuvent être mises en évidence.

Amélioration des procédés L'étude scientifique des procédés utilisateurs d'énergie (énergivores) peut amener des économies d'énergie importantes. Les études industrielles de ce genre ne sont pas rares (voir Moles 1984), contrairement aux études fondamentales des procédés énergivores applicables à une vaste gamme d'activités économiques. La recherche sur les problèmes de combustion est probablement la plus populaire à cause de l'utilisation du procédé dans diverses opérations industrielles (Smoot et Hill 1983), mais même dans ce secteur intensif de recherche, la théorie et la pratique laissent entrevoir un écart important (Weinberg 1975). Pour promouvoir et appliquer la recherche sur les procédés, il faut d'abord que les établissements de recherche indépendants possèdent une équipe forte sur le plan de la recherche fondamentale et, en second lieu, que les établissements et les industries entretiennent des relations fécondes entre eux. Le gouvernement pourrait promouvoir ces deux aspects par une aide financière et d'autres stimulants.

Investissement dans l'économie d'énergie Il pourrait s'agir ici d'un investissement progressif dans les techniques d'isolation et de récupération de la chaleur jusqu'à la construction de grandes usines utilisant des techniques d'économie d'énergie. Les techniques d'isolation et de récupération de la chaleur sont bien connues et normalisées et ne nécessitent pas qu'on s'y attarde. Mais les pouvoirs publics pourraient favoriser leur application en signalant les occasions dans les diverses industries ou en versant des subventions pour l'achat d'équipement et de matériaux à haut rendement énergétique. Les économies d'énergie dans les nouvelles usines font toutefois partie des innovations industrielles et nécessitent une équipe de recherche sur place.

Accroissement d'efficacité de l'équipement énergétique Cette approche relativement nouvelle offre des perspectives considérables dans les pays en développement. La fabrication de matériel de production d'énergie est encore fortement concentrée dans les pays industrialisés, notamment pour l'exploitation minière, la production de pétrole et les usines centrales électriques, et possiblement pour l'équipement solaire et éolien. Cette spécialisation des pays industrialisés continuera encore quelque temps. En revanche, les pays en développement utilisent en très grande quantité toutes sortes d'équipements et les plus gros d'entre eux en fabriquent quelques-uns, comme des moteurs électriques, des moteurs à essence et des piles. En conséquence, une stratégie axée sur l'équipement énergétique pourrait amener des économies d'énergie importantes, mais elle devra aborder de façon différente les équipements existants et nouveaux. En effet, on peut examiner le matériel existant afin d'en obtenir un meilleur rendement énergétique, que ce soit par une amélioration des pratiques opérationnelles ou par une modernisation, comme le remplacement des soupapes et une isolation accrue. Dès que l'on connaît les principales mesures d'économie d'énergie, on peut chercher à les appliquer par des moyens persuasifs, comme une campagne d'information, ou coercitifs, par exemple, en établissant des normes minimales de rendement. Dans ce dernier cas, les mesures donnent de meilleurs résultats en ce qui concerne l'équipement neuf. On peut aussi promouvoir la recherche afin de mettre au point un nouvel équipement offrant de meilleures possibilités d'efficacité énergétique. Le stratège attachera beaucoup d'importance aux orientations de cette recherche. Nous en indiquons ci-dessous quelques-unes pour certains appareils.

Les moteurs électriques

Les moteurs électriques sont les principaux dispositifs utilisés pour transformer de l'électricité en énergie motrice. On les emploie largement à cette fin dans tous les secteurs, sauf pour le transport routier et le transport maritime, où la portabilité et la haute teneur en énergie des combustibles liquides font prédominer les moteurs à combustion interne. Dans les usages stationnaires, le faible coût, la haute efficacité énergétique et la multitude de tailles des moteurs électriques leur donnent l'avantage sur les moteurs à combustion interne. En 1984, on a estimé que les moteurs figuraient pour 67 % de toute l'électricité consommée et pour 35 % de l'énergie primaire utilisée au États-Unis (Baldwin 1986). Bien que l'on ne dispose pas de chiffres comparables pour les pays en développement, la consommation d'électricité des moteurs serait au moins aussi importante dans les pays où l'industrie consomme une forte proportion de l'électricité; en outre, un certain nombre de pays d'Asie utilisent l'électricité de manière extensive pour le pompage de l'eau aux fins de l'irrigation.

L'efficacité énergétique des opérations effectuées à l'aide de moteurs électriques repose sur deux facteurs, notamment l'efficacité du moteur lui-même et la proportion utilisée du travail qu'il exécute. Bien que la technologie des moteurs soit bien établie, on a pu, au cours des années 70, grâce à la conception assistée par ordinateur, modéliser les modifications conceptuelles pour connaître leurs répercussions sur l'efficacité des moteurs au lieu d'avoir à les calculer à partir de prototypes; en conséquence, les améliorations techniques se sont accélérées. Des innovations comme les conducteurs en cuivre de grand diamètre et les nouveaux matériaux magnétiques ont également contribué à l'accroissement de l'efficacité (Baldwin 1986). Cependant, si l'on remplaçait le stock actuel de moteurs par des modèles à haut rendement énergétique, l'économie d'énergie maximum que l'on pourrait en retirer a été estimée à 2,4 % en 1977 pour les États-Unis (Département de l'Énergie des États-Unis 1980). L'écart d'efficacité entre les moteurs en stock et les modèles optimaux est probablement supérieur pour les pays en développement et doit être examiné sur place. Toutefois, l'observation générale dans les pays industrialisés selon laquelle les pertes d'énergie sont beaucoup plus importantes entre le moteur et le travail exécuté qu'au sein du moteur lui-même est susceptible d'être également valide pour les pays en développement.

Les pertes d'énergie dans le travail motorisé viennent du fait que la vitesse d'un moteur est déterminée par son nombre de pôles et par la fréquence de l'électricité qui l'alimente. Pour faire varier la vitesse du moteur, on utilise des régulateurs comme des engrenages, des soupapes et des étrangleurs, où se produisent la plupart des pertes d'énergie (Ladomatos et al. 1978). On peut réduire ces pertes de trois façons.

Moteurs à courant continu On peut faire varier la vitesse d'un moteur à courant continu (C.C.) par un simple régulateur de tension, dispositif assez peu coûteux. Toutefois, les moteurs à C.C. sont encombrants et dispendieux et ne conviennent pas toujours aux usages industriels. Le moteur le plus courant est le moteur d'induction à courant alternatif à cage d'écureuil — bon marché, simple et fiable. On ne peut cependant régler facilement sa vitesse comme avec le moteur à C.C. (Ben Daniel et David 1979).

Conversion à un entraînement hydraulique Les moteurs hydrauliques peuvent également fournir une gamme étendue de vitesses et de couples. On peut recourir à cette flexibilité pour éliminer les boîtes de vitesses sur les machines-

outils et pour fabriquer des outils plus simples et moins coûteux. Une usine renfermant un grand nombre de machines-outils permettra des économies appréciables à la condition d'être entièrement alimentée à l'énergie hydraulique. Dans une simulation informatique d'une conversion de ce genre, on a constaté que l'efficacité énergétique de l'usine passerait de 54 % à 68 % (Ladomatos et al. 1979).

Entraînement à fréquence variable Ce genre d'entraînement renferme habituellement deux dispositifs en tandem ou en combinaison : un redresseur servant à transformer le courant alternatif en courant continu, et un inverseur pour fournir une tension triphasée ajustable au moteur. Ces deux dispositifs ont été mis au point dans l'industrie des fibres synthétiques qui nécessite des entraînements de vitesse précis et synchronisés pour chaque moteur lors de l'extrusion de la fibre. Cette industrie utilise largement des entraînements à moteurs multiples. Les entraînements à fréquence variable ont été plus lents à apparaître dans les autres industries à cause de leur coût élevé et d'une demande inexistante. Ces dernières années, toutefois, la mise au point de dispositifs à semi-conducteurs de grande puissance a contribué à leur adoption rapide aux États-Unis; ils devraient gagner les pays en développement à cause de leurs avantages économiques marqués (Baldwin 1986).

De ces trois méthodes, les deux dernières sont prometteuses pour les pays en développement. La conversion à l'énergie hydraulique n'est avantageuse que pour des usines complètes, et même là, uniquement pour certaines d'entre elles (p. ex., une usine de machines-outils). Cependant, il convient d'examiner les débouchés de l'énergie hydraulique dans les pays en développement. Les entraînements à fréquence variable ont plus de potentiel mais nécessitent l'application de la microélectronique. Tout pays qui chercherait à renforcer son industrie de la microélectricité ferait un pas important vers l'économie d'énergie en concevant et en mettant au point des entraînements à fréquence variable.

Les moteurs à combustion interne

Un moteur à combustion est avant tout une machine servant à convertir en puissance mécanique et en mouvement une forme d'énergie quelconque. Les moteurs qui transforment en puissance mécanique et en mouvement une énergie thermique s'appellent des machines thermiques. Celles-ci comprennent les moteurs à combustion interne (MCI) et les moteurs à combustion externe, selon que la source de combustion est à l'intérieur ou à l'extérieur du moteur. Si la source est à l'extérieur, il faut alors recourir à des échangeurs de chaleur entre la source et l'endroit de dissipation.

Aujourd'hui, l'activité de R&D dans les MCI semble s'orienter surtout vers les trois domaines suivants : réduire au minimum les émissions de polluants; accroître au maximum l'efficacité des moteurs; et maximiser la tolérance des moteurs aux différents combustibles et exercer un plus grand contrôle sur le processus de combustion (Maly 1983). Ces priorités de recherche qui surviennent après la crise de l'énergie ont ceci de particulier qu'elles visent une optimisation totale alors que les travaux précédents sur les MCI cherchaient à améliorer des sous-systèmes isolés; par exemple, commande de l'allumage, suralimentation, produits antidétonants.

La combustion programmée est sans doute le secteur de la recherche le plus prometteur des moteurs à combustion interne. En améliorant l'efficacité globale de la combustion, il faut s'efforcer de rechercher les conditions optimales d'allumage par opposition à celles qui favorisent une propagation de la flamme; on peut y arriver en programmant la combustion de manière à optimiser la turbulence et le débit dans le cylindre. Les deux méthodes pour y arriver consistent en une commande exclusivement électrique ou un allumage par étages. Les tentatives visant à contrôler la combustion ont mené à la création des moteurs à combustion interne suivants.

- *Moteurs diesel à chambre divisée et à aspiration naturelle,* destinés aux véhicules à faible rendement (la plupart des moteurs pour ces véhicules sont de ce type à l'heure actuelle).
- *Moteurs Otto à chambre divisée et et à charge stratifiée* (applications limitées seulement).
- *Moteurs rotatifs Otto à charge uniforme.* Les premiers moteurs donnaient beaucoup de mal à cause de fuites dans la chambre à combustion, d'émissions d'hydrocarbures élevées et de ratés excessifs du moteur au ralenti, amenant une conduite de piètre qualité et une faible économie d'essence. Ces moteurs ont été installés uniquement dans les voitures Mazda.
- *Suralimentation* des moteurs à essence et diesel. La suralimentation donne une meilleure consommation d'essence avec les moteurs diesel que les moteurs à essence, mais dans les deux cas, elle réduit les émissions de carbone et d'hydrocarbures en deçà du taux relatif aux moteurs à aspiration naturelle. Toutefois, les émissions d'oxydes d'azote sont supérieures (Dowdy 1983).

Parmi les moteurs perfectionnés encore à l'étape de la recherche, mentionnons.

- *Moteurs Otto à charge stratifiée et à chambre ouverte.* Les deux principaux programmes de R&D dans ce domaine sont : le système de combustion contrôlée de Texaco, qui utilise non seulement les mélanges pauvres air-carburant mais aussi une variété d'essences étant donné qu'il n'est pas affecté par les propriétés des combustibles; et le moteur à combustion programmée de Ford qui augmente la puissance mais rend le moteur plus sensible aux propriétés des carburants (p. ex., l'indice d'octane). Le processus de combustion Mitsubishi est un autre programme de R&D mais nous ne disposons pas de beaucoup de renseignements à ce sujet.
- *Moteurs rotatifs Otto à charge stratifiée et à chambre ouverte.* On tente avec ces moteurs de surmonter les limites de leurs homologues à charge non stratifiée en essayant d'augmenter l'économie d'essence et de réduire les émissions d'hydrocarbures.
- *Moteurs diesel à chambre ouverte.* On essaie ici d'améliorer la combustion à l'aide d'un meilleur mélange air-carburant; on classe ces moteurs d'après l'ampleur du tourbillonnement à l'intérieur de la chambre de combustion (Cole et al. 1983).
- *Moteurs diesel adiabatiques.* On essaie avec ces moteurs de réduire les pertes de chaleur dans le bloc-moteur et de récupérer la chaleur des gaz d'échappement grâce à une suralimentation ou à l'application d'un cycle Rankine. Même si ces systèmes ajoutent à la complexité du moteur, la consommation spécifique de carburant est inférieure de 25 % à celle d'un gros moteur diesel suralimenté. À l'heure actuelle, le Commandement de la recherche et du développement des véhicules-chars d'assaut de l'Armée des

États-Unis commandite la recherche sur les moteurs diesel adiabatiques (Dowdy 1983).

La recherche sur les MCI continue de prédominer chez les fabricants d'automobiles des pays industrialisés et l'amélioration des moteurs a constitué un avantage important sur le marché international des véhicules au cours des dernières années. C'est là un secteur de recherche prometteur pour les pays en développement qui possèdent leurs propres industries de fabrication de véhicules. Du même coup, on constate une divergence dans la courbe de propriétés d'automobiles particulières dans certains pays en développement et une percée importante des véhicules à deux roues. Une amélioration de leurs moteurs et la mise au point de modèles légers et à basse consommation représenteraient des sujets de recherche pertinents dans ces pays.

Les moteurs à combustion externe

Les moteurs à combustion externe (MCE) ont comme principal avantage de pouvoir utiliser une plus grande variété de combustibles que les MCI, étant donné l'isolement de la chambre de combustion par rapport aux pièces mobiles du moteur. On connaît essentiellement deux genres de MCE : les moteurs à cycle Rankine et les moteurs Stirling. Les moteurs à cycle Rankine peuvent fonctionner avec n'importe quel combustible pouvant subir un changement de phase à une température particulière. On peut les subdiviser en moteurs à vapeur et en moteurs organiques à cycle Rankine. Dans ce dernier cas, on utilise un fluide organique (habituellement le fréon) pour remplacer l'eau dans le cycle.

Les moteurs organiques à cycle Rankine fonctionnant au fréon affichent une température maximum de travail d'environ 150° C à cause du faible point d'ébullition du fréon. Cette température peu élevée diminue l'efficacité maximale possible (l'efficacité de Carnot); dans les moteurs organiques à cycle Rankine de ce genre, on obtient une efficacité maximale d'environ 10 % (Hurst 1984). Bien que la température de la source de chaleur et le point de dissipation de la chaleur réduisent l'efficacité maximale possible dans un moteur à cycle Rankine, on peut atteindre cette efficacité essentiellement par de meilleures économies de chaleur.

Les moteurs Stirling ont pour principe de base le fait que la pression de l'air, ou de tout autre gaz, augmentera s'il est chauffé, et décroîtra s'il est refroidi. Le cylindre d'un moteur Stirling renferme une certaine quantité de gaz. Les premiers moteurs contenaient de l'air mais aujourd'hui, on a tendance à utiliser de l'hydrogène ou de l'hélium. Le gaz de travail contenu dans le moteur suit un cycle alternatif de réchauffement et de refroidissement. À chaque cycle, le mouvement du gaz dans le cylindre fournit un travail en déplaçant un piston.

On observe deux grandes orientations de la recherche sur les moteurs Stirling : les moteurs Stirling à piston libre et les moteurs Stirling pour automobiles (Beale 1981; Dowdy 1983). Les moteurs Stirling à piston libre ont l'avantage d'être d'une construction mécanique simple et de ne pas nécessiter de joints critiques dont on aurait autrement besoin pour empêcher la fuite du gaz de travail. On peut les utiliser comme pompes à eau, machines de refroidissement et alternateurs pour produire de l'électricité. Toutefois, ces moteurs ne sont encore que des outils de recherche et des pièces de démonstration.

Actuellement, le moteur Stirling rhombique de Philips est celui que l'on favorise pour les applications automobiles. Toutefois, ce moteur à haute pression

de type à manivelle comporte des problèmes de joint qu'il faudra régler pour éviter une fuite du gaz et la contamination du lubrifiant des échangeurs thermiques.

Les moteurs à cycle Brayton

Bien que le moteur à vapeur soit le premier à avoir été mis au point, c'est son encombrement et son inefficacité qui ont motivé les chercheurs à explorer d'autres principes moteurs. Dans les années 1870, le moteur à cycle Brayton innove en utilisant l'air comprimé au lieu de la vapeur pour fournir la force motrice. Presque au même moment, Otto et Diesel mettaient chacun au point leur propre moteur à combustion interne qui fournissait une puissance supérieure par unité de poids au moteur à cycle Brayton, ce qui en faisait des choix évidents comme moteurs pour les véhicules. Toutefois, presque un demi-siècle plus tard, l'arrivée de métaux améliorés et une connaissance accrue des principes de l'aérodynamisme faisaient revivre les moteurs à cycle Brayton, mais sous une forme différente. Au lieu de pistons, ces moteurs utilisaient des compresseurs rotatifs et des «turbines» qui donnaient une telle puissance par unité de poids qu'ils sont devenus les principales sources d'énergie pour le transport aérien à grande échelle.

Les turbines à gaz sont des moteurs qui fonctionnent d'après le principe du cycle Brayton, c.-à-d. compression d'un fluide de travail de la pression ambiante à une pression élevée; ajout de chaleur au fluide de travail à une pression constante élevée; et expansion du fluide de travail jusqu'à la pression ambiante et extraction du travail utile. Tout comme les moteurs Stirling, les moteurs à cycle Brayton sont des machines à combustion continue de type interne ou externe — cette dernière version du moteur à cycle Brayton n'a cependant pas subi autant d'essais que la première.

Les turbines à gaz comptent parmi les moteurs à cycle Brayton les mieux développés. Pour l'automobile, deux grands types de turbines à gaz sont actuellement mis au point : la turbine à gaz à arbre simple et la turbine à gaz à turbine libre. La première utilise une transmission continuellement variable alors que la seconde peut fonctionner à l'aide d'une transmission ordinaire d'automobile. Compte tenu des hautes températures d'admission dans les turbines à gaz, l'un des plus importants secteurs de la R&D touche les matériaux — plus particulièrement les matériaux de céramique pour la fabrication des rotors et des autres éléments de structure (Dowdy 1983).

À l'heure actuelle, les moteurs à cycle Brayton à combustion externe ou à allumage indirect en sont aux premières étapes de leur développement. L'allumage indirect a l'avantage de rendre les moteurs moins sensibles à la qualité du carburant, d'où la possibilité d'utiliser un certain nombre de combustibles de moindre qualité (Rosa s.d.). La recherche sur les moteurs à cycle Brayton dans les pays industrialisés demeure orientée sur les véhicules; toutefois, l'élargissement de cette recherche pourrait apporter des résultats marqués, surtout pour les pays en développement qui fabriquent des turbines à gaz.

Les chaudières

Les chaudières, autant de type industriel que pour la production d'électricité, figurent pour une part importante de la consommation d'énergie. Dans le secteur industriel, on détermine la part de la consommation d'énergie des chaudières par

l'importance des principaux domaines de production de vapeur : par exemple, industrie chimique, génie, aliments et papiers. Ainsi, on a estimé que les chaudières dans les pays de l'OCDE intervenaient, en moyenne, pour environ 40 % de toute la consommation d'énergie dans l'industrie (Agence internationale de l'énergie 1982a). Les chaudières semblent donc représenter l'un des principaux éléments dans les programmes d'économie d'énergie, autant dans les pays industrialisés qu'en développement. Pour l'avenir immédiat, le remplacement du pétrole par le charbon dans les chaudières est susceptible d'intéresser grandement les pays qui peuvent compter sur du charbon bon marché.

Chaudières conventionnelles

Il y a essentiellement trois types de chaudières conventionnelles : les chaudières sectionnelles, les chaudières ignitubulaires ou à tubes de fumée et les chaudières aquatubulaires. Les chaudières sectionnelles sont utilisées pour le chauffage central des résidences alors que les deux autres servent dans l'industrie.

Étant donné que la force nécessaire pour résister à l'éclatement latéral dans les chaudières ignitubulaires est directement proportionnelle au produit de la pression et du diamètre du tube, il y a des limites rigoureuses à la pression interne de ces chaudières. Habituellement, on utilisera des chaudières aquatubulaires lorsque la pression de la vapeur dépasse 18 t/h.

Il y a deux types de chaudières ignitubulaires et aquatubulaires, soit les modèles spéciaux et les modèles courants. Sur le marché mondial des chaudières industrielles, les chaudières conventionnelles représentent 75 % de la valeur totale des commandes. Leur pression interne se situe habituellement entre 14 et 45 t/h et elles s'alimentent au mazout et au gaz (Dryden 1982).

Dans les chaudières aquatubulaires et ignitubulaires, le réglage de l'excès d'air dans la combustion du charbon et du mazout présente des problèmes. S'il y a combustion de charbon pulvérisé, on établit les limites de l'excès d'air en tenant compte de diverses demandes contradictoires : premièrement, le besoin de conserver la température de combustion en deçà de la température de fusion de la cendre; deuxièmement, le besoin d'éviter le dépôt de charbon partiellement brûlé sur les tubes des parois, ce qui provoquerait une corrosion par combustion dans des poches de pression atmosphérique réduite; et troisièmement, le besoin d'éviter la condensation des gaz d'échappement et la corrosion par l'acide des gaz en mouvement. De même, dans le cas du mazout, un manque d'oxygène causerait des problèmes au niveau des émissions dans les cheminées alors qu'une trop grande quantité se solderait par un taux de corrosion inacceptable. Dans le cas des mazouts lourds comme du charbon, la température d'échappement des gaz comporte un seuil inférieur et, en conséquence, fait plafonner l'efficacité.

Les chaudières conventionnelles ignitubulaires et aquatubulaires posent également des problèmes avec du charbon de faible qualité. Même si les chaudières peuvent être conçues pour recevoir un type particulier de charbon, les charbons de faible qualité présentent des problèmes de fonctionnement : leur teneur très variable en humidité, en soufre et en sodium anhydre fait qu'il est difficile de maintenir la capacité de la chaudière; l'encrassement par les cendres de combustion des surfaces d'échange thermique de la chaudière; et la difficulté à contrôler l'anhydride sulfureux et les oxydes d'azote (Goblirsch et Talty 1980). De par leur conception ou leur fonctionnement, les chaudières conventionnelles aident bien

peu à contrôler l'anhydride sulfureux; on doit régler le problème avant ou après la combustion. On peut modifier sensiblement les émissions d'oxydes d'azote selon le modèle de la chaudière et les conditions d'opération, mais le processus de génération des oxydes d'azote pendant la combustion du charbon demeure encore un domaine bien peu exploré.

Compte tenu de toutes ces limites, l'objectif majeur de la recherche sur les chaudières conventionnelles, surtout celles qui sont utilisées dans les centrales d'énergie, sera probablement l'amélioration du taux de chaleur. Les deux tendances susceptibles d'émerger dans ce domaine sont : la mise en place de systèmes d'observation en direct du rendement dans un plus grand nombre d'usines afin de déceler les éléments en détérioration et les pertes d'efficacité, et l'utilisation en direct d'outils de diagnostic pour prévoir les bris, ordonnancer les coupures intentionnelles de courant, commander les pièces de rechange et fournir la main-d'oeuvre de manière optimale (Yeager 1984).

Chaudières à lit fluidisé

On a développé ce type de chaudière pour surmonter certains problèmes liés aux chaudières conventionnelles. Dans ces chaudières, on brûle le combustible sur un lit d'air turbulent, pour améliorer l'efficacité de la combustion; si l'on ajoute de la chaux ou de la dolomite au mélange combustible, on peut également éliminer le soufre. En outre, la température de combustion est relativement plus basse dans les chaudières à lit fluidisé. Bien que la recherche sur la combustion dans ce genre de chaudière remonte à 1944, elle aura été effectuée dans un climat de désintéressement à l'égard du charbon jusqu'au début des années 70. Elle a cependant repris son élan après la crise du pétrole (Patterson et Griffin 1978).

Les chaudières à lit fluidisé comportent quatre avantages de base sur les chaudières conventionnelles : on peut brûler différents combustibles dans la même chambre de combustion; la désulfuration des fumées nécessite un appareillage technique très restreint; les émissions d'oxydes d'azote sont moins importantes parce que la combustion se produit à une température inférieure; et les taux élevés de transfert et d'échappement de la chaleur peuvent amener une diminution considérable de la taille, du poids et du coût de la chaudière (Université d'Oklahoma 1975; Howard 1979; Poersch et Zabeschek 1980). Pour ces raisons, les chaudières à lit fluidisé pourraient être fabriquées et assemblées en usine, livrées à l'endroit voulu et disposées selon les besoins, diminuant considérablement le temps et les coûts de construction des nouvelles centrales d'énergie. Toutefois, on n'a pas encore mis au point une série standard de ce genre de chaudière.

On rencontre deux types de chaudières à lit fluidisé — atmosphérique et pressurisée. Cette dernière combine un cycle de turbine à gaz et de turbine à vapeur qui accroît l'efficacité globale du système d'environ 5 % (Müller et al. 1982).

Une mauvaise combustion et des émissions élevées de particules provenant du court temps de séjour du combustible sur le lit, un mélange latéral pauvre et une forte séparation par décantation des particules fines du lit ou du sorbant de carbone et enfin les difficultés à éliminer la cendre et les combustibles lourds sont toutes des raisons qui ont favorisé la recherche et le développement sur les chaudières à lit fluidisé à circulation d'eau. On peut également utiliser un combustible liquide dans ces chaudières sans recourir à un vaporisateur (Tata Energy Research Institute 1983). Ce type de chaudière a de meilleures chances d'être commercialisé dans l'avenir que les chaudières conventionnelles à lit fluidisé.

Amélioration des chaudières existantes

Le changement de capacité constitue l'un des principaux problèmes qui surgissent lorsqu'on tente d'améliorer des chaudières existantes pour leur faire brûler du charbon ou de la biomasse. En outre, il n'est souvent pas facile d'intégrer la combustion directe du charbon ou de la biomasse à une chaudière existante fonctionnant au mazout ou au gaz en raison des nouvelles chambres de combustion plus grandes que nécessite la combustion directe. Toutefois, on peut brûler une bouillie composée de charbon de bois et de mazout en n'apportant que de légères modifications au matériel existant (Meta Systems Inc. 1982). Il est plus facile de convertir une chaudière au charbon qu'à la biomasse. Dans ce dernier cas, on pourrait utiliser à la place un gaz à faible ou moyenne valeur calorifique provenant d'une usine de gazéification.

Lorsqu'on transforme au charbon des chaudières alimentées au mazout ou au gaz, ou que l'on introduit de nouvelles chaudières à charbon, les avantages pécuniaires sont fonction de l'endroit. Idéalement, ce sera un endroit nouveau nécessitant l'achat d'une chaudière et n'ayant à subir aucune contrainte découlant d'un emplacement existant. Vient ensuite le remplacement d'une chaudière à mazout ou à gaz dont la durée de vie est terminée. Enfin, il y a les cas où il sera suffisamment rentable de remplacer hâtivement une chaudière à mazout ou à gaz par une autre alimentée au charbon (Agence internationale de l'énergie 1982a).

Toutefois, on ne pourra effectuer une amélioration efficace que s'il y a des dossiers sur les chaudières en usage au pays, dans lesquels on trouvera par exemple le nombre de chaudières et d'installations, le taux de pression de la vapeur nécessaire, la répartition de la capacité des chaudières, la répartition par âge, l'utilisation et, partant, les besoins en combustible, le type de combustible utilisé et toute substitution antérieure à celui-ci. C'est uniquement à partir de tels renseignements que l'on pourra calculer s'il est rentable de transformer les chaudières au charbon dans chaque pays ou région. Un inventaire du stock national de chaudières constituerait donc la première étape de toute recherche à réaliser dans ce domaine.

Les poêles à combustible solide

L'observation empirique de la piètre efficacité de cuisson des poêles traditionnels à combustible solide laisse croire qu'un accroissement du rendement permettrait d'obtenir une économie de combustible. La diminution des peuplements forestiers sur pied et l'utilisation des résidus d'animaux et de cultures comme combustibles dans les pays en développement nous amènent à penser qu'une économie de combustible s'impose. De nombreuses expériences ont eu lieu pour mettre au point des poêles bon marché et efficaces qui traduiraient ce besoin en une demande (voir De Lepeleire et al. 1981).

Bien que certains des nouveaux modèles aient eu beaucoup de succès à l'échelon local, on croit que leur distribution générale est restreinte en comparaison du nombre de chercheurs occupés dans ce domaine, du nombre de modèles mis au point et des pressions évidentes à obtenir des résultats pratiques dans les projets d'amélioration des poêles à cuisson. Trois grandes causes expliquent le phénomène.

- Les nouveaux modèles de poêles reposent sur «l'intuition plutôt qu'une analyse technique rigoureuse appuyée par des données fiables» et, en conséquence, n'affichent pas toujours ni de façon marquée un rendement

supérieur à celui des poêles traditionnels (Prasad 1983). En d'autres mots, la mise au point de poêles nettement améliorés doit être le fruit d'un progrès des connaissances.

- La consommation de combustible constitue moins une fonction de la conception du poêle que de la disponibilité et du coût du combustible (Foley et Moss 1983). Il est possible d'atteindre des économies de combustible considérables même avec des poêles traditionnels si l'approvisionnement en combustible est suffisant. Dans une certaine mesure, c'est le cuisinier qui détermine l'efficacité du poêle traditionnel, mais celle-ci est tellement variable que les nouveaux modèles devront dépasser de façon marquée et continue le rendement possible des poêles traditionnels s'ils veulent faire l'objet d'une acceptation générale.
- Les lacunes découlent de la fabrication plutôt que de la conception des prototypes. Les modèles fabriqués ne respectent aucune norme, sont fragiles, coûteux et de courte durée d'utilisation et, à cause d'une ou de plusieurs de ces raisons, ne peuvent concurrencer les modèles traditionnels (Manibog 1984).

Tous ces facteurs ont probablement contribué à l'échec des divers programmes d'amélioration des poêles, mais on ne peut en évaluer l'effet ni l'importance relative de chacun. En fait, l'une des plus fréquentes lacunes de la recherche est l'absence d'essais d'évaluation sur le terrain; sans eux, tout jugement de valeur porté a posteriori sur la recherche risque d'être imprécis et subjectif.

Cependant, l'examen des évaluations disponibles nous porte à croire que l'on aurait généralisé à outrance l'inefficacité des poêles traditionnels et la pénurie de combustibles solides. Les pénuries de biomasse — ou plus précisément la perception de son coût élevé, que ce soit au niveau de la main-d'oeuvre engagée dans la récolte, des coûts de production ou des coûts d'opportunité — s'observent uniquement à l'échelon local et ne peuvent être évaluées avec précision dans les pays en développement à cause d'un manque de données fiables. En outre, l'inefficacité des poêles traditionnels s'explique en partie par une discordance entre les caractéristiques des combustibles solides et les besoins de la cuisson ainsi que par l'optimisation des paramètres, autres que l'efficacité du combustible, de la part du cuisinier.

Sous sa forme la plus simple, on pourrait considérer la cuisson comme une série d'opérations de transfert thermique nécessitant divers apports calorifiques. L'efficacité énergétique élevée d'une cuisson au gaz ou au kérosène s'explique par le réglage très précis du débit de chaleur de ces deux combustibles; voilà également pourquoi ils sont si populaires partout auprès des cuisiniers.

Le réglage de la chaleur sur les poêles à combustible liquide s'effectue à l'entrée du combustible — au moyen d'une soupape dans un poêle à gaz, et par la longueur d'une mèche dans un poêle au kérosène. La soupape ou le porte-mèche sépare effectivement la zone de combustion du réservoir de combustible, ce qui n'est pas le cas dans un poêle à combustible solide puisque la zone de combustion est une partie du combustible; en outre, chaque combustible produit une chaleur selon une courbe de durée très particulière. Ainsi, dans un combustible renfermant un taux d'humidité élevé, il y a d'abord vaporisation de l'eau au cours de laquelle l'apport de chaleur est faible. À mesure que l'eau s'évapore, le débit de chaleur augmente. Les combustibles présentant un coefficient élevé surface-volume, comme la paille, les pains de bouse ou le papier, brûlent et commencent à fournir rapidement de la chaleur; les combustibles à coefficient peu élevé comme l'anthracite brûlent lentement.

Les cuisiniers apprennent ou conçoivent eux-mêmes des moyens d'obtenir des combustibles solides récalcitrants la chaleur dont ils ont besoin. D'abord, ils combinent des combustibles à combustion lente et rapide : par exemple, ils peuvent allumer le feu avec un combustible rapide comme la paille et recourir ensuite à de grosses billes pour entretenir un feu lent. En deuxième lieu, ils peuvent enlever le combustible de la zone de combustion; en effet, il est particulièrement aisé de retirer ou d'ajouter des branches et des billes. En troisième lieu, ils peuvent éteindre le feu lorsqu'ils n'en ont pas besoin ou qu'ils désirent diminuer l'apport de chaleur. En dernier lieu, ils utilisent différents dispositifs de cuisson — un chauffe-eau rapide muni d'un raccordement pour fournir l'eau du bain, un petit poêle à charbon en fonte pour des opérations rapides mais restreintes, comme la préparation de l'eau du thé, un poêle massif en terre cuite pour les cuissons longues, etc. Il s'agit dans tous les cas de dispositifs économiseurs de temps auquel un cuisinier recourra selon ses moyens et l'abondance du combustible. Lorsque les combustibles disponibles n'offrent pas un débit de chaleur très variable, on peut adapter le genre de cuisson aux combustibles. Ainsi, dans une région offrant seulement des combustibles rapides comme la paille et la bouse, le cuisinier préparera des aliments rapides; dans les ménages qui manquent de combustible, les bains chauds deviennent un luxe, etc.

En conséquence, l'inefficacité du combustible dans la cuisson vient du réglage et de la concordance imparfaits du débit de chaleur par rapport aux besoins. Le niveau de discordance variera d'une opération de cuisson à l'autre, de même que l'efficacité du combustible. Qui plus est, le cuisinier adopte divers moyens, comme l'enlèvement du combustible ou l'étouffement du feu, afin de mieux faire correspondre la demande et l'apport de chaleur, mais en procédant ainsi, il diminue l'efficacité du combustible. Lorsque le combustible est peu abondant, le cuisinier est moins enclin à utiliser ces moyens pratiques mais peu économiques en combustibles et a tendance à adapter ses opérations de cuisson en fonction de la rareté du combustible. Ainsi, l'efficacité du combustible reflète en partie le comportement du cuisinier face à l'abondance ou à la rareté du combustible. Cependant, cette réaction peut survenir avec retard sur le phénomène de raréfaction du combustible dans la région, produisant ainsi une crise réelle de combustible.

Si cette interprétation est juste, il faut d'abord identifier les régions dans les pays en développement où les coûts du combustible sont élevés. Les chiffres du tableau 11 indiquent que l'approvisionnement en biomasse par habitant est faible dans une bande s'étendant de l'Afrique occidentale à l'Asie orientale. Dans les régions où le combustible se fait rare, les villes paient le combustible à un prix particulièrement élevé. Pour trouver des débouchés aux nouveaux modèles de poêles, il conviendra en premier lieu d'identifier les régions déficitaires en combustible. On sait aussi que dans ces régions, certaines catégories de consommateurs seraient plus touchés par la rareté des combustibles. Par exemple, les restaurants sont susceptibles d'être plus sensibilisés à l'effet des coûts du combustible sur leur viabilité — bien que le combustible puisse intervenir pour une plus faible proportion de leurs dépenses que chez les ménages.

Même après cet exercice, on ne serait pas toujours justifié de supposer que l'efficacité d'un combustible est un sujet majeur de préoccupation pour les cuisiniers. On conseille plutôt de chercher à connaître les caractéristiques d'un poêle auxquelles ils attachent le plus d'importance. Certaines, comme le réglage du débit de chaleur et les économies de temps, sont universelles. D'autres sont susceptibles d'être particulières à l'emplacement, au moins dans une certaine mesure. Par exemple, on préférera un poêle sans fumée dans des locaux fermés et restreints alors

que sous un climat chaud, on délaissera les poêles qui dégagent une forte chaleur. Un poêle qui répond à plusieurs exigences des consommateurs a beaucoup plus de chance d'être accepté qu'un autre qui présentera un meilleur rendement sur un point seulement.

En dernier lieu, la clé du contrôle de la chaleur et de l'efficacité du combustible repose dans le réglage du rapport air-combustible. L'ajustement de ce rapport joue un rôle de premier plan dans le fonctionnement efficace des fours industriels. Les poêles à faible consommation ont vu le jour il y a plus d'un siècle dans les pays industrialisés et se caractérisaient par un foyer fermé et une entrée d'air réglable. Bien que ni les chaudières modernes ni les anciens fours ne puissent servir de poêles de cuisson dans les pays en développement, on s'attend également à des progrès dans ce domaine, notamment au niveau du réglage du rapport air-combustible.

Chapitre 6 Les combustibles liquides

Les problèmes énergétiques des pays en développement découlent de la dépendance du processus de développement à l'égard des ressources energétiques «non vivantes». Ces problèmes étaient déjà sérieux avant la crise du pétrole et le demeureront après la chute des prix de ce produit. Cependant, les pays en développement constituent un groupe fortement dépendant du pétrole et la plupart d'entre eux doivent s'approvisionner sur le marché international. Les perspectives globales en matière de pétrole et d'énergie les préoccupent donc au plus haut point. Ces perspectives sont en elles-mêmes incertaines, mais il importe de les préciser au moyen de la recherche.

L'incertitude tient en partie aux réserves finales de pétrole que vient remettre en question la théorie de l'origine non biogénique du gaz et du pétrole. Que cette théorie soit juste ou non, on sait que les travaux exploratoires antérieurs effectués dans la plupart des pays en développement ont été peu nombreux et d'une faible qualité et qu'il y aurait place pour d'autres recherches. Les contrats d'exploration passés entre les pays en développement et les sociétés pétrolières sont très complexes sur le plan juridique et économique et leur libellé constitue un cas d'espèce. Il y a eu bien peu d'exploration dans les pays en développement après la crise pétrolière, la plus grande partie survenant dans les pays affichant des perspectives reconnues et entreprise par des sociétés pétrolières nationales. Les pays en développement pourraient donc être sous-explorés à ce titre, du fait que les multinationales du pétrole perçoivent leurs réserves comme infimes ou trop risquées. Dans ce cas, une recherche à l'égard d'autres structures institutionnelles en matière d'exploration s'imposent.

Les prix et les marchés internationaux du pétrole affichent la même incertitude. Une part de cette incertitude est irréductible, mais il est quand même important pour un pays en développement de mieux comprendre le fonctionnement du marché pétrolier et le comportement des prix de ce produit.

Advenant un épuisement du pétrole, le gaz de méthane servira au premier chef comme combustible dans les véhicules ou comme matière dans la fabrication d'essence gazéifiée. Ce sont les pays industrialisés qui entreprendraient les recherches sur la commercialisation de ce produit. La fabrication du méthanol à partir de bois sera réalisable uniquement si les devises étrangères viennent à manquer et que le bois est bon marché.

Le Brésil et le Zimbabwe ont tous deux commercialisé l'éthanol et quelques autres pays en développement présentent des perspectives également favorables. Le processus de fabrication d'éthanol est établi, mais on peut accroître sa rentabilité par une recherche visant à diminuer le coût des charges d'alimentation, à accroître l'utilisation de la capacité et à améliorer l'efficacité de la fermentation.

L'ascension rapide des prix du pétrole en 1973–1974 a suscité dans le monde la crainte d'un épuisement de cette ressource dans les décennies à venir et d'un arrêt

imprévisible de son approvisionnement à tout moment. Elle a amené une quête de moyens pour économiser et remplacer le pétrole ainsi qu'une poussée brusque de la recherche vers les mêmes objectifs. Réciproquement, la baisse des prix du pétrole observée depuis 1982 a fait diminuer le volume de la recherche énergétique et les fonds consacrés à celle-ci. Dans les pays en développement, la diminution est probablement plus importante puisque ces derniers ont également été dans l'ensemble touchés très gravement par la stagnation de l'économie mondiale.

De l'avis du Groupe, les pays en développement connaissaient des problèmes énergétiques sérieux même avant la crise pétrolière et continueront d'en éprouver malgré la baisse récente des prix du pétrole. En effet, ces problèmes découlent non seulement de leur dépendance à l'égard du pétrole, mais aussi du fait que le processus de développement dépend de la disponibilité d'énergie inanimée. La différence entre les pays industrialisés et les pays en développement tient aux conséquences énergétiques de la croissance dans chacun d'eux. Ayant atteint un niveau élevé de revenu, de consommation d'énergie et de capacité technologique, les pays industrialisés pourraient maintenir des taux de croissance semblables à ceux qu'ils ont affichés au cours des dernières décennies et réussir quand même à contenir la croissance de la consommation d'énergie à un niveau faible et abordable. Les pays en développement éprouveraient beaucoup plus de difficulté à ce titre puisque leurs taux de croissance et d'accroissement de la productivité doivent être supérieurs et qu'ils les obligent à se tourner vers des activités à plus grande intensité énergétique. Pour ces raisons, il est essentiel de constituer une capacité technologique dans les pays en développement pour qu'ils puissent surmonter leurs problèmes en matière d'énergie.

En tant que groupes, les pays en développement sont extrêmement dépendants du pétrole. Si l'on exclut la Chine et l'Inde, qui sont tous deux de grands producteurs de charbon, le pétrole est intervenu pour 61 % de l'énergie commerciale consommée par le reste de ces pays en 1980 (Banque mondiale 1983a). Les pays importateurs de pétrole doivent se doter d'une politique pétrolière et établir des hypothèses reposant sur des travaux de recherche.

Il importe de mettre en oeuvre des politiques pétrolières nationales qui tiennent compte du contexte énergétique global. L'incertitude qui touche les perspectives mondiales au titre de l'énergie s'étend beaucoup plus loin que la période pour laquelle nos connaissances actuelles nous permettent d'établir des projections. De façon plus particulière,

- La possibilité d'un réchauffement global est abordée ci-dessous au chapitre 12 intitulé «L'effet de serre». Si l'on parvient à déterminer avec plus de précision encore la probabilité de cet événement et si l'on constate que le seul moyen de prévenir ses conséquences dévastatrices consiste à réduire la consommation mondiale des combustibles carbonés, la planète devra adopter des combustibles de remplacement en l'espace de quelques décennies, parmi lesquels l'hydrogène et l'électricité des centrales nucléaires sont les seuls à pouvoir être produits en quantité suffisante pour répondre même à la demande actuelle des pays industrialisés.
- On connaît davantage les risques de l'énergie nucléaire, bien que nos connaissances actuelles soient influencées de façon marquée par les accidents futurs — ou leur absence. Si l'ensemble des pays en vient à considérer comme inacceptable ces risques, l'énergie solaire et l'hydrogène constitueront alors les seules sources principales disponibles pour les pays (Bockris et Veziroglu 1985). Leurs coûts d'exploitation seront probablement si élevés

qu'une stratégie conservationniste à outrance deviendra plus attrayante sur le plan économique (Goldemberg et al. 1985).

- Si l'on en vient à considérer le réchauffement global comme une option moins probable ou moins difficile à régler et que l'énergie nucléaire est perçue comme un risque indu, on sera alors porté à utiliser encore les combustibles fossiles jusqu'à ce qu'ils deviennent trop coûteux ou que leurs répercussions sur l'environnement deviennent intolérables. Même avant que cela se produise, l'effet évident des pluies acides et leur rapport avec la combustion à grande échelle de combustibles fossiles mettent en évidence une politique d'économie, au moins dans les régions où ce genre de combustion prédomine.

Les membres du Groupe sont divisés quant aux possibilités énumérées ci-dessus, mais ils conviennent tous que dans l'état actuel des choses, il est justifié d'avoir une telle gamme d'opinions au sujet de l'avenir. Réduire les incertitudes est dans l'intérêt de toute la planète, et les pays en développement seraient bien avisés de ne pas se contenter d'un rôle d'observateurs mais bien de participer à la recherche orientée vers cette fin. Entre-temps, les pays en développement seront justifiés de supposer que le pétrole conservera (ou devrait le faire) son importance pendant les prochaines décennies.

Le pétrole

L'importance du pétrole pour les pays en développement est incontestable, mais il est difficile d'évaluer jusqu'à quel point. Le tableau 7 dresse la liste des pays en développement présentant la plus haute facture d'importation d'énergie. Le mode d'évaluation de cette facture peut prêter à controverse. Le plus simple est de relier les importations d'énergie aux exportations de marchandises. Mais pour certains pays, les recettes sur invisibles (biens incorporels) ont pris une place importante ces dernières années : recettes touristiques pour d'aucuns, les transferts de fonds des émigrants pour d'autres. Pour d'autres pays, les paiements sur invisibles — surtout des intérêts débiteurs — leur ont causé des difficultés même lorsque leur balance commerciale était excédentaire. En conséquence, nous avons lié les importations d'énergie aux exportations de marchandises ainsi qu'à toutes les autres recettes principales du compte courant.

Certains exportateurs de pétrole éprouvent le problème inverse d'une dépendance excessive à l'égard de ce produit. Une hausse de valeur des exportations pétrolières fait apprécier la monnaie nationale, entraîne une baisse de l'industrie et favorise une spécialisation croissante dans les principales activités économiques du pays. Le danger est plus grand lorsque le rapport entre les réserves et la production est faible et qu'une pénurie de pétrole s'annonce dans un avenir rapproché : dans ces circonstances, il est difficile de restructurer l'économie assez vite pour éviter une baisse du revenu par habitant lorsque les réserves pétrolières seront épuisées. Pour identifier ces pays, nous attribuons la dépendance aux exportations de pétrole et le rapport réserve-production aux pays en développement dont l'économie repose largement sur les exportations de pétrole (tableau 8).

Les données n'ont pas été publiées après 1981, mais la baisse des prix du pétrole a grandement modifié la situation. Le rapport entre les importations de pétrole et les exportations des pays figurant au tableau 8 a fléchi; parallèlement, certains pays se sont endettés davantage alors que d'autres ont vu leurs échanges

Tableau 7. Importations d'énergie en proportion des exportations et des recettes de change, 1981[a] (millions de $ US).

Pays	Importations d'énergie [1]	Exportations de marchandises [2]	Recettes de change[b] [3]	Import. d'énergie, % des Recettes de change [1/3]	Import. d'énergie, % des Export. [1/2]
Brésil	12 049,4	23 276,0	10 340,0	116,5	51,8
Guatemala	749,2	1 299,0	974,9	81,5	61,1
Côte d'Ivoire	543,1	2 734,0	819,6	66,3	19,9
Turquie	3 903,5	4 703,0	5 937,0	65,7	83,0
Kenya	720,7	1 072,0	1 161,1	62,1	67,2
Trinité-et-Tobago	1 192,0	2 531,0	2 030,7	58,7	47,1
Inde	6 531,8	8 437,0	11 450,0	57,0	77,4
Maroc	1 121,0	2 283,0	2 001,0	56,0	49,1
Nicaragua	216,9	500,0	408,3	53,1	43,4
Jamaïque	496,7	974,0	959,9	51,7	51,0
Uruguay	534,6	1 229,7	1 130,7	47,3	43,5
Thaïlande	2 974,7	6 902,0	6 362,0	46,8	43,1
Philippines	2 574,9	5 722,0	5 653,0	45,5	45,0
Rép. dominicaine	475,2	1 188,0	1 045,8	45,4	40,0
Libéria	127,4	529,0	291,0	43,8	24,1
Éthiopie	164,6	374,0	379,7	43,3	44,0
Rép. de Corée	7 864,0	20 671,0	19 653,0	40,0	38,0
Sri Lanka	466,2	1 062,5	1 250,8	37,3	43,9
Tanzanie	283,0	688,3	760,0	37,2	41,1
El Salvador	213,8	768,0	648,0	33,0	26,8
Pakistan	1 497,6	2 730,0	4 737,0	31,6	54,9
Costa Rica	203,3	1 003,0	681,9	29,8	20,3
Soudan	289,5	792,7	1 002,4	28,9	36,5
Colombie	797,5	3 219,0	2 868,0	27,8	24,8
Chili[c]	963,6	4 705,0	3 498,0	27,5	20,5
Jordanie	739,3	733,2	2 776,1	26,6	100,8
Tunisie	684,8	2 102,0	2 685,0	25,5	32,6

Source : Chiffres tirés des documents de la Banque mondiale (1982b, 1983b, 1984) et du Fonds monétaire international (1984).

[a] Sont pris en compte uniquement les pays dont les importations d'énergie représentent plus de 25 % des recettes de change.

[b] Les recettes de change correspondent à la somme des exportations de marchandises, des autres biens et services (crédits nets) et des transferts non compensatoires (privés et officiels).

[c] Chiffres pour 1980.

commerciaux s'aggraver à la suite d'une dépréciation du taux de change et d'une baisse des prix à l'exportation. Néanmoins, les pays énumérés aux tableaux 7 et 8 sont ceux dont la dépendance à l'égard du pétrole suscite des problèmes à long terme et appelle des solutions également sur une longue période.

On peut chercher à différents niveaux les solutions aux problèmes découlant d'une dépendance pétrolière. Tous les pays peuvent affronter leurs problèmes au moyen d'une politique macro-économique. Ils peuvent également chercher un remède par le biais d'une économie et d'une gestion de la demande d'énergie (chapitres 4 et 5). Ils peuvent explorer la viabilité économique d'une production de produits de remplacement du pétrole, que l'on aborde ici et dans le chapitre suivant. Enfin, ils peuvent chercher du pétrole sur leur propre sol et le mettre en valeur. Au surplus, les pays qui produisent ou qui importent du pétrole peuvent le raffiner.

Réserves mondiales de pétrole

Selon les estimations actuelles les plus fiables et les plus soignées, les réserves mondiales de pétrole dureront seulement encore quelques décennies. Les auteurs les plus méticuleux les ont qualifiées sans détours d'estimations «subjectives», sujettes à une marge d'erreur importante (ainsi, alors que Masters a établi à 182 Gt les réserves moyennes (1983) lors du Colloque mondial sur l'énergie, la probabilité qu'elles soient de 149 Gt était de 95 %, et de 5 % qu'elles atteignent 306 Gt). Ces auteurs sont également d'avis que l'estimation élevée est liée à la découverte de nouveaux gisements comme ceux d'Arabie saoudite, ce qu'ils considèrent comme peu probable. Toutefois, les estimations fluctuent en fonction des nouvelles découvertes, surtout des gisements géants et super-géants, étant donné que les experts partent des réserves connues pour aller vers les réserves plus incertaines.

Selon la théorie traditionnelle des géologues pétroliers, presque toutes les sources souterraines d'hydrocarbures proviennent de la biomasse et des animaux marins enfouis sous terre à une époque ou l'autre. Récemment, Thomas Gold (1985) a fait ressusciter l'opinion contraire, qu'il attribue à Mendeleev (1877), selon laquelle les hydrocarbures auraient une origine abiogénique. Selon Gold, le méthane est généré à des profondeurs considérables pour ensuite migrer vers la surface. Une partie se transforme en gaz carbonique et s'échappe dans l'atmosphère mais une forte proportion reste emprisonnée sous la surface, y compris un certain volume qui s'est transformé en pétrole. Les jalons biologiques qui caractérisent les formations de pétrole et de gaz ne leur sont pas exclusifs car on les trouve également dans les roches non pétrolifères. Gold justifie sa théorie par le fait que les atmosphères de Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune renfermeraient du méthane d'une origine nettement non biologique tandis que les astéroïdes contiendraient, selon ses déductions, des substances du genre bitumineux. Si la théorie est juste, les gisements de gaz, mais aussi de pétrole à découvrir, dépasseraient considérablement les prévisions des géologues traditionnels.

Qui plus est, les hydrocarbures encore cachés ne se situeraient pas là où les géologues traditionnels s'attendent à les trouver, mais bien près des limites des plaques, et plus bas encore. Étant donné que l'on n'a pas exploré ces endroits, on dispose de bien peu d'observations directes appuyant la théorie de Gold. Il faudra en faire beaucoup d'autres avant de pouvoir les utiliser dans l'exploration pétrolière. Mais les conséquences de cette théorie pour les pays en développement, surtout ceux qui manquent de pétrole, sont prodigieuses; ils auront donc intérêt à aider et à promouvoir la recherche qui vérifierait la validité de cette théorie.

Même si la théorie se révèle fausse, les pays en développement présentent de vastes régions pouvant renfermer des gisements de pétrole, d'après la géologie traditionnelle. La probabilité de découverte de pétrole dans ces régions dépend non des réserves globales qui restent à trouver, mais bien de la qualité et de l'intensité de l'exploration antérieure, peu importante dans un certain nombre de pays en développement (Halbouty 1983; Parra 1983). Là où existent ces secteurs, une exploration s'impose peu importe le pessimisme mondial à l'égard des réserves à venir.

Exploration et mise en valeur

L'exploration et la production constituaient des techniques relativement bien établies dans les années 60. L'avènement du forage en haute mer ou à de grandes distances sous terre, dont la rentabilité s'est grandement accrue à la suite de la

Tableau 8. Dépendance à l'égard des exportations de pétrole, 1981, et rapport des réserves à la production, 1982, dans les principaux pays exportateurs de pétrole.

Pays	Exportations, 1981 (millions $ US)		Exportations d'énergie en % des export. totales des march.	Estimation des réserves reconnues de pétrole au 1er janv. 1983 (en millions de barils[a])	Production estimée de pétrole 1982 (en millions de barils par jour)	Rapport des réserves à la production (années)
	Pétrole et produits pétroliers [1]	Toutes marchandises [2]	[3 = 1/2]	[4]	[5]	[4/5 x 365 jours]
Libye	15 513	15 571	99,6	21 500	1 127	52,3
Iraq[b]	10 914	11 064	98,6	41 000	914	122,9
Arabie saoudite	116 222	119 916	96,9	162 400	6 484	68,6
Iran[c]	250 555	25 943	96,6	55 308	1 896	79,9
Nigéria[d]	15 563	16 405	94,9	16 750	1 324	34,7
Émirats arabes unis[b]	8 585	9 078	94,6	n.d.	n.d.	n.d.
Oman	4 420	4 696	94,1	1 730	328	22,8
Venezuela	16 265	17 518	92,8	21 500	1 826	32,3
Algérie[c]	14 313	15 624	91,6	9 440	750	34,5
Qatar	4 920	5 389	91,3	3 425	340	27,6
Trinité-et-Tobago[e]	3 378	3 761	89,8	580	182	8,7
Congo[e]	856	955	89,6	1 550	87	48,8
Gabon	1 925	2 189	87,9	460	130	9,7
Koweït	13 178	16 300	80,8	64 230	675	260,7
Syrie[c]	1 662	2 108	78,9	15 210	175	23,8
Mexique	13 910	19 379	71,8	48 300	2 734	48,4
Indonésie	14 393	22 260	64,7	9 550	1 341	19,5
Égypte	2 082	3 232	64,4	3 325	667	13,7
Brunéi	2 413	4 022	60,0	1	155	21,9
Équateur[d]	1 178	2 104	56,0	1 400	215	17,8
Tunisie	1 352	2 504	54,0	1 860	106	48,1

Source : McCaslin (1983), Nations Unies (1984).

[a] 1 baril (bbl ou b) = 159 L.

[b] Chiffres pour 1978.

[c] Chiffres pour 1977.

[d] Chiffres pour 1979.

[e] Chiffres pour 1980.

montée des prix du pétrole, a substitué aux techniques d'exploration et de production une technologie de frontière en rapide évolution. Cette accélération du changement technologique a modifié le marché de la technologie. Les premières sociétés pétrolières, surtout les grosses, maîtrisaient mieux la technique que les autres à l'extérieur de leur industrie. Au cours des quinze dernières années, le marché de la technologie du pétrole a eu tendance à se morceler en un certain nombre de marchés spécialisés dominés chacun par un petit nombre d'entreprises (Surrey et Chesshire 1984).

Les grandes multinationales productrices de pétrole ne sont plus les seules à contrôler la technologie. Elles possèdent cependant toujours une expérience importante sur le terrain qui leur permet d'interpréter les conditions géologiques particulières à un emplacement et de prendre les mesures appropriées. En outre, elles sont capables de regrouper les techniques d'entreprises spécialisées pour procéder à des travaux particuliers d'exploration ou de mise en valeur.

Dans les années 60, les grandes sociétés pétrolières alimentaient en pétrole les économies de marché à partir d'un petit nombre de gisements prolifiques. À cause du faible coût de production de ces gisements, il était difficile aux nouveaux arrivants de concurrencer ces sociétés; on se retrouvait donc avec un marché pétrolier oligopole et stable. Toutefois, au début des années 70, on a assisté à la nationalisation des concessions de sociétés pétrolières établies en Asie occidentale et en Afrique du Nord; les grandes sociétés pétrolières n'étaient plus des propriétaires mais des vendeurs de pétrole et ont commencé à s'intéresser davantage à de nouveaux secteurs. En s'appropriant les bénéfices, les pays producteurs de pétrole ont diminué le pouvoir concurrentiel des grandes sociétés et facilité l'accès aux nouveaux arrivants. On a donc assisté au cours des années 70 à la mise en place d'un marché de contrats d'exploration et de production. Il était alors normal pour un pays de concéder les parcelles pour l'exploration. Attirer les soumissions et rédiger les contrats sont devenus des opérations complexes qu'on a pu exécuter grâce à des spécialistes ou au moyen de programmes d'aide technique dispensés par des organismes des Nations Unies. Ce secteur a également donné lieu à des études fructueuses (p. ex., Hossain 1979; Van Meurs 1981). Les contrats d'exploration nécessitent un jumelage complexe de dispositions juridiques et économiques, et les contrats pétroliers ont beaucoup de choses en commun avec ceux qui touchent l'exploitation d'autres ressources. Il faudra continuer la recherche dans ce domaine afin d'appliquer les principes aux nouvelles situations et de systématiser l'expérience acquise.

Cependant, il n'est pas évident que la rédaction appropriée des contrats devienne l'unique préoccupation des pays en développement, car les sociétés pétrolières ont des besoins (contexte politique stable et rendement économique élevé) que bien peu de pays en développement peuvent satisfaire (Parra 1983). Parmi les grands projets de production de pétrole depuis 1973, deux — dans la Mer du Nord et dans la Baie Prodhoe — se situent dans des pays industrialisés et un au Mexique, pays contigu aux États-Unis. Les pays en développement peu susceptibles de devenir des exportateurs importants, à cause de faibles gisements ou d'un marché intérieur important, éprouvent des difficultés particulières à attirer les sociétés pétrolières.

Les statistiques provenant de la base de données élaborée par IED Consulting et EDPRA Consulting sont révélatrices (tableau 9). De 1973 à 1981, les pays en développement producteurs ont conservé à peu près le même nombre de concessions alors que celles des pays en développement non producteurs ont régressé de façon radicale. La sismique a presque doublé dans les pays producteurs mais elle a fléchi dans les pays non producteurs. Des 678 puits exploratoires forés dans les pays

Tableau 9. Indicateurs de l'activité d'exploration des pays en développement importateurs de pétrole, certaines années, 1973–1983.

		Pays producteur	Pays non producteur	Total
Avoirs contractuels sous forme de droits de prospection (en millions de km^2)	1973	1,58	5,92	7,50
	1980	1,57	2,55	4,12
	1981	1,53	2,87	4,40
Sismique (en milliers de lignes au kilomètre)	1973	125,1	86,6	211,7
	1980	237,9	60,4	298,3
Nombre de puits exploratoires forés	1983	638[a]	40	678[a]

Source : Chiffres tirés de Foster (1985).
[a] Les données ne comprennent pas l'Inde et sont probablement incomplètes pour quelques autres pays.

en développement, seulement 40 se trouvaient dans des pays en développement non producteurs. Il y a donc une forte prédominance de l'activité d'exploration dans les pays dont les gisements ont déjà été reconnus et mis en exploitation. En outre, la plupart des travaux exploratoires dans les pays producteurs ne sont pas faits par les multinationales du pétrole puisque plus de 70 % ont été effectués par des sociétés pétrolières nationales d'Argentine, du Brésil et de l'Inde (Foster 1985).

Cette sous-exploration dans les pays en développement peut s'expliquer par l'absence d'un accord approprié. Habituellement, lorsqu'il y a de fortes chances de trouver du pétrole, les sociétés pétrolières internationales sont prêtes à assumer tous les risques en retour d'une participation dans l'exploitation du gisement. Toutefois, il se peut que les perspectives d'une découverte ne soient pas assez bonnes, qu'un pays importateur de pétrole ne soit pas disposé à exporter une partie du nouveau gisement, qu'un pays éprouve des difficultés à accéder au marché du pétrole à cause de son emplacement géographique ou enfin, qu'une société pétrolière pressente des risques politiques. La compensation reçue doit tenir compte de toutes ces conditions. Il y a aussi une grande diversité de contrats. Toutefois, des recherches visant à faire le lien entre les diverses situations et des contrats optimums pourraient contribuer à faire augmenter les travaux d'exploration dans les pays en développement.

Mais il se peut aussi que des petits gisements, ou d'autres comportant un risque politique dans des pays en développement, ne soient pas explorés faute de trouver une société qui réunirait et vendrait les services nécessaires à cette fin. Le cadre permettant de combler cet écart institutionnel existe dans le programme d'action de Caracas (Dorado 1985) et Ross (1984) a donné bon nombre d'idées constructives dans le document qu'il a rédigé pour le Groupe. Selon nous, ce secteur offre de grandes promesses pour la recherche et l'action.

Prix et marchés du pétrole

Lorsque les prix du pétrole ont grimpé au début des années 70, on a facilement relié cette augmentation aux faibles estimations du rapport réserves-production. M. King Hubbert (1962) avait prédit dix ans auparavant la baisse de production du pétrole pour les années 70 en se basant sur la théorie voulant que la production de minéraux suive une courbe logistique; selon cette théorie, les coûts de production marginaux doivent s'élever progressivement une fois la capacité de production atteinte, et entraîner à leur suite les prix. En fait, comme l'ont montré les événements ultérieurs, les facteurs qui influencent les prix sont beaucoup plus complexes.

Premièrement, il n'est plus possible d'affirmer que la production de pétrole est faite en fonction des approvisionnements et que la demande s'ajuste en conséquence à ceux-ci. On a pu montrer que la demande devenait élastique par rapport aux prix, et bien que la substitution des combustibles, phénomène réversible, intervienne pour une bonne part de sa sensibilité aux prix, on constate un élément important d'augmentation dans l'efficacité de l'utilisation, phénomène ici irréversible. Le point de vue de Peter Odell (1984) ne paraît donc plus aussi fantaisiste aujourd'hui lorsqu'il affirme qu'une hausse continue des prix conduirait à l'abandon du pétrole avant son épuisement.

Deuxièmement, les coûts marginaux n'ont pas servi, et peut-être jamais, à dicter les prix du pétrole ; du reste, l'influence qu'exerce l'OPEP (Organisation des pays exportateurs de pétrole) sur les prix depuis 1973 n'a rien à voir avec les coûts. Plus récemment, on peut relier la baisse des prix à un accroissement de la participation sur le marché pétrolier international des pays extérieurs à l'OPEP, au déclin correspondant de l'influence de l'OPEP et enfin, à l'abandon par l'Arabie saoudite de sa politique de restriction de sa propre production qui visait à faire grimper les prix. Côté demande, on observe des acheteurs importants dont l'influence est peut-être plus discrète mais non moins réelle.

En dernier lieu, même si les coûts marginaux déterminaient les prix, ceux-ci afficheraient une hausse continuelle uniquement si toutes les réserves étaient connues et que l'on exploitait d'abord les plus économiques. Nous sommes loin de cette réalité. La possibilité existe toujours de trouver de nouvelles réserves exploitables à bon marché, comme on l'a observé au Mexique au cours de la dernière décennie. En outre, l'exploitation de réserves pétrolières se fait toujours en sachant que l'on devrait trouver de nouvelles réserves, sans presque rien débourser, pendant quelques années après la mise en valeur d'un gisement. En effet, la production démarre dès que les travaux exploratoires ont reconnu des réserves minimales nécessaires et les renseignements constamment recueillis pendant la production permettent à la longue de déterminer toutes les réserves récupérables, qui sont presque invariablement supérieures à celles que l'on avait confirmées au début. Enfin, même si l'on connaissait toutes les réserves et leur coût d'exploitation, certains pays s'emploieraient à mettre en valeur leurs propres réserves à des coûts élevés, pour des raisons de sécurité ou de balance des paiements.

Complexité et changement caractérisent donc la structure du marché pétrolier international. Tout pays en développement qui importe ou exporte du pétrole aura donc intérêt à prévoir le comportement des prix et, pour cette raison, trouvera utile d'accroître ses connaissances du fonctionnement du marché pétrolier.

Les alcools

Parmi les substituts liquides des produits pétroliers, deux alcools, le méthanol et l'éthanol, ressortent comme les candidats les plus prometteurs. Leur densité énergétique est beaucoup moins grande que celle des combustibles à base de pétrole — 19,9 GJ/t pour le méthanol et 26,8 GJ/t pour l'éthanol en comparaison de 44 GT/t pour l'essence et 43 GJ/t pour le carburant diesel. Il en faudrait donc une plus grande quantité pour parcourir la même distance et le même volume de ces produits dans le réservoir d'un véhicule donnerait un kilométrage inférieur. Cependant, leur indice d'octane élevé signifie qu'on peut les utiliser directement comme combustible dans des moteurs à compression plus élevée, avec une efficacité supérieure à ce

que laisse croire leur contenu énergétique; l'éthanol pur devrait donc atteindre une efficacité supérieure de 20 % à celle indiquée par sa teneur énergétique dans un moteur à haute compression (Banque mondiale 1980b). Ces deux alcools sont très solubles dans l'eau et donc difficiles à isoler de ce milieu. Utilisés seuls, ces deux combustibles peuvent tolérer une certaine quantité d'eau mais on doit les rendre anhydres si on les mélange avec l'essence.

Malgré ces restrictions, les deux produits seraient des candidats sérieux comme combustibles de remplacement dans les véhicules si le prix du pétrole montait de façon marquée. En effet, comme ce sont des produits liquides, ils coûtent moins cher à manipuler et à transporter que des combustibles solides ou gazeux. Les combustibles pétroliers ont dominé le transport routier malgré le coût moins élevé du gaz naturel par unité d'énergie en Amérique du Nord; l'une des raisons est que le réseau de distribution a été conçu pour des combustibles liquides et qu'il a approvisionné un stock important de véhicules fonctionnant à l'essence. Il devenait impossible pour le gaz de pénétrer le marché à cause des coûts élevés à l'entrée. Si le prix du pétrole augmentait encore plus, il serait plus facile pour les alcools que pour les combustibles gazeux d'accaparer une part du marché.

Le méthanol sert déjà à la fabrication d'additifs pour l'essence à indice d'octane élevé. Le méthanol et l'éthanol accroissent tous deux l'indice d'octane de l'essence s'il y sont ajoutés en petite quantité (entre 5 % et 15 % environ) et sont préférables aux additifs à base de plomb ou à d'autres procédés de raffinage à cette fin. C'est là le meilleur usage auquel on peut destiner les alcools dans les combustibles automobiles et même à l'heure actuelle, ils se justifient économiquement dans bon nombre de circonstances. On peut les utiliser en plus forte proportion (15 % à 20 %) pour diluer l'essence sans qu'il soit nécessaire de modifier les moteurs. Dans ce cas, il importe de savoir si leur coût est inférieur à celui de l'essence. Une pénurie de devises étrangères peut justifier leur tarification au prix de référence dans des conditions locales. Si ces combustibles deviennent meilleur marché ou rentables sur le plan économique, le fait de construire des moteurs pouvant les recevoir sans mélange tant et aussi longtemps que la demande sera assez forte se justifiera également.

Méthanol

Le méthanol a longtemps servi comme solvant et comme produit intermédiaire dans la fabrication de l'acide acétique et d'autres produits chimiques, et il continue d'être un excipient. On le produit surtout à partir de naphte ou de gaz naturel. Étant donné qu'il peut être produit à partir du gaz naturel, il constitue un substitut idéal de l'essence. En effet, si les pays industrialisés ont besoin d'un substitut de l'essence, celui-ci devra être produit en très grande quantité alors qu'un substitut tiré de la biomasse ne saurait être produit en quantité suffisamment grande sans y consacrer de vastes superficies agricoles (Smil 1983). De tels produits de remplacement trouveront leur place dans les pays qui disposent d'importantes superficies de terres arables par habitant et pourront devenir plus viables à mesure que les combustibles liquides seront utilisés avec plus d'efficacité. Cependant, pour les pays industrialisés dans l'ensemble, le méthanol produit à partir du gaz naturel demeure d'un intérêt considérable.

La mise au point par la firme Mobil Oil Corporation d'un processus de fabrication de l'essence à partir du méthanol a fait accroître l'intérêt dans ce dernier produit. Le procédé est relativement simple et comporte un faible coût énergétique.

On l'a utilisé en Nouvelle-Zélande dans une usine de fabrication d'essence à partir de gaz naturel d'une capacité de 14 500 barils par jour. Des expériences ont également eu lieu avec un procédé à lit fluidisé un peu plus efficace en Europe et aux États-Unis (Banque mondiale 1982a).

À l'heure actuelle, la transformation du gaz de synthèse est dominée par un procédé à haute température et à pression élevée. Les coûts en capital sont énormes et les économies d'échelle importantes jusqu'à des capacités de 2 000 à 2 500 tonnes par jour ou 0,6 à 0,75 million de tonnes par année (Humphreys 1977). Un pays aurait donc à consommer entre trois et quatre millions de tonnes d'essence par année pour songer à produire du méthanol à mélanger. Si un pays décide d'utiliser le méthanol non dilué dans des moteurs conçus spécialement à cette fin, il lui faudra importer des voitures fonctionnant au méthanol et donc, attendre leur commercialisation ailleurs — ou les fabriquer et les mettre lui-même sur le marché. D'une façon ou d'une autre, seul un pays consommant de grandes quantités d'essence sur son territoire pourrait décider de substituer le méthanol à l'essence. Cela restreint donc cette possibilité à environ une demi-douzaine des plus grands pays en développement (ou d'une combinaison de petits pays).

On peut également produire le méthanol par gazéification du bois, processus d'ailleurs utilisé jusqu'à l'apparition d'hydrocarbures meilleur marché. Cette technique subit actuellement une modernisation (Reed 1981 ; Egnéus et Ellegärd 1985). Il se peut aussi que les progrès dans l'hydrolyse enzymatique améliorent le rendement du bois comme matière de production de l'éthanol, lequel est un combustible plus efficace pour l'automobile (Ostrovski et al. 1985 ; Saida et al. 1985). Cependant, la récolte de bois sur des superficies assez grandes pour alimenter une usine de méthanol serait coûteuse, sans compter que le bois a d'autres utilisations dans l'industrie du bois de construction et du papier. Les expériences sur la production de méthanol à partir de bois se poursuivent mais il semble peu probable que ce processus vienne concurrencer à l'échelle internationale la production de méthanol à partir de gaz. Il faudra donc examiner plus étroitement les procédés qui s'offrent à chaque emplacement avant de pouvoir recommander des investissements majeurs dans la recherche sur la production de méthanol à partir du bois ; de tels projets s'avéreront probablement réalisables uniquement si le taux de change de référence est élevé.

Éthanol

Il y a aujourd'hui bien peu de pays en développement qui possèdent des gisements de gaz naturel sans avoir découvert des réserves pétrolifères, et bien peu parmi eux dont la balance des paiements est tellement déficitaire qu'ils doivent songer à remplacer l'essence par le méthanol. À l'exception de ces derniers cas, l'éthanol offre de meilleurs débouchés que le méthanol. Il existe un procédé établi pour sa fabrication à partir de la biomasse, et ce procédé de fermentation offre des économies d'échelle beaucoup plus importantes que pour le méthanol. Il ne semble pas y avoir d'économie d'échelle marquée au-delà de 240 000 litres par jour (environ 200 tonnes par jour), capacité normale des nouvelles distilleries installées au Brésil. Le procédé s'inspire de celui utilisé pour la fabrication du rhum, auquel bon nombre de pays en développement recourent et qu'ils comprennent bien (Rolz et al. 1983). Bien que la fabrication de rhum et d'éthanol se limite aux pays producteurs de canne à sucre, beaucoup d'autres pays en développement font la fermentation d'autres charges et il est possible de cultiver sous diverses conditions agraires des produits riches en sucre appropriés à la fabrication d'éthanol — surtout

du maïs, du sorgho doux et du manioc. Dans les pays qui manquent de terres arables, les produits entrant dans la fabrication de l'éthanol doivent concurrencer les autres cultures. Lorsqu'il s'agit de cultures vivrières et que le pays accorde une place importante à la sécurité alimentaire, il favorise moins une répartition des terres destinées à la culture des produits servant à la fabrication de l'éthanol — et de fait, de bon nombre de cultures non vivrières, y compris le bois de combustible, le bois de construction et le papier. Dans ces conditions, la production de cultures non vivrières repose sur un accroissement de la productivité totale de la biomasse sur le territoire.

La rentabilité de l'éthanol comme combustible dans les véhicules semble plus favorable au Brésil qui en a subventionné la commercialisation au départ, et au Zimbabwe (Goldemberg et al. 1984; Kahane 1985; Wenman 1985). Ailleurs, les perspectives semblent moins s'y prêter (voir Koide et al. 1982). Toutefois, il existe une base de production de l'éthanol au Brésil et dans d'autres pays, pour les besoins de l'industrie des boissons et des produits chimiques. Les portes sont donc largement ouvertes à une expérimentation des procédés, qui semble montrer des avenues prometteuses. Nous indiquons ci-dessous les principales.

Diminution du coût des matières premières Étant donné que la matière première est le principal élément de coût, une diminution de ce coût accroîtrait grandement la rentabilité de l'alcool. Le transport de la matière première constitue une composante importante de ce coût que l'on peut réduire en augmentant le rendement des plantations de canne à sucre. On effectue des recherches dans ce domaine surtout au Brésil à l'heure actuelle.

Accroissement de l'utilisation de la capacité des usines La canne à sucre est une culture saisonnière qui peut approvisionner une usine pendant tout au plus six mois de l'année; plus la saison se prolonge et que la récolte de sucre diminue, plus les risques de maladie et d'incendie augmentent. On a proposé divers moyens d'améliorer l'utilisation de la capacité. L'un consiste à réduire en copeaux et à sécher la canne pour pouvoir l'utiliser toute l'année, comme dans le procédé EX-FERM (Jenkins et al. 1982). Dans un autre, on concentre et on entrepose du jus de canne. Enfin, dans un troisième, on combine la canne à sucre et le sorgho comme matières premières (Instituto de Pesquisas Technológicas 1981).

Amélioration des procédés Les progrès observés dans les opérations chimiques de fermentation sont sur le point de déboucher sur des enzymes plus efficaces faisant appel à l'immobilisation des cellules (Tokuyama 1984) et à des réacteurs à lit fixe (de Cabrera et al. 1982).

Chapitre 7 Les combustibles gazeux

La faible densité énergétique des gaz de combustion rend leur entreposage et leur transport coûteux. Lorsqu'on les produit à partir d'une biomasse volumineuse, on doit alors les exploiter sur une petite échelle dans des marchés locaux. Toutefois, le gaz naturel nécessite des investissements majeurs qui ne peuvent se justifier qu'en trouvant d'abord un marché d'écoulement important et en mettant en place un réseau de distribution.

Les chances de découvrir du gaz naturel sont meilleures que celles du pétrole, d'où l'intérêt que les pays en développement manifestent à son exploration. Dès que l'on en trouve, sa mise en valeur nécessite des recherches considérables dans un certain nombre de domaines, qui doivent ensuite être synthétisées avant de procéder à des investissements ; il s'agit notamment de la recherche sur la gestion des réserves, le marché, la technologie, les finances et les accords contractuels. En tout premier lieu, il importe de trouver des marchés concentrés importants pour écouler le gaz puisqu'après coup, le produit peut s'utiliser dans les véhicules et les résidences. Toutefois, comme combustible automobile, il est probablement préférable de le transformer en un combustible liquide comme le méthanol ou l'essence.

Bien que l'on ait déjà construit des millions d'usines de biogaz, dont un grand nombre éprouvent des difficultés de fonctionnement, il y a encore bien peu d'études diagnostiques effectuées de façon systématique à l'égard de leur exploitation. La mise au point du biogaz a présenté d'étroites affinités avec les animaux en stabulation ; il faudra mieux comprendre son rapport avec les systèmes agraires pour pouvoir en diffuser l'utilisation. Les avenues de la recherche sur la technique du biogaz sont prometteuses, notamment l'immobilisation des cellules et les procédés en deux étapes.

C'est au dix-neuvième siècle qu'a commencé la production de gaz de gazogène à partir de charbon dans de grandes usines et le processus a survécu dans quelques pays industrialisés jusque dans les années 60. Récemment, les pays en développement ont manifesté un intérêt envers des gazogènes à biomasse, qui présentent des problèmes d'ordre différent. Le gaz de gazogène est extrêmement sensible à la concurrence et son coût repose largement sur le prix du bois ou du charbon de bois utilisé dans sa production ; une recherche sur la diminution du coût de ces produits accroîtrait les débouchés du gaz de gazogène. Les travaux de recherche sur les gazogènes sont considérables mais il importe d'en diffuser les résultats et de les appliquer à chaque pays. Dans le cas des gazogènes déjà sur le marché, la recherche diagnostique sur leurs défauts a conduit à des améliorations et à une structuration de leur procédé de fabrication de manière à réduire au minimum les imperfections. L'un des principaux objectifs de la recherche conceptuelle devrait viser à diminuer les compétences requises pour le fonctionnement du gazogène.

On peut fabriquer l'hydrogène par reformation à la vapeur de gaz d'hydrocarbures ou de pétrole ainsi que par électrolyse de l'eau. Quel que soit le mode de production, l'hydrogène est peu susceptible de concurrencer les combustibles fossiles tant que ceux-ci demeureront bon marché. Toutefois, si l'on interdit l'utili-

sation des combustibles fossiles pour des raisons environnementales, l'hydrogène pourra accaparer certains marchés. Deux de ces utilisations prometteuses consistent en l'entreposage d'énergie dans les usines, afin de répondre aux demandes de pointe, ainsi que dans les véhicules terrestres et marins à grand rayon d'action. Ces applications sont toutefois éloignées, au moins jusqu'à ce que les pluies acides et le réchauffement global nous causent beaucoup plus de souci qu'à l'heure actuelle. En attendant, les pays qui possèdent une bonne source d'énergie hydro-électrique, qui font face à des problèmes de balance de paiements ou qui ne jouissent pas de réserves importantes de charbon et de pétrole pourraient recourir à l'hydrogène.

Les combustibles gazeux possèdent une faible densité énergétique par unité de volume. On peut accroître cette densité par compression ou refroidissement, mais ces opérations supposent des coûts. En conséquence, leurs coûts d'entreposage, de manutention et de transport sont élevés lorsqu'on les compare à leur valeur. Il est plus économique de les consommer près des usines de production, dans l'état où ils en sortent. L'avantage d'une consommation locale et à petite échelle devient plus marquée lorsque les combustibles gazeux sont produits à partir de la biomasse, comme le bois et les résidus animaux qui ont des coûts de transport élevés par unité de valeur; de tels gaz conviennent donc particulièrement bien aux applications décentralisées et de faible envergure. Toutefois, on ne peut souvent éviter une production de gaz naturel à grande échelle en raison des investissements nécessaires; il faut alors lui trouver un débouché important et investir dans son réseau de transport et de distribution.

Le gaz naturel

Au chapitre précédent, nous avons mentionné que les hydrocarbures se formaient à de très grandes profondeurs dans la terre et qu'ils migraient ensuite vers la surface par les fissures de la croûte terrestre. Cette théorie aurait beaucoup plus d'impact sur une prévision de la disponibilité finale de gaz naturel que de pétrole, puisque la plupart des hydrocarbures ainsi formés se présenteraient sous forme de méthane dont les réserves seraient beaucoup plus importantes que ne le laissent entendre les estimations actuelles. Cette théorie influerait aussi sur l'emplacement éventuel de ces réserves qui se situeraient à des profondeurs beaucoup plus grandes que les gisements de gaz que l'on a jusqu'ici prospectés en long et en large. S'il y avait vraiment de tels gisements sous terre, leur coût d'exploitation serait beaucoup plus élevé, mais les approvisionnements pourraient durer beaucoup plus longtemps. Pour prouver l'existence de ces ressources, il faut faire appel à la géophysique et à la géochimie. Peu importe que les pays en développement participent ou non à la recherche nécessaire, ils ont néanmoins un intérêt considérable à en surveiller les progrès.

La théorie du gaz enfoui sous terre s'écarte des principes traditionnels de la géologie pétrolière qui attribuent l'origine du pétrole et du gaz à des plantes et organismes enterrés sous la croûte de la planète (North 1982). Cependant, la géologie pétrolière accepte la possibilité que du gaz tire son origine de roches magmatiques. On sait également que les conditions nécessaires à la formation du gaz sont plus générales encore. Toute matière organique peut libérer du gaz lors-

qu'elle est enfouie à une grande profondeur sur une période assez longue, mais la capacité de produire du pétrole varie selon la matière organique (Tissot et Welte 1984). On peut donc trouver le gaz en plus grande quantité que le pétrole et dans des formations géologiques plus diverses. En moyenne donc, les pays en développement ont une meilleure chance de trouver du gaz que du pétrole — ces chances étant fonction, bien sûr, des différentes formations géologiques présentes.

Dès que l'on découvre des réserves, on doit alors décider s'il faut ou non les mettre en valeur, à quel moment et à quel rythme. Cette décision doit souvent reposer sur une analyse et des renseignements considérables, car la rentabilité de l'exploitation gazière est habituellement moins favorable et plus incertaine que celle du pétrole. En effet, la plupart des pays en développement se sont dotés d'un réseau de distribution du pétrole qui leur fournit un marché de base, même si celui-ci peut ne pas être très étendu. Lorsque l'on découvre du gaz, on doit aménager un réseau de distribution qui nécessite beaucoup plus de capitaux que dans le cas du pétrole en raison du coût plus élevé des installations d'entreposage, de manutention et de transport et de la faible densité énergétique du gaz. Si l'on construit un gazoduc, il devra pouvoir alimenter un marché suffisamment grand pour absorber la production. On peut étendre le marché en raccordant de nouveaux usagers, mais pour diminuer les capitaux nécessaires à son transport, il faut d'abord constituer un petit nombre d'abonnés grands consommateurs. Dès que le gazoduc est en place, l'approvisionnement des usagers s'effectue sur une longue période; et si l'on veut que l'exploitation produise un rendement raisonnable pendant cette période, il conviendra d'établir d'avance le prix que les acheteurs devront payer. En dernier lieu, le gaz peut habituellement être remplacé par des produits assez semblables dans bon nombre d'utilisations et sa rentabilité fluctuera en fonction du prix relatif de ces derniers. Il en ressort donc que les investissements élevés, l'intensité capitalistique, le petit nombre d'acheteurs et la présence de produits de remplacement confèrent ensemble une extrême importance au processus de planification dans cette industrie; qui plus est, les plans que l'on dresse nécessitent des recherches dans cinq domaines interdépendants.

Épuisement et gestion des gisements Ce secteur nécessite la mise en place d'une politique nationale d'exploitation des ressources liée aux aspects techniques de la gestion des gisements.

Le marché Il faudra recueillir des renseignements sur les principaux acheteurs éventuels, les quantités qu'ils peuvent acheter et les prix qu'ils peuvent payer. Le prix dépendra à son tour des prix des produits de remplacement auxquels les acheteurs auront accès. Malgré l'incertitude de ces facteurs, il n'en est pas moins nécessaire de calculer les meilleures estimations possibles (Julius 1985).

Coûts et échelle de production À l'instar de l'électricité, le gaz doit faire l'objet d'une planification technique détaillée qui entraîne des problèmes plus complexes en raison des incertitudes des marchés et des géologues.

Investissements et finances Il faudra presque toujours préparer une analyse financière à cause de l'ampleur des investissements nécessaires. Étant donné que les possibilités de financement reposent sur le rendement de l'investissement et sa fiabilité, une étude de marché et une planification du projet constitueront des atouts importants lors de la prise de décisions financières (De Vallée 1985).

Accords économiques–juridiques Étant donné que l'exploitation de projets gaziers engage les vendeurs, les acheteurs et les financiers pour une longue période, la rédaction des contrats qui les lieront est un processus complexe qui nécessite une coordination et qui laisse place à l'ingéniosité (Colitti 1985).

L'exploitation de gisements de gaz suppose donc la synthèse d'une recherche approfondie avant de pouvoir procéder à des investissements. Presque toute cette recherche est indispensable et sa qualité pourra faire toute la différence dans la viabilité d'un projet d'exploitation à cause des risques qu'il comporte habituellement et des autres formes de concurrence. Dès que l'on commence à mettre en service le gaz produit, il est plus facile de trouver de nouveaux usagers et de nouvelles applications; la qualité de la recherche prend donc une importance particulière pendant la période initiale d'exploitation, dans laquelle se retrouvent bon nombre de pays en développement.

Certains pays éprouvant des difficultés à importer du pétrole en quantités suffisantes envisagent la possibilité de remplacer le pétrole par le gaz dans le transport automobile et le secteur résidentiel bien que le gaz se prête difficilement à cet usage. Le propane et le butane, qui affichent un point d'ébullition élevé, sont mis en bouteilles et destinés à un marché restreint comme combustibles de cuisson ou d'automobile. Mais ils ne constituent qu'une faible partie du gaz naturel; la principale composante est le méthane, dont le point d'ébullition est si bas qu'il n'est pas rentable de le liquéfier sauf lorsqu'on le transporte sur de grandes distances dans des méthaniers.

À défaut de liquéfier le méthane, sa compression est la meilleure solution. Si on le comprime à 16,55 MPa (ce qui nécessiterait des conteneurs épais et lourds), un véhicule ne parcourrait que le tiers de la distance permise avec une alimentation à base d'hydrocarbures. L'emploi de gaz naturel comprimé dans les véhicules nécessite plus de postes de remplissage que l'essence et un réseau de distribution plus dense. Dans un usage domestique, il n'est pas nécessaire — on doit même s'en abstenir — de comprimer le gaz naturel à ce point, mais il faut alors mettre en place un réseau de distribution beaucoup plus étendu. Ainsi, les utilisations dans l'automobile et les résidences commandent des investissements massifs dans un réseau de distribution, qui s'ajoutent au coût du gaz. L'exploitation d'un gisement de gaz dans un nouveau secteur serait rarement justifié s'il était destiné à ces deux fins particulières, surtout dans un pays en développement où les populations à faible revenu restreignent la demande de ce produit. Toutefois, dès qu'on a commencé la production et mis en place le réseau de distribution, il peut devenir plus économique d'étendre les utilisations du gaz aux véhicules et aux résidences urbaines.

L'investissement dans le réseau de distribution atteindrait des sommes beaucoup plus considérables si l'on transformait le gaz en un combustible liquide, notamment le méthanol ou l'essence à partir de méthanol, comme on l'a vu au chapitre précédent. C'est une avenue pleine d'avenir pour les pays qui songent à alimenter leurs automobiles au gaz.

Le biogaz

La biogazéification est un procédé extrêmement polyvalent servant à transformer une biomasse inférieure en un combustible à faible teneur calorifique. Ce procédé a d'ailleurs fait l'objet d'expériences très poussées dans les pays en développement (Brown et Tata 1984). C'est également l'une des techniques d'énergie renouvelable les plus populaires dans les pays en développement (outre l'hydroélectricité et les biomasse). Bien que l'on puisse compter par millions les installations de biogaz dans le monde, bien peu de recherches ont été effectuées sur leur exploitation. Il existe bien des observations disséminées sur la proportion d'installa-

tions en panne, des observations plus courantes sur les fuites de gaz et une impression générale de leur productivité très variable. Des diagnostics statistiques à l'égard des installations actuelles fourniraient des renseignements plus fiables sur les lacunes de leur fonctionnement et amèneraient les utilisateurs à prendre les mesures appropriées.

Seules l'Inde et la Chine ont adopté sur une grande échelle le processus de biogazéification. Les deux pays semblent montrer une concentration géographique considérable de ce genre d'installation dans les secteurs comptant un effectif élevé d'animaux en stabulation — des porcs en Chine et du bétail en Inde. Selon toute apparence, un troupeau de bétail important, comme il y en a dans d'autres parties de l'Inde ainsi que dans les régions d'Afrique du Nord et d'Asie occidentale, ne suffit pas; la stabulation joue un rôle. Cette situation s'explique en partie par l'énorme main-d'oeuvre qu'il faut affecter au ramassage de la bouse des animaux en pacage. Plus important encore, ces animaux dépensent tellement d'énergie au pâturage que la quantité de lisier qu'ils expulsent pour le même volume de fourrage est très inférieure à celle des animaux engraissés en étable. Si tel est le cas, l'expansion accrue du biogaz devra attendre des changements dans les pratiques d'élevage. Une recherche s'impose sur cette relation entre le biogaz et les systèmes agraires.

Ce lien entre le biogaz et la stabulation laisse croire que ce produit pourrait être un dérivé particulièrement approprié pour les entreprises laitières. Des usines de biogaz existent déjà dans des entreprises de production laitière de certains pays industrialisés ainsi qu'en Inde; la contrainte semble provenir de la demande de biogaz. Il importe d'examiner les possibilités de production de biogaz dans les entreprises laitières des pays en développement, puisque ces entreprises seraient alors en mesure d'exploiter les économies d'échelle des biogazogènes.

Outre les coûts de ramassage, c'est le coût du digesteur qui représente l'investissement en capital le plus important, et les chercheurs ont essayé de le diminuer de deux façons : par un abaissement des coûts de construction ou de fabrication (voir Stuckey 1983), par une optimisation de la conception (voir Subramanian et al. 1980) et par une accélération de la production de substrats et un accroissement des gaz libérés (Advisory Committee on Technology Innovation 1977). Les tentatives visant à réduire les coûts de fabrication sont monnaie courante dans les pays en développement puisqu'elles supposent pour la plupart une modification au niveau de la conception ou des matériaux. En revanche, dans les pays industrialisés, la production de biogaz prend une importance secondaire et le processus de biogazéification sert habituellement à la biodégradation des effluents agricoles et industriels afin de les rendre inoffensifs. D'où l'accent mis sur la maximisation de la production de substrats et l'accélération des réactions (Klass 1982).

Récemment, les chercheurs ont fait des progrès importants dans l'identification des micro-organismes participant au processus de biogazéification, ainsi que du rôle et des facteurs de leur croissance; et dans la compréhension des procédés en cause dans la biogazéification. Ils proposent deux avenues possibles pour accroître la productivité de biogaz.

- Les techniques d'immobilisation des cellules permettent d'observer et d'accélérer l'activité micro-organique, de cultiver des micro-organismes à l'extérieur et de les introduire ensuite dans les digesteurs.
- Le premier stade de l'hydrolyse ne nécessite pas un milieu anaérobique et peut être effectué dans les conditions ambiantes. On tend donc vers un procédé à deux volets : l'acidogenèse a lieu dans un premier réacteur après quoi le substrat passe dans un second réacteur pour y subir une méthano-

genèse anaérobique. Jusqu'ici, les expériences de ce type ont été effectuées sur un substrat renfermant très peu de matières solides; il reste encore à déterminer si le procédé fonctionnera aussi bien avec le genre de substrat utilisé habituellement dans les pays en développement, c-à-d. ayant une forte teneur en matières solides. Il reste aussi à établir si un procédé à deux volets augmenterait suffisamment la productivité pour justifier l'achat d'un réacteur supplémentaire.

Les progrès de la technique de gazéification anaérobique semblent donc particulièrement prometteurs en ce qui concerne l'immobilisation des cellules et la gazéification à deux étapes.

Le gaz de gazogène

Le gaz de gazogène est un mélange à faible teneur calorique d'oxyde de carbone et de méthane avec des gaz non combustibles (surtout de l'azote et de l'anhydride carbonique); lorsqu'il est produit à partir de la biomasse, il renferme aussi une quantité importante d'hydrogène. On le fabrique facilement par la combustion d'un combustible carbonique pauvre en oxygène. Kaupp et Goss (1984) datent l'apparition de ce gaz à 1669 et le premier brevet à 1788. Au dix-neuvième siècle, on le produisait en grande quantité à partir de charbon pour l'éclairage des rues ainsi que pour la cuisson et l'éclairage domestiques dans les pays industrialisés. À la fin du dix-neuvième siècle, on remarque plusieurs inventions axées sur la mise au point d'un petit gazogène portatif pour utilisation sur le terrain. Le moteur Otto devait à l'origine servir à produire du gaz de gazogène pour faire fonctionner des arbres de transmission. Les applications de ce gaz sont également parvenues aux pays en développement, surtout aux colonies britanniques et françaises. À partir des années 1870, toutefois, il perd un à un les marchés qu'il avait conquis. L'électricité le remplace dans l'éclairage, et le pétrole, dans les petits moteurs. Dans le secteur résidentiel, l'avènement du kérosène bon marché lui soutire les nouveaux usagers, mais dans les pays producteurs de charbon, il fait meilleure figure dans ce secteur en raison des gazoducs déjà en place. Dans ses applications domestiques aux États-Unis, le gaz naturel le remplace à partir des années 30 et dans les pays d'Europe de l'Ouest, à partir des années 60. À l'heure actuelle, on s'en sert uniquement comme gaz de haut-fourneau et de four à coke dans les usines sidérurgiques.

Sa possibilité de remplacer d'autres combustibles et la simplicité de sa technique de production ont attiré l'attention sur le gaz de gazogène toutes les fois qu'il y avait rareté ou hausse des prix des combustibles concurrents. Pendant la Seconde Guerre mondiale, les pays qui avaient été durement frappés par le bloc allié — surtout l'Allemagne, la France, le Japon et la Suède — ont converti sur une grande échelle la source d'alimentation de leurs véhicules routiers (National Research Council 1983b). Après l'ascension des prix du pétrole en 1973, un grand nombre de petits producteurs ont fait leur apparition au Brésil, fournissant des gazogènes à charbon pour les véhicules, les pompes, les génératrices, etc., après 1978. Aux Philippines, une société d'État a commencé à vendre des gazogènes pour les pompes, bateaux et véhicules (Scharmer et al. 1984).

L'expérience nous révèle que le gaz de gazogène est extrêmement sensible à la concurrence. Pour pouvoir investir dans sa recherche, il faudra identifier des débouchés prometteurs et relativement stables à ce gaz.

Le gaz de gazogène ne peut jamais être aussi bon marché que ses propres matières premières (sauf lorsqu'il devient un dérivé inévitable, comme dans les hauts-fourneaux et les fours à coke) et ne peut donc jamais les concurrencer lorsque celles-ci peuvent être utilisées directement. Deux secteurs ne peuvent employer directement ces matières : les moteurs à combustion interne et, en deuxième lieu, les activités comme la fabrication de la céramique et du verre, où il y aurait contamination du produit. Dans ces cas, la compétitivité du gaz de gazogène repose — mais seulement en partie — sur les coûts touchant principalement le combustible, le matériel et la main-d'oeuvre. Il y a deux grandes catégories possibles de combustible — le charbon et la lignite, ou le bois, le charbon de bois et la biomasse.

Dans les pays producteurs de charbon, le gaz de gazogène sera toujours prêt à remplacer le pétrole si celui-ci devient rare ou trop coûteux. Après la hausse des prix du pétrole en 1973, les États-Unis et la République fédérale allemande ont orienté leurs travaux de R&D vers l'utilisation possible du gaz de gazogène comme matière première dans la fabrication de méthanol, un substitut de l'essence (Scharmer et al. 1984). Le charbon et la lignite étaient des combustibles primaires, mais lors des études de marché préalables à l'utilisation du procédé dans les pays en développement, on a également mis à l'essai d'autres combustibles comme le bois, la tourbe et la bagasse (voir Bellin et al. 1984; Baudequin et al. 1984). Ici, le gaz de gazogène concurrence le gaz naturel, et le méthanol, d'autres combustibles liquides produits à partir du charbon et du gaz. À la lumière des perspectives mondiales favorables concernant l'approvisionnement à long terme de gaz naturel, cette avenue de la recherche conviendrait uniquement dans les pays producteurs de charbon qui s'attendent à éprouver pendant longtemps de graves problèmes dans leur balance des paiements. Sa pertinence à l'égard des gazogènes portatifs fonctionnant à la biomasse, qui a fait l'objet d'une recherche dans les pays en développement et à l'intention de ces derniers, est cependant limitée.

L'énergie tirée de la biomasse présente une image différente du fait que ses coûts varient énormément d'une localité à l'autre. Ces coûts sont particulièrement bas lorsque la biomasse devient un sous-produit, par exemple dans les rizeries, les scieries et les sucreries, auquel cas on peut trouver un débouché pour son usage captif comme source d'entraînement des arbres mécaniques, bien que sa compétitivité à cet égard dépende de la disponibilité et du coût de l'électricité. Ailleurs, son potentiel sera fonction de l'accès à un combustible bon marché traditionnel — habituellement le bois ou le charbon de bois. Bien que le bois constitue le combustible principal dans beaucoup de pays en développement et que le charbon de bois occupe une place importante dans d'autres, leur production devra s'accroître et leur coût baisser avant que le gaz de gazogène ne représente une option viable. Par conséquent, la recherche sur la biomasse, et plus particulièrement sur la production de bois, aura priorité dans ces pays.

Les coûts du matériel peuvent également fluctuer énormément et dans la mesure où les petites usines fonctionnent surtout avec de la main-d'oeuvre, ils peuvent être inférieurs dans les pays en développement. La popularité du gaz de gazogène au Brésil s'explique notamment par l'existence d'une capacité technique qui a amené une prolifération de fabricants. Là où l'on peut observer cette capacité, les coûts dépendraient également du volume de production et de sa répartition dans les divers modèles. Ainsi, dans les pays où s'amorce une production autochtone, la normalisation des modèles peut les aider à réduire les coûts et à les rendre plus fiables. À ce stade, une recherche diagnostique sur les gazogènes en utilisation et des travaux connexes sur la conception de ce genre d'appareil seraient tout indiqués. La recherche conceptuelle effectuée dans les pays industrialisés à la belle époque du

gaz de gazogène est considérable (Kaupp et Goss 1984). Il y a également eu beaucoup de recherche au cours des douze dernières années (Mahin 1984). Le partage de toute cette expérience accumulée permettrait d'économiser les ressources. La recherche conceptuelle nécessite une étude technique des applications et une adaptation aux usages, aux échelles et aux combustibles locaux plutôt qu'une innovation. Une fois les modèles normalisés, le produit devra aussi subir le même sort. En outre, il convient d'organiser les systèmes de production de manière à minimiser les imperfections dans la fabrication — ce qui constitue en soi un sujet de recherche.

Les coûts de main-d'oeuvre nécessaires à l'exploitation des gazogènes ne sont pas nécessairement élevés; s'il s'agit d'un véhicule conduit par son propriétaire, ces coûts sont négligeables. Toutefois, les gazogènes peuvent se dérégler de nombreuses façons. Quelques problèmes sont ennuyeux, d'autres sérieux voire même dangereux (Foley et Barnard 1982). Une bonne conception de l'appareil peut amenuiser les risques de panne. Même les meilleurs gazogènes nécessiteront un entretien fréquent et régulier, obligeant les opérateurs à faire et à ne pas faire certaines choses. Leur formation et leur compétence font donc une grande différence; et même lorsque la main-d'oeuvre est bon marché, la compétence et l'entretien peuvent se payer très cher. La recherche conceptuelle devra donc s'attacher principalement à diminuer le niveau de compétence requis pour faire fonctionner les gazogènes.

L'hydrogène

La connaissance de l'hydrogène remonte à Paracelse qui réussit à obtenir ce gaz en faisant réagir de l'acide sulfurique sur du fer pour ensuite en établir la combustibilité (Aureille 1984). Dans notre monde moderne, l'hydrogène est un produit chimique intermédiaire important utilisé dans la fabrication d'ammoniac destiné aux engrais azotés, dans le traitement hydrologique de l'huile minérale et dans la fabrication du méthanol.

L'hydrogène a suscité un intérêt généralisé après la hausse des prix du pétrole au début des années 70, pour plusieurs raisons. D'abord, il peut être facilement utilisé comme combustible de moteur et ainsi remplacer les produits pétroliers dans les véhicules sans qu'il soit nécessaire de modifier à fond le matériel mécanique. En deuxième lieu, on peut le produire à partir de l'eau qui existe en quantité énorme. Troisièmement, sa combustion donne de l'eau, sa matière première potentielle; on peut donc le recycler indéfiniment. Enfin, c'est un gaz à combustion non polluante qui n'a aucun effet néfaste sur l'environnement comme les combustibles fossiles. Sa combustion dans l'air produit des oxydes d'azote mais non des oxydes de soufre. Elle ne donne pas non plus de gaz carbonique dont les effets sur la température de la planète commencent à être une source de préoccupation.

La production massive d'hydrogène pour l'industrie chimique le rend facilement disponible pour l'expérimentation. Son avantage sur les combustibles fossiles en ce qui a trait à la pollution de l'environnement en fait un produit intéressant pour l'industrie de l'électricité, alors que son potentiel comme carburant suscite l'intérêt des fabricants de matériel de transport au moment où ceux-ci se préoccupent de la hausse des coûts des produits pétroliers. Qui plus est, l'hydrogène a servi de réactif dans les génératrices à piles alcalines installées à bord d'engins spatiaux américains et français (Srinivasan 1984; Doniat et Rouget 1984). Ainsi, à cause de l'intérêt

manifesté par des utilisateurs éventuels possédant d'immenses ressources au chapitre de la R&D, l'hydrogène en tant que source d'énergie est devenu l'un des secteurs les plus actifs de la recherche énergétique au cours de la dernière décennie. Il a éveillé l'intérêt du Brésil, de la Chine et de l'Inde parmi les pays en développement (Campos 1984; Mattos 1985; Li et al. 1984; Nema et al. 1984).

Toutefois, les chercheurs s'entendent généralement pour dire que l'hydrogène ne pourra concurrencer les combustibles de remplacement pendant au moins quelques décennies à venir. À l'heure actuelle, la méthode la moins coûteuse de production d'hydrogène est la reformation d'hydrocarbures par l'action de la vapeur; parmi les hydrocarbures couramment utilisés, mentionnons le gaz naturel (méthane et propane), les gaz de raffinerie et le naphte. L'hydrogène produit de cette façon coûtera inévitablement plus cher que les hydrocarbures à partir desquels on le fabrique. Ainsi, il ne peut concurrencer actuellement les combustibles pétroliers liquides, et lorsque ceux-ci deviendront plus coûteux, le processus de reformation de l'hydrogène à partir de la vapeur ne pourra tenir tête au gaz naturel; en effet, on peut utiliser le gaz naturel aussi facilement que l'hydrogène dans les moteurs et il est moins coûteux à transporter vu que le méthane, son principal constituant, dispense une énergie trois fois supérieure à celle de l'hydrogène gazeux par unité de volume (Gelin et Petit 1980; Fein 1982, 1985). Même à l'heure actuelle, l'hydrogène coûte moins cher que l'électricité aux États-Unis mais ne peut s'approprier aucun de ses marchés à cause des problèmes relatifs de transport et d'efficacité inférieure dans les utilisations finales (Gaines et Wolsky 1984).

L'hydrogène est donc peu susceptible d'émerger comme un combustible concurrentiel tant que le pétrole ou le gaz domineront le marché de l'énergie — sauf peut-être sur de petits marchés spécialisés comme la sidérurgie. Lorsque le coût du pétrole et du gaz augmentera, ces derniers produits seront probablement remplacés par le charbon à partir duquel on peut fabriquer un certain nombre de combustibles liquides et gazeux (y compris l'hydrogène). Parmi eux, l'huile synthétique et le méthanol seraient plus appropriés comme combustibles de transport. Leur état liquide et leur densité énergétique supérieure les rendraient moins coûteux à transporter et à entreposer; en outre, les calculs effectués nous laissent croire que le coût de ces combustibles serait peu élevé.

Ainsi, l'hydrogène ne pourra devenir un combustible concurrentiel tant que l'on n'assistera pas à une hausse marquée des coûts d'extraction du charbon — ce qui, en raison des énormes réserves mondiales de charbon, ne devrait pas survenir avant plusieurs siècles. Cependant, ce gaz pourrait occuper une place concurrentielle beaucoup plus tôt si des indications évidentes d'une dégradation de l'environnement amènent les pays industrialisés à restreindre la consommation de combustibles fossiles. Comme nous le verrons au chapitre 12, l'éventualité de cette situation et le moment de son apparition suscitent une controverse considérable; on observe également des positions diamétralement opposées sur le niveau acceptable de dégradation de l'environnement. Mais si l'opinion publique en vient à rejeter aussi durement les combustibles fossiles qu'elle l'avait fait à l'égard de l'énergie nucléaire dans certains pays industrialisés au cours des années 70, les débouchés de l'hydrogène comme combustible de remplacement devront s'accroître.

Lorsque cela se produira, la production d'hydrogène ne se fera pas à partir de combustibles fossiles, malgré leur coût peu élevé, étant donné que le procédé aurait des répercussions aussi néfastes sur l'environnement que toute autre méthode de combustion des combustibles fossiles. Il faudra donc produire l'hydrogène par électrolyse et on sait que tous les procédés connus nécessitent une quantité importante d'énergie (Bockris et al. 1985; Ohta et al. 1985). Pour être concurrentiel,

l'hydrogène devra donc pouvoir être produit à partir d'une source d'énergie abondante et bon marché. Trois de ces sources ont été proposées : l'énergie nucléaire, l'électricité produite en dehors des périodes de pointe et l'énergie solaire.

Théoriquement, il est possible de produire de l'énergie nucléaire en abondance, surtout si l'on commercialise des réacteurs nucléaires surgénérateurs. Outre la production d'électricité, ces réacteurs rejettent une quantité considérable de chaleur que l'on peut récupérer pour accroître l'efficacité du processus d'électrolyse. Si l'on abandonne graduellement la production d'énergie à partir de charbon pour des raisons environnementales tout en laissant intact le secteur nucléaire, ce dernier deviendra de toute évidence la source principale d'hydrogène.

Au cas où l'on ne pourrait produire l'hydrogène à partir du nucléaire ou de l'électricité, la question de ses applications prendra alors une place importante. Essentiellement, on en a proposé deux.

L'hydrogène comme vecteur énergétique La production d'hydrogène peut s'opérer en dehors des heures de pointe. On peut également l'obtenir dans les régions possédant une énergie excédentaire et le transporter par gazoduc jusqu'aux centrales afin de répondre à la demande non satisfaite. L'électricité produite à partir de l'hydrogène coûtera invariablement plus cher que l'électricité nécessaire à sa production, en raison à la fois des pertes de transformation et des coûts de production; la question de sa rentabilité dépendra alors de la différence de coût entre l'énergie produite pendant les périodes de pointe et en dehors de celles-ci. On constate très peu de recherche à caractère techno-économique sur ce sujet. Voici les conclusions que nous sommes amenés à tirer : un accroissement de la capacité des approvisionnements et de la production hydro-électrique est susceptible de coûter moins cher que la production d'hydrogène; l'utilisation directe de l'hydrogène constitue son mode de consommation le plus logique; si l'on abandonne l'idée d'accroître la capacité de production ou si un tel projet devient trop coûteux, le stockage de l'hydrogène est susceptible de présenter une facture moins élevée que d'autres techniques d'entreposage; et le stockage de l'hydrogène donne de meilleurs résultats sur une longue période, par exemple d'une saison à l'autre; sur une courte période, par exemple entre une journée et une semaine, le stockage à l'aide de pompes ou de piles pourra se révéler moins dispendieux (Carpetis 1984; Fein 1985). Toutefois, ces calculs comportent une foule de paramètres et de solutions de rechange et il faudra effectuer des recherches localisées pour connaître la viabilité de la technique de stockage de l'hydrogène.

Le transport de l'hydrogène peut se révéler moins cher que celui de l'électricité produisant une énergie équivalente, mais sa rentabilité actuelle repose dans une large mesure sur les distances à parcourir et sur l'application directe de l'hydrogène au lieu de destination. C'est le coût des combustibles de remplacement au point d'arrivée qui détermine la compétitivité du transport de l'hydrogène et de l'électricité. Dans ce cas-ci et comme pour le stockage, seules des études effectuées à des endroits déterminés permettront de connaître la viabilité du transport de l'hydrogène. Toutefois, il est clair que les premiers pays à bénéficier d'une telle recherche sont ceux qui possèdent déjà des ressources hydro-électriques abondantes dans des régions isolées, en l'occurrence le Brésil, le Canada et la Chine.

L'hydrogène comme combustible de transport Si l'électricité et l'hydrogène produit à partir d'électricité deviennent des sources principales d'énergie, l'hydrogène, malgré son coût plus élevé que l'électricité en termes d'énergie livrée, accaparera néanmoins une part importante du marché de l'énergie destinée aux transports. En effet, si le transport par véhicules particuliers, qui sont si nombreux

actuellement dans les pays industrialisés et même dans beaucoup de pays en développement, existe toujours lorsqu'arrivera l'époque de l'électricité-hydrogène, l'électricité ne leur sera pas transmise au moyen de lignes de transmission, comme c'est le cas avec les trains électriques : on devra l'entreposer dans des batteries à bord des véhicules. Les batteries sont lourdes et font augmenter la consommation d'énergie. On peut régler le problème sans toutefois l'éliminer en rechargeant les batteries plus fréquemment. Dans une ville dotée d'un excellent réseau de transmission, cela ne pose pas de problème puisqu'il suffirait d'équiper les endroits habituels de stationnement de prises d'alimentation. Étant donné qu'une batterie d'accumulateurs prend du temps à se recharger, elle limiterait la période utile de fonctionnement des véhicules et la durée des intervalles entre les charges. Là où ces contraintes deviendraient inacceptables, l'hydrogène représenterait le seul combustible valable. Au nombre des véhicules ne pouvant être astreints à de telles conditions, mentionnons les autobus, les camions de transport interurbains, les navires et les avions. Le marché du transport (autre que le transport ferroviaire) se répartirait donc en deux catégories : les petits véhicules de transport sur courte distance fonctionnant à l'électricité et les gros véhicules sur longue distance, à l'hydrogène.

La recherche sur l'hydrogène en tant que source d'énergie est un secteur d'activité intense et d'une extrême instabilité ; on ne peut en ce moment déterminer les avenues les plus prometteuses de la recherche. Si, comme on vient de le dire, il faut attendre encore quelques décennies avant que l'hydrogène n'occupe une place importante sur le marché comme combustible, il n'y a aucune urgence à entreprendre des recherches sur ce produit. Ces travaux de recherche pourront cependant être plus utiles pour les quelques pays qui possèdent de bons sites hydro-électriques, mais qui ne possèdent que de maigres réserves de combustibles fossiles et qui éprouvent des difficultés à équilibrer leur balance des paiements. Toutefois, l'attrait de l'hydrogène est étroitement lié aux répercussions néfastes des combustibles fossiles. Si la recherche sur l'effet de serre et sur les pluies acides nous amène à examiner de façon plus sérieuse et plus urgente la menace que posent ces deux phénomènes, l'intérêt dans l'hydrogène pour combustible non polluant s'accroîtra en conséquence.

Chapitre 8 Les combustibles solides

Les moteurs à combustion interne, qui alimentent la plupart des véhicules dans le monde, fonctionnent à partir de fractions d'hydrocarbures légers ; la demande pour ces hydrocarbures dans le secteur du transport dicte dans une large mesure le niveau de production de pétrole. Les autres fractions plus lourdes représentent principalement du mazout, produit concurrentiel du charbon. C'est donc la production de pétrole et, dans une moindre proportion, l'utilisation des produits pétroliers dans le transport qui restreignent la demande de charbon dans les pays industrialisés. La hausse des prix du pétrole a fait fléchir son utilisation dans le transport et augmenter celle du charbon qui demeure, cependant, toujours sensible aux aléas du pétrole et qui le restera pour l'avenir prévisible.

La production de charbon des pays en développement provient presque toute de Chine et d'Inde. D'autres pays en développement bénéficieraient d'une exploration plus intensive. Dans les pays charbonniers, l'adaptation de la technique aux conditions locales donne lieu à des améliorations ; en conséquence, il faudrait que les producteurs de charbon deviennent avant tout des acheteurs de matériel éclairés avant de commencer à adapter les innovations.

L'exploitation souterraine des charbonnages en Chine et en Inde repose sur une main-d'oeuvre abondante. L'introduction de la technique mécanisée d'exploitation par longues tailles a entraîné des problèmes particuliers qui nécessiteront des connaissances plus approfondies chez les utilisateurs, une interaction avec les fabricants de machines et le partage de l'expérience de chacun. La nouvelle technique appelle de nouvelles structures de gestion que la recherche peut aider à mettre en place. La préparation du charbon et le transport des schlamms présentent des problèmes bien particuliers pour la recherche.

Dans les agglomérations urbaines des pays en développement, on utilise énormément le charbon de bois pour des usages domestiques. Il sera possible d'en maintenir les approvisionnements sur une longue période uniquement s'il y a des plantations forestières qui viennent concurrencer d'autres applications agricoles. Pour que ces plantations soient concurrentielles tout en produisant à bas prix du bois pour le marché du charbon de bois, il faut accroître la productivité des terres. Cette production commerciale soutenue de charbon de bois doit s'appuyer sur une recherche afin d'augmenter les rendements du sol sur une grande échelle. Pour la fabrication sédentaire de charbon de bois, les fours fixes en maçonnerie demeurent la meilleure solution mais le procédé doit être amélioré et davantage répandu.

Lorsque des agglomérations urbaines utilisent le bois plutôt que du charbon de bois, on peut remédier à la pénurie de combustible de la même façon en augmentant la productivité du sol et en aménageant des plantations forestières près des villes. On peut également diversifier les formes d'énergie utilisées et s'efforcer de découvrir et d'engendrer de nouvelles essences d'arbres et d'arbustes pour l'approvisionnement en combustible.

Les combustibles solides constituaient la principale source d'énergie jusqu'au tournant du siècle. Quant à la biomasse, elle a fourni la plus grande partie d'énergie jusqu'à la révolution industrielle. À ce moment, la demande en énergie est devenue tellement forte et concentrée qu'il a fallu faire appel au charbon minéral pour combler l'excédent. Au 20e siècle, trois raisons expliquent les gains du pétrole sur les combustibles solides. En premier lieu, à l'encontre du charbon qui doit être extrait directement sous terre, le pétrole pouvait être amené à la surface par injection de gaz ou de fluides sous pression. Ainsi, les conditions favorables qui existaient au moment de la découverte du pétrole ont permis d'offrir le produit à bon prix. En deuxième lieu, le pétrole a une densité énergétique supérieure à celle du charbon. En termes de masse, sa densité énergétique est presque 1,5 fois celle du charbon de meilleure qualité. En termes de volume, l'écart est encore plus grand. Cela explique pourquoi ses coûts de transports étaient plus bas. En dernier lieu, le pétrole convenait bien au moteur à combustion interne. Il est donc devenu la principale source d'énergie motrice, surtout dans les véhicules. Seule une partie du pétrole peut donner des produits de raffinage pouvant alimenter des moteurs. On ne peut d'ailleurs accroître cette proportion que par des méthodes très coûteuses. Les produits qui ne pouvaient donc servir dans les moteurs — les mazouts résiduels — ont trouvé un usage direct comme combustible et ont fait concurrence aux combustibles solides.

Avec la montée des prix du pétrole, les pays industrialisés se sont surtout employés à réduire la demande en pétrole des principales sources motrices. Cette action a ralenti considérablement la croissance de la demande d'essence et de carburant diesel et, partant, la croissance des approvisionnements de son produit conjoint, le mazout, et amené un accroissement de la demande de charbon comme combustible de chauffage. Ce phénomène devrait s'étendre à l'échelle mondiale. La demande de carburants déterminera l'approvisionnement de mazout dont le prix sera ajusté pour lui trouver un débouché. À son tour, le prix du mazout dictera le prix maximum du charbon lequel imposera le niveau de production du charbon.

C'est ce mécanisme international qui assurera un débouché aux pays en développement qui désirent pénétrer le marché international du charbon (Wilson 1977; Greene et Gallagher 1980; Long 1982; Gordon 1984). Les pays qui consomment leur propre charbon pourront en établir le prix au-delà des niveaux internationaux s'ils éprouvent des problèmes dans leur balance de paiements, et accroître ensuite les utilisations intérieures. (Cela s'applique aussi bien aux pays auxquels s'offrent des débouchés favorables pour la production de bois de feu.)

Toutefois, il est peu vraisemblable que les combustibles solides trouvent une application importante comme carburant même dans ces pays. Pour ce faire, la seule solution est de les transformer en gaz de gazogène. Nous avons d'ailleurs abordé au chapitre 7 les débouchés du gaz de gazogène produit à partir de la biomasse. La gazéification du charbon donne lieu à des problèmes semblables si elle est effectuée sur une petite échelle. En outre, dans les utilisations restreintes, le gaz de gazogène concurrencerait l'électricité. L'électricité est habituellement meilleur marché, même par rapport au carburant diesel, dès que les lignes de transmission sont en place. Ainsi, même si le charbon minéral en vient à supplanter la biomasse comme combustible, cela ne changera pas notre évaluation des débouchés du gaz de gazogène à petite échelle.

À grande échelle, le gaz de gazogène produit à partir du charbon pourrait être utilisé dans le secteur domestique et commercial ainsi que pour la production d'énergie. Le premier marché (utilisation domestique ou commerciale) serait celui des agglomérations urbaines situées près des mines de charbon. Toutefois, la plupart

d'entre elles utilisent déjà la houille tendre (p. ex., dans le Nord de la Chine et dans la partie orientale de l'Inde). Dans les régions qui peuvent s'alimenter en charbon de coke, le gaz de gazogène n'est pas susceptible de lui faire concurrence. Dans la production d'énergie, ce gaz n'est pas près de détrôner les turbines à vapeur utilisées actuellement. Ainsi, quoique la technologie du gaz de gazogène produit à partir du charbon soit bien établie et puisse être perfectionnée, son application reposera sur les marchés qu'on pourra lui trouver.

Le gaz de gazogène généré par gazéification souterraine du charbon pourrait faire exception à la règle. En principe, cette technologie offre des perspectives incroyables. En effet, l'exploration pétrolière a permis de découvrir des millions de tonnes de charbon situées à des profondeurs beaucoup trop grandes pour être extraites à des coûts rentables à l'heure actuelle; même si les prix de l'énergie affichaient des niveaux beaucoup plus élevés, il serait difficile, voire impossible, d'exploiter ces gisements.

Dans un avenir rapproché, la seule utilisation possible pour ces réserves est la gazéification souterraine. Les pays industrialisés expérimentent d'ailleurs largement sur ce sujet. Mais les résultats sont on ne peut plus imprévisibles (Schilling et al. 1981). Nous n'avons pu porter de jugement fiable sur cette question.

Il est une autre technique que nous avons délaissée, celle de la magnétohydrodynamique (MHD). En principe, la MHD peut accroître considérablement l'efficacité d'une installation de production d'énergie. À l'encontre de la gazéification souterraine, on sait que le processus fonctionne. Mais les usines de MHD opérationnelles — toutes de taille restreinte — se trouvent en U.R.S.S. et les renseignements de seconde main que nous avons pu obtenir ne nous permettent pas de poser un jugement de valeur.

Le charbon

Plus de 85 % des ressources, des réserves et de la production de charbon des pays en développement se trouvent en Chine et en Inde (tableau 10). Toutefois, nous avons des raisons de croire que cette situation dépeint une absence d'exploration du charbon dans les autres pays plutôt qu'un manque de ressources (Subba Rao 1981). Le charbon a commencé à céder place au pétrole quelques décennies avant que bon nombre de pays en développement s'emploient sérieusement à le mettre en oeuvre. Il n'y avait donc pas de raison de chercher du charbon. Beaucoup de pays en développement n'ont même pas l'infrastructure nécessaire à l'exploitation du charbon qui est un combustible relativement volumineux, de faible valeur et nécessitant des moyens de transport importants. Et bien que les petites mines soient rentables lorsque le charbon se trouve à la surface ou à une faible profondeur, l'exploitation du charbon souterrain nécessite une installation d'une envergure minimale que la demande d'un seul pays en développement pourrait ne pas justifier. Cette raison explique la sous-exploration du charbon dans beaucoup de pays en développement. Si les conditions géologiques s'y prêtent, la mise en valeur du charbon pourrait devenir un secteur de recherche prometteur (Fettweis 1984).

Principale source d'énergie jusqu'à l'avènement du pétrole, les charbonnages des pays industriels ont peu à peu perdu du terrain aux dépens du pétrole après la Seconde Guerre mondiale et ont régressé en raison de la concurrence. Dans leurs années sombres, les charbonnages n'ont bénéficié que de faibles investissements.

La plupart des innovations provenaient des fabricants de matériel, mais les entreprises minières ont apporté leur contribution en établissant les critères nécessaires à l'utilisation du matériel en des endroits particuliers. Ce matériel était et est encore en grande partie vendu à l'échelle nationale et quelques innovations essentielles sont adoptées uniquement à certains emplacements et ne pourraient être transférées aux pays en développement sans leur apporter des modifications préalables. Les pays en développement producteurs de charbon doivent donc devenir en premier lieu des acheteurs éclairés et, en second lieu, se doter des ressources nécessaires pour adapter les innovations. Voilà les secteurs où il importe de concentrer les efforts de recherche et de mettre en place des ressources à ce titre (Surrey et Chesshire 1984).

Technique de l'exploitation minière

Le charbon, le minerai de fer et la bauxite représentent les trois plus importants minéraux en vrac dans le monde. Tous ont été découverts près de la surface. Les réserves en surface de minerai de fer et de bauxite sont tellement grandes que presque toute leur exploitation s'effectue à ciel ouvert; cette exploitation est jumelée à une industrie importante de matériel d'abattage en surface. Cette industrie n'a pas cessé d'innover et d'augmenter la taille de ses produits pour accroître la production et faire diminuer les coûts. On observe de très nombreux échanges d'innovation entre le secteur de l'exploitation du charbon et de la roche dure, mais l'accroissement de taille du matériel — par exemple des excavatrices, des grues à benne traînante et des camions — a progressé davantage dans les industries du charbon et de lignite. Les rapides progrès technologiques dans ce secteur ont permis à l'exploitation à ciel ouvert du charbon de surclasser l'extraction souterraine. Dans tous les pays qui ont accès aux deux techniques, le charbon en surface est devenu plus populaire que le charbon souterrain que l'on exploite maintenant de plus en plus à ciel ouvert après enlèvement des morts-terrains.

Toutefois, les vieux producteurs de charbon comme la France, la Grande-Bretagne et la République fédérale de l'Allemagne ne possèdent pas de gisements importants de charbon en surface, bien que l'Allemagne extrait de la lignite à ciel ouvert. Étant confrontées à la concurrence du pétrole et du charbon des États-Unis, les entreprises d'exploitation du charbon souterrain de ces trois pays ont mis au point des techniques d'exploitation par tailles afin d'accroître leur productivité et diminuer les coûts en capital (Peng et Chiang 1984). Aux États-Unis, où l'on trouve des réserves plus abondantes à des profondeurs moins importantes, on a mis au point des machines pour l'exploitation par chambres et piliers (Meyers 1983).

La Chine et l'Inde possèdent les plus vieilles et les plus importantes exploitations de charbon parmi les pays en développement. Les deux font appel à des techniques nécessitant une grande main-d'oeuvre; étant donné que l'enlèvement des morts-terrains à la main coûte trop cher, ils ont de tout temps préféré l'exploitation souterraine. Toutefois, la production des mines à forte intensité de main-d'oeuvre est faible. En conséquence, les techniques utilisées en fonction de cette main-d'oeuvre nécessitent beaucoup de mines et tous les investissements requis en matière de puits et d'installations de transport par unité de production; vu que le creusage des galeries et des puits prend un temps énorme, il restreint d'autant le taux de croissance de la production. En conséquence, les deux pays ont commencé à se tourner vers l'exploitation à ciel ouvert. Pour augmenter rapidement et de façon marquée la production, la Chine et l'Inde ont été obligées de mécaniser leur exploitation souterraine.

Tableau 10. Population et ressources, réserves et production de charbon des pays en développement.

Pays	Population en 1978 (en millions)	Production de charbon en 1980 (en millions tec)[a]	Réserves				Total des ressources charbonnières en 1983 (en millions tec)
			Houille maigre et lignite		Houille grasse 1983 (en millions tec) [2]	Total 1983 (en millions tec) [1 + 2]	
			1983 (en millions de tonnes)	1983 (en millions tec) [1]			
Afrique							
Algérie	18,24	<0,01	0	0	43	43	0
Botswana	0,71	0,31	0	0	3 500	3 500	107 000
Rép. centrafricaine	2,61	0	4	1	0	1	1
Égypte	38,74	<0,01	0	0	13	13	25
Éthiopie	28,98	0	0	0	0	0	0
Madagascar	8,52	0	0	0	0	0	1 025
Malawi	3,53	<0,01	0	0	12	12	25
Mali	6,04	0	0	0	0	0	1
Maroc	18,25	0,72	0	0	45	45	149
Mozambique	9,68	0,38	0	0	240	240	395
Niger	6,84	0	0	0	0	0	5
Nigéria	66,63	0,19	169	132	0	132	1 065
Swaziland	0,50	0,15	0	0	1 820	1 820	5 020
Tanzanie	16,09	<0,01	0	0	200	200	1 804
Zaïre	26,38	0,08	0	0	600	600	600
Zambie	5,35	0,78	0	0	24	24	130
Zimbabwe	6,74	3,65	0	0	734	734	8 108
Amérique latine							
Argentine	26,06	0,39	130	101	0	101	2 878
Brésil	112,24	4,09	13 000	8 190	0	8 190	14 490
Chili	10,66	1,14	1 150	897	27	924	291
Colombie	25,05	3,34	25	19	1 010	1 029	9 788
Équateur	7,56	0	18	10	0	10	3
Haïti	4,75	0	0	0	0	0	13
Honduras	2,83	0	0	0	0	0	16
Mexique	64,59	6,61	496	357	1 295	1 652	4 317
Pérou	16,36	0	0	0	0	0	884
Venezuela	12,74	0,05	34	27	275	302	11 965

(suite)

Tableau 10 (fin).

Pays	Population en 1978 (en millions)	Production de charbon en 1980 (en millions tec)[a]	Réserves				Total des ressources charbonnières en 1983 (en millions tec)
			Houille maigre et lignite		Houille grasse 1983 (en millions tec) [2]	Total 1983 (en millions tec) [1 + 2]	
			1983 (en millions de tonnes)	1983 (en millions tec) [1]			
Asie (sans l'Inde ni la Chine)							
Afghanistan	26,06	0,18	0	0	66	66	512
Bangladesh	80,56	<0,01	0	0	0	0	1 054
Birmanie	31,51	0,01	0	0	2	2	152
Indonésie	143,28	0,19	0	0	0	0	6 591
Iran	34,27	1,00	0	0	193	193	385
Rép. démocratique populaire de Corée	16,65	16,65	300	234	300	534	6 650
Rép. de Corée	36,44	18,00	0	0	192	192	1 500
Malaisie	12,6	0	0	0	0	0	430
Mongolie	1,53	1,32	0	0	0	0	15 960
Pakistan	75,28	1,04	102	8	0	80	355
Philippines	45,03	0,22	82	64	0	64	133
T'aï-wan, Chine	16,93	2,24	100	106	100	206	453
Thaïlande	44,16	0,21	471	228	0	228	680
Turquie	42,13	9,16	1 728	518	186	704	2 470
VietNam	47,87	4,10	0	0	0	0	1 004
Yémen, Rép. arabe du	7,08	0	0	0	0	0	⩽1
Nouvelle-Calédonie, France	0,14	0	0	0	2	2	12
Total	**1 202,49**	**113,12**	**17 809**	**10 964**	**10 879**	**21 843**	**208 339**
Chine	**865,49**	**618,00**	**0**	**0**	**99 000**	**99 000**	**1 539 365**
Inde	**625,82**	**102,37**	**1 581**	**1 407**	**0**	**1 407**	**115 014**
Pays en développement	2 693,80	833,49	19 390	12 371	109 879	122 250	1 862 718
Autres pays	1 118,33	2 121,22	382 980	206 969	383 045	590 014	6 466 386
Monde	3 812,32	2 954,71	402 370	219 340	492 924	712 264	8 329 104

Source : Fettweis (1984).

[a] 1 tonne équivalent charbon (tec) = 7 Gcal = 29,3 GJ.

Toutefois, la Chine comme l'Inde possèdent de vastes exploitations souterraines de charbon qui doivent être mécanisées si elles veulent diminuer les coûts en capital et conserver une croissance rapide de la production. Nous devons délaisser la préférence que nous accordons en général à l'égard de l'exploitation souterraine du charbon par l'homme, puisque le travail y est extrêmement dangereux et néfaste à la santé des travailleurs dans les pays industrialisés (voir Ramsay 1979; Clifford et Mead 1984). La situation est indéniablement plus grave encore dans les pays en développement.

La Chine et l'Inde ont toutes deux importé les machines et la technique d'exploitation par tailles et elles s'apprêtent à les adapter à leurs besoins. Toutefois, leur charbon se trouve à des profondeurs moins grandes qu'en Europe, outre que les mines de l'Inde comportent de multiples couches épaisses. Le soutènement du toit pendant l'extraction et le foudroyage de l'arrière-taille soulèvent des problèmes dans ces conditions. Les vérins mécaniques mis au point en Europe ne sont pas toujours efficaces et l'écroulement du toit après l'extraction est inégal (Sarkar 1980; Mathur 1980; Sarkar et al. 1983; British Mining Consultants 1983a, 1983b). Ces problèmes sont particuliers à chaque emplacement et nécessitent des connaissances qui s'obtiennent grâce à la formation technique des utilisateurs et aux rapports étroits qu'ils entretiennent entre eux ainsi qu'avec les fabricants de matériel. Il y aurait également lieu de profiter de l'expérience — surtout de l'expérience mutuelle de la Chine et de l'Inde. L'une des principales difficultés dans la formation de l'utilisateur tient au fait que l'exploitation par tailles nécessite des structures différentes au niveau de l'organisation et de la gestion, qui doivent elles aussi être transférées et adaptées, et pas seulement les techniques.

Les autres pays en développement qui ont commencé récemment à exploiter le charbon, comme la Colombie, emploient invariablement des techniques d'exploitation mécanisée à ciel ouvert. À des niveaux élevés de mécanisation, tant à ciel ouvert que sous terre, l'utilisation de la capacité joue un rôle décisif sur la rentabilité de l'industrie. Deux aspects importants en découlent. Le premier touche l'entretien du matériel qui est habituellement négligé dans les pays en développement; une grande compétence à ce titre peut favoriser des relations étroites entre l'entreprise d'exploitation et le fabricant de matériel, et conduire à des innovations. Le second aspect, connexe au premier, touche la formation des gestionnaires et des opérateurs. Les mines qui emploient un effectif important font appel à des travailleurs non spécialisés et ont tendance à se doter d'une gestion autoritaire plutôt simple. En revanche, l'exploitation mécanisée nécessite des travailleurs plus qualifiés possédant des connaissances en mécanique, et elle fonctionnera mieux si on leur donne plus d'initiative. Les entreprises minières établies de longue date ont beaucoup de peine à modifier leur style de gestion, mais il est néanmoins essentiel qu'elles le fassent pour tirer des nouvelles technologies toute leur efficacité. L'interprétation de l'expérience par l'intermédiaire de la recherche peut, dans ces circonstances, servir de pont entre l'ancien style de gestion et les nouvelles techniques.

Le transport du charbon

Le transport du charbon est habituellement plus mécanisé que l'exploitation minière, mais ici aussi, le processus de mécanisation de l'exploitation minière appelle un meilleur rendement du convoyage, des installations de manutention et du matériel de transport (Surrey et Chesshire 1984). On se retrouve donc avec les mêmes besoins de formation et d'entretien que dans le cas de la mécanisation de l'exploitation minière.

Il arrive souvent que le charbon extrait d'une mine soit destiné à une seule centrale ou à un autre client unique, avec pour conséquence un volume important de transport dans une direction seulement. Lorsqu'on fait appel à un transporteur habituel comme le chemin de fer pour le transport du charbon, il y a alors faible utilisation du parc roulant outre des problèmes au niveau de l'ordonnancement du trafic. Les études du trafic ferroviaire jouent un rôle important lorsqu'on fait face à des goulots d'étranglement réels ou éventuels. Toutefois, l'exploration d'autres moyens de transport se révèle également nécessaire. De façon plus particulière, le transport du schlamm est faisable, mais il présente des problèmes techniques solubles et peut être commercialisé moyennant une étude préalable. L'apport d'eau nécessaire au schlamm est important et doit se faire à la tête du puits; une fois à destination, on élimine l'eau sans aucune pollution. On doit aussi aménager un pipeline différent du gazoduc ou de l'oléoduc : il faut rapprocher les stations de pompage et déterminer les conditions nécessaires à la suspension du charbon. Quoi qu'il en soit, ces problèmes peuvent être résolus par la recherche (Grainger et Gibson 1981).

Préparation du charbon

Tous les charbons renferment une proportion variable de matière minérale non combustible que l'on nomme la cendre. Celle-ci diminue la densité énergétique du charbon et le rendement thermique des appareils alimentés au charbon comme les fours, les chaudières et hauts-fourneaux. Dans ces cas, il est souvent économique de réduire la proportion de cendre dans le charbon, quoiqu'à un certain coût, si cela permet d'alléger les coûts de traitement en aval. On peut préparer le charbon de quatre façons puisqu'on connaît habituellement la quantité de cendre à enlever. Les techniques manuelles servent uniquement dans les opérations de faible production mais ne sont pas toujours fiables. On peut recourir à des procédés magnétiques pour enlever les impuretés ferreuses, notamment les fragments qui se détachent du matériel minier. On peut employer des techniques mécaniques pour de grandes quantités de minéraux, mais ce sont des techniques plus dispendieuses lorsqu'on les utilise en combinaison avec l'eau dans les lavoirs à charbon. Aucune des trois méthodes ne donne vraiment un bon rendement lorsque les éléments carboniques et minéraux sont fortement liés entre eux. Dans ce cas, c'est le triage par flottation qui produit les meilleurs résultats. Les lavoirs en Inde et en Chine ajoutent des agents de flottation à l'eau, mais de nouvelles techniques ont été proposées ou mises à l'épreuve : p. ex., la flottation du mazout, la floculation sélective, la séparation électrostatique et l'ionisation pour l'enlèvement du soufre. La préparation du charbon offre donc l'occasion d'effectuer une recherche fructueuse en posant un problème bien défini et en lui apportant une gamme de solutions possibles (Zimmerman 1982).

Le charbon de bois

Le charbon de bois renferme une proportion élevée de carbone et constituait, avant la révolution industrielle, le seul agent réducteur et combustible utilisé en métallurgie. L'accroissement de la demande de fer a provoqué le déboisement de la Grande-Bretagne alors que la recherche visant à trouver un produit de remplacement au charbon de bois conduisait à la découverte du charbon minéral au dix-huitième

siècle. L'utilisation de charbon de bois dans les opérations de fonderie a refait surface en Argentine et au Brésil; au Brésil, il entre dans la production d'environ 10 millions de tonnes d'acier par année. Il offre des perspectives énormes pour les pays disposant d'une biomasse importante. Ailleurs, les énormes quantités en cause et l'utilisation du coke dans les grands hauts-fourneaux assureront l'avenir du charbon minéral. À mesure que le charbon de coke deviendra de plus en plus rare, on commencera à employer la houille sèche dans la fabrication de fer poreux.

La poudre de charbon de bois affiche également un rapport surface/volume élevé et a servi comme carbone activé dans les réactions chimiques avant l'apparition du coke de pétrole. Celui-ci est un sous-produit du raffinage du pétrole dont le prix est destiné à en écouler la production. Le charbon de bois a donc peu de chance de lui tenir tête. Toutefois, si un ralentissement de la demande totale de pétrole aboutit à une pénurie de coke de pétrole, le charbon de bois deviendra certainement un produit de remplacement sérieux.

Le charbon de bois continue d'être utilisé en grande quantité comme combustible domestique dans certains pays en développement, surtout dans les villes d'Asie du Sud-Est et de l'Afrique. Ici et là, il subit la concurrence des GPL (gaz de pétrole liquéfié), du kérosène et de l'électricité. Tous ces combustibles se retrouvent sur les marchés des usagers à revenu supérieur surtout à cause de leur facilité d'utilisation, mais ils commencent de plus en plus à accaparer les marchés inférieurs à mesure que leur prix diminue ou que les revenus des usagers augmentent. Même à cela, certains pays en développement n'ont pas les moyens d'importer des combustibles domestiques dérivés du pétrole. Dans les pays qui raffinent leur propre combustible, tout déséquilibre entre la demande et la production à la raffinerie entraîne une pénurie de kérosène. En outre, les réseaux de distribution du kérosène sont de moins en moins étendus et fiables à mesure que l'on s'éloigne des ports et des centres de production. Ainsi, il reste quand même des segments du marché national ou local pour l'écoulement du charbon de bois, mais ils fluctuent en hausse ou en baisse selon le schéma d'approvisionnement des combustibles pétroliers. Le kérosène présente une coupe pétrolière semblable à celle du carburant diesel, de sorte qu'un pays désirant réduire au minimum ses importations de pétrole, à l'exception des besoins essentiels et irremplaçables, aurait peut-être avantage à remplacer les importations de kérosène par du charbon de bois. L'industrie du charbon de bois survit donc dans de nombreux pays en développement et peut même s'accroître en raison de pressions nationales ou mondiales pour faire diminuer les importations de pétrole.

Une forte proportion de l'énergie contenue dans le bois se perd lors de la fabrication du charbon de bois. Cependant, une bonne partie de cette énergie perdue ne serait pas récupérable dans une combustion visant à vaporiser et à éliminer l'humidité ainsi qu'à carboniser et à séparer les éléments minéraux non combustibles. Exception faite de ces pertes inévitables, la perte d'énergie au cours de la fabrication du charbon de bois n'est pas importante. Ce cas est un exemple où il serait faux de penser en termes de quantité d'énergie sans tenir compte de la qualité et de la rentabilité du produit. À cause de ses faibles émissions de fumée, de la température supérieure de sa flamme et du meilleur contrôle que l'on peut exercer sur sa combustion, le charbon de bois supplante le bois comme combustible urbain.

On peut donc étendre et développer l'utilisation du charbon de bois comme combustible valable pour la cuisson et le chauffage urbain. Si l'on choisit cette avenue, on devra utiliser les techniques et les systèmes de gestion permettant d'obtenir un approvisionnement continu, fiable et bon marché. Les méthodes actuelles prédatrices et énergivores (abattage des forêts et brûlage en fours enterrés)

détruisent la forêt au-delà d'un seuil minimum d'exploitation. Des fours enterrés plus efficaces accroîtraient la rentabilité de l'opération mais non la production à long terme ni la viabilité des forêts.

Si l'on doit approvisionner les villes de façon soutenue en charbon de bois, il faudra le faire à partir de plantations coupées et replantées à intervalles réguliers. Bien que l'on ait généralement favorisé les plantations énergétiques sur des terres impropres à l'agriculture, la disponibilité de ces terres varie considérablement d'une région à l'autre. Il est assez clair que la foresterie énergétique (à distinguer de l'agroforesterie) ne peut en général concurrencer l'agriculture nulle part, que ce soit dans les pays en développement ou dans les pays industrialisés. Ce n'est pas parce que les aliments sont plus essentiels que le combustible, puisque cela dépend de la quantité d'aliments produits en fonction des besoins. C'est plutôt parce que le combustible (à l'encontre du bois à pâte) commande un prix trop bas en comparaison des autres produits agricoles. Outre les aliments, l'agriculture fournit une foule de produits sur les marchés urbains et satisfait une certaine proportion des besoins en combustible des populations rurales. Elle pourrait tout aussi bien répondre à la demande urbaine de combustible si la productivité agricole était suffisamment élevée pour se départir d'un excédent de terre et de main-d'oeuvre devenu inutile à la subsistance, et si le prix du combustible ligneux atteignait un niveau assez élevé pour rentabiliser sa production. Lorsqu'il n'est plus possible d'accroître l'industrialisation et l'urbanisation sur la base des importations, il faut alors transférer des quantités de plus en plus grandes d'aliments et de combustibles du rural vers l'urbain si l'on veut poursuivre la croissance de ce dernier secteur.

Une industrie du charbon de bois destinée à répondre aux besoins d'une ville doit d'abord pouvoir compter sur des plantations soutenues; ce sujet est abordé dans la section suivante. En deuxième lieu, on doit choisir la technique à employer. Les diverses techniques de fabrication du charbon de bois ont fait l'objet d'une foule de recherches (Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture 1983; Karch et Boutette 1983; Caceres 1985). Les critères particuliers à chaque emplacement joueront sans aucun doute un rôle dans le choix de la technique. Toutefois, dans le contexte actuel, on propose une orientation.

Si la fabrication du charbon de bois doit devenir une industrie sédentaire continue, les fours peuvent alors être installés en permanence; les fours enterrés et les fours portatifs n'offrent aucun avantage spécial. Le four enterré est courant en Afrique et un choix doit être fait pour l'améliorer ou en construire de plus efficaces. Tant que ces fours continueront d'être en usage, il sera évidemment souhaitable de leur apporter des améliorations. Cependant, les améliorations réelles qu'apportera le producteur de charbon de bois dépendront de leurs coûts et de leur rendement économique. Dans la mesure où ce rendement se traduit par un charbon de bois de meilleure qualité et plus carbonisé, une carbonisation plus complète diminuerait en fait le poids du produit et constituerait un problème pour le producteur à moins que le marché accepte cette nouvelle qualité. En revanche, la construction de fours nécessite des coûts importants au titre de la main-d'oeuvre et des compétences requises. Ainsi, on ne sait pas très bien jusqu'à quel point pourraient être diffusées les améliorations apportées aux fours. Puisque la technique relative à ces fours varie en fonction de l'utilisateur et qu'elle doit être diffusée à un grand nombre d'entre eux, son utilisation moyenne sera bien inférieure à la situation idéale.

Le choix se ferait donc entre le four de briques et la cornue. Celle-ci conviendrait s'il y a une demande locale de goudrons, de résines et d'autres produits chimiques du bois; sinon, on adoptera le four de briques. Au Brésil, les fours en maçonnerie servent à fabriquer le charbon de bois entrant dans la métallurgie. Les

fours en maçonnerie, qui datent d'au moins 150 ans, affichent une bonne efficacité. On les utilise aussi dans la fabrication de briques et la production de houille tendre. Il conviendrait d'examiner de plus près l'amélioration possible de cette technique qui mérite une plus large diffusion.

La biomasse

Les plantes ont été appelées des capteurs solaires polyvalents (Coombs et al. 1983). La diversité de leurs espèces, de leurs usages et de leurs conditions de croissance nous empêche de toutes les étudier ensemble. Or, le fait qu'on puisse les substituer plus ou moins l'une à l'autre dans la production et la consommation nous oblige à tenir compte de tous les éléments de la biomasse.

La qualité de la biomasse en tant que combustible prend une place importante chez l'utilisateur et dépend de quatre facteurs principaux.

Humidité L'eau contenue dans la biomasse s'en libère par évaporation lorsqu'on brûle la biomasse; ce processus nous empêche de récupérer la chaleur produite par l'évaporation. L'énergie ainsi absorbée correspond à 2,4 kJ/g d'eau. Il en ressort donc que si la teneur en humidité passe de 0 à 50 % (base humide), l'énergie disponible dans le bois régresse de 18,7 à 8,2 kJ/g[1].

Produits volatiles Le bois contient des substances goudronneuses et résineuses dont la proportion varie d'une espèce à l'autre. Leur contenu énergétique est supérieur à celui du bois sec, mais ces substances sont fumeuses et corrosives. Des fractions volatiles provenant d'une combustion incomplète peuvent s'accumuler dans le matériel, par exemple dans les gazogènes et moteurs, et causer de sérieux dommages.

Matières incombustibles Connues sous le nom de cendre, ces matières ne brûlent pas mais absorbent la chaleur de la combustion (qu'elles libèrent par la suite). Ces matières réduisent donc la densité énergétique de la biomasse. En faible quantité dans le bois, elles peuvent figurer en proportion importante dans la paille et dans le fumier.

Rapport surface/volume Bien qu'il n'affecte pas la densité énergétique de la biomasse, un rapport élevé suppose une vitesse supérieure de combustion. Dans la cuisson, qui est essentiellement un processus de transport thermique, un taux de production de chaleur plus important peut entraîner des pertes thermiques substantielles, diminuer l'efficacité du transfert thermique et augmenter les besoins en combustible. De façon générale, plus une pièce de bois (ou de charbon de bois) est grosse et épaisse, plus elle mettra de temps à brûler. Les résidus de cultures sont généralement plus minces et présentent un rapport surface/volume élevé, tout comme le fumier.

La qualité devient un facteur important lorsque l'usager a un choix; dans les agglomérations urbaines, les gens qui jouissent d'un revenu assez élevé peuvent imposer leur choix. Lorsqu'ils ne peuvent obtenir ou se permettre des combustibles de cuisson de première qualité comme le kérosène ou le gaz, ils choisissent le charbon de bois, le plus populaire des combustibles produits localement, et le bois rond, qui vient au deuxième rang. Ces deux combustibles supposent la destruction d'arbres. Les populations rurales utilisent les combustibles qu'ils trouvent à proxi-

1. K. Openshaw, 1984. Communication personnelle basée sur Bialy (1979).

mité en quantité abondante et ont tendance à réduire au minimum l'apport de main-d'oeuvre dans la cueillette et la préparation des combustibles. Laissées à elles-mêmes, ces populations adopteront des habitudes moins destructrices dans la cueillette des combustibles. Elles préféreront également des combustibles de première qualité comme le bois au détriment des résidus de cultures et du fumier, et délaisseront ces derniers au profit du bois lorsqu'il est disponible. L'accès aux combustibles et, partant, les coûts de main-d'oeuvre de leur production, présentent des variations considérables ; ce sont les femmes et les personnes sans terre qui font les frais de ces inégalités (Desai 1985 ; Howes 1985).

L'approvisionnement en énergie sous forme de biomasse prend également une dimension régionale, comme en témoignent les estimations de David Hughart (1978) (tableau 11). Les chiffres représentent des projections très approximatives jusqu'en 1990, mais elles ne sont pas assez fiables pour permettre une comparaison minutieuse entre pays. Qui plus est, les ressources organiques englobent plus d'éléments que ce que les populations locales considèrent habituellement comme combustibles potentiels. Les chiffres sont cependant assez fiables pour nous révéler que la région la moins pourvue en biocombustibles est constituée de la masse de terres arides s'étendant sur tout l'Ouest de l'Asie et du Nord de l'Afrique ; les terres situées aux extrémités de cette région, c.-à-d. vers l'Est en Asie du Sud, de l'Est et du Sud-Est et vers le Sud, en Afrique orientale, sont un peu moins dépourvues en biomasse, mais demeurent néanmoins déficitaires par rapports aux besoins.

La crise de l'énergie en milieu rural a fait naître une foule de travaux de recherche ainsi que l'élaboration de mesures concrètes stimulées par l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (1983). Selon les observations précédentes, il y aurait deux crises en puissance que l'on ne saurait en aucun cas attribuer uniquement au milieu rural. Il y a la crise urbaine de l'énergie : la superficie des zones dénudées d'arbres augmente de plus en plus autour des villes qui dépendent principalement de combustibles ligneux, et ceux-ci atteignent des prix de plus en plus élevés. Il faut aussi ajouter que la productivité des terres est faible dans les régions arides, ce qui se répercute sur l'approvisionnement de toute la biomasse utile et non seulement sur celle des combustibles. Il faut donc chercher dans deux directions différentes les solutions à ces deux problèmes.

Si l'on doit réduire et stabiliser les coûts du combustible ligneux dans les villes qui en dépendent, leur approvisionnement en bois devra provenir de plantations sur pied. Il importe donc d'intégrer la foresterie aux systèmes d'aménagement foncier autour de ces villes. On peut la jumeler à des poêles plus efficaces destinés à améliorer la consommation de combustible. On pourra la jumeler à des fours plus efficaces pour l'approvisionnement des villes qui consomment du charbon de bois. Ainsi, lorsque la crise d'énergie prend son origine dans le secteur urbain, il faut concentrer la recherche sur les trois aspects suivants : l'agroforesterie, l'efficacité des poêles et l'efficacité des fours à charbon de bois.

Toutefois, lorsque la pénurie de combustible découle d'une production insuffisante de la biomasse, on peut appliquer deux remèdes différents, notamment accroître la production de la biomasse et diversifier la base des combustibles. C'est ici que la recherche sur la productivité de la biomasse en général, et non pas seulement sur celle des combustibles de biomasse, prend son importance : une augmentation des rendements agricoles d'une culture donnée libère éventuellement des terres pour d'autres cultures (Hall 1984). Qui plus est, les habitants des régions arides recourent déjà à une grande diversité de biocombustibles : tiges ligneuses des cultures vivrières, résidus combustibles d'exploitations forestières commerciales, broussailles ligneuses, végétation adventice et fumier. La recherche devrait viser à

Tableau 11. Ressources organiques estimées, 1990 (en GJ/habitant par année).

	Rendement forestier soutenu	Lisier[a]	Résidus de cultures	Total
Algérie	3	3 SC	1	7
Égypte	0	1 CH	6	7
Iraq	1	5 CS	2	8
Bangladesh	2	4 CS	4	10
Éthiopie	3	6 SH	3	12
Kenya	1	7 CS	4	12
Ghana	8	2 CS	2	12
Nigéria	8	3 CS	2	13
Pakistan	1	6 CS	7	14
Maroc	6	5 CS	5	16
Inde	6	5 CS	6	17
Sri Lanka	11	2 CS	4	17
République de Corée	9	1 CP	7	17
VietNam	12	1 CP	6	19
Afghanistan	6	8 CS	7	21
Philippines	12	3 CP	7	22
Chine	11	3 CP	8	22
Afrique du Sud	2	8 CS	13	23
Népal	15	11 CS	6	32
Thaïlande	22	3 CP	9	34
Iran	22	6 SC	7	35
Rép. démocratique populaire de Corée	24	1 CP	13	38
Mexique	39	9 CH	9	57
Tanzanie	54	11 CS	3	68
Indonésie	63	1 CS	6	70
Chili	71	7 CS	4	82
Birmanie	82	4 CP	6	92
Malaisie	114	2 CP	7	123
Soudan	148	18 CS	5	171
Argentine	104	45 CS	33	182
Colombie	180	16 CH	4	200
Venezuela	211	11 CH	4	226
Brésil	229	15 CP	9	253
Pérou	245	7 CS	2	254

Source : Hughart (1979).

[a] Les sources principales sont indiquées par le code alphabétique : C = bétail, buffles, chameaux; S = moutons, chèvres; H = chevaux, mulets, ânes; P = porcs.

exploiter cette diversité, à mettre au point ou à introduire des cultures qui améliorent la qualité et la quantité des combustibles et enfin à les rendre disponibles de manière à détruire le moins possible l'environnement. Il importe également d'effectuer un examen plus approfondi des espèces pouvant convenir à l'échelle locale. Pour être fructueux, les essais sur les espèces doivent être réalisés sur de longues périodes et sur une base assez étendue. Il est donc nécessaire d'engager un minimum de fonds dans la recherche et de prendre un engagement à long terme à cet égard (voir Du Toit et al. 1984). Des enquêtes plus détaillées sur la composition des approvisionnements combustibles dans différentes parties des régions arides donneraient également des renseignements inestimables à des fins de comparaison.

Chapitre 9 Autres sources d'énergie thermique

Étant donné que la chaleur se dissipe facilement, les sources localisées d'énergie géothermique ou solaire constituent la meilleure application locale puisque l'investissement dans le stockage ou le transport est réduit au minimum.

La plupart des découvertes d'énergie géothermique sont le résultat de travaux d'exploration pétrolière, mais il y a probablement beaucoup plus de sources d'énergie géothermique dans les jeunes systèmes ignés inexplorés. Leur exploration serait donc justifiée. La plupart des sources géothermiques ont une température trop basse pour être transformées directement en électricité et, de ce fait, pourraient uniquement servir comme sources de chaleur industrielle. Mais les pays en développement auraient avantage à surveiller les progrès des usines à cycle binaire et de la technique de fracturation des roches sèches.

Presque tous les coûts nécessaires à l'exploitation de la chaleur du soleil sont engloutis dans le matériel et, à cause de l'échelle réduite des exploitations, on doit recourir à un nombre de dispositifs plus importants. La recherche se concentre en grande partie sur la conception des appareils mais leur diffusion nécessite la mise au point de techniques de production de masse permettant de construire des dispositifs fiables et bon marché.

Étant donné l'intermittence du rayonnement solaire, les dispositifs de captage doivent être surdimensionnés ou sous-utilisés. Leurs coûts grimpent rapidement en fonction de la température qu'ils permettent d'obtenir. Pour être économiques, les dispositifs d'énergie thermique solaires doivent donc être utilisés comme économiseurs de combustible en combinaison avec des dispositifs non solaires : par exemple, chauffe-eau, fourneaux et séchoirs à céréales. Il faut donc bien accorder les dispositifs non solaires au marché en question.

Porté à chaud, un produit non énergétique peut agir comme transporteur et source d'énergie; de nombreux procédés énergivores produisent de la chaleur en dérivé pouvant servir à une autre utilisation. L'industrie fournit de nombreuses occasions de récupérer l'énergie perdue. Vu que la chaleur se transmet facilement d'une surface chaude à une surface froide, elle se dissipe rapidement si on expose à l'air un matériau présentant une température plus élevée que l'atmosphère ambiante. La seule façon d'empêcher sa dissipation est de l'enfermer dans un espace clos mauvais conducteur d'énergie : l'isolation constitue donc l'autre moyen important de conserver la chaleur dans l'industrie. Toutefois, étant donné la facilité de dissipation de la chaleur et du fait que sa valeur justifie rarement son entreposage ou son transport, on l'utilise habituellement à l'endroit où elle est produite. Nous aborderons ici deux formes de chaleur : l'énergie géothermique et l'énergie thermique solaire.

L'énergie géothermique

Les réserves en calories des trois premiers kilomètres de la croûte terrestre seraient de 10^{14} fois supérieures à celles des combustibles fossiles et des ressources nucléaires (Rowley 1982). Les obstacles à leur exploitation en sont le coût et la qualité (Fridleifsson 1984).

Pour amener la chaleur souterraine à la surface de la Terre, il faut un véhicule approprié, le seul ayant fait ses preuves jusqu'à maintenant étant l'eau. Il y a des quantités abondantes d'eaux souterraines, mais pour qu'elles puissent retenir la chaleur, elles ne doivent pas entrer en contact avec l'eau de surface. Il importe que l'eau soit emprisonnée sous terre. Parallèlement, si on amène l'eau à la surface, il faut lui aménager une conduite perméable. Ce sont là les critères particuliers à la mise en valeur des eaux souterraines. En outre, le coût d'exploitation dépendra de la profondeur, de la température, de la pression, de la composition chimique et des difficultés de forage.

La première chose à faire dans l'exploitation d'une source géothermique consiste à établir, à délimiter et à estimer les ressources au moyen d'une exploration en surface. Bon nombre de nappes géopressurisées ont été découvertes pendant des travaux d'exploration pétrolière. Toutefois, la présence de sources de vapeur ou d'eau chaude ne coïncide habituellement pas avec celle d'hydrocarbures. Ceux-ci se trouvent près ou dans les systèmes sédimentaires alors que les réseaux géothermiques à plus de 200 °C sont plus susceptibles d'être situés dans de jeunes systèmes ignés. Cette vapeur à haute température peut servir directement à produire de l'électricité. Une vapeur à température élevée utilisée dans un système à détentes successives (*multi-flash*) serait particulièrement économique. Cependant, la pression thermique décroît avec l'âge de la source thermale, réduisant ainsi son efficacité.

Il y a beaucoup plus de sources géothermiques à basse température mais leur utilisation pour la production d'électricité n'est pas rentable. Cette eau chaude peut cependant servir au chauffage de certains districts, comme on l'a fait à Tianjin et Paris. On peut également y recourir dans les serres et aux fins de la pisciculture en régions froides. Dans les secteurs à concentration industrielle sollicitant de vastes quantités de vapeur ou de chaleur (par exemple pour le séchage), l'approvisionnement à partir d'une source thermale permettrait d'économiser l'énergie. Mais la teneur en sel des sources thermales peut causer des problèmes de corrosion et l'eau pourrait devoir être réinjectée après extraction de sa chaleur afin de prévenir la pollution de l'environnement.

Les pays présentant une géologie favorable se prêteraient à une exploration des ressources géothermiques. Ceux qui jouissent de sources thermales importantes à basse énergie auraient avantage à surveiller les travaux de recherche sur les centrales à cycle binaire et peut-être même à y participer. La fracturation des roches sèches chaudes est une technique encore trop récente pour qu'elle nous donne une indication fiable de ses perspectives d'avenir. Toutefois, les expériences effectuées au sein de la Communauté européenne ainsi qu'aux États-Unis méritent certainement d'être observées de près.

L'énergie thermique solaire

Plus la température requise doit être élevée, plus il faut concentrer le rayonnement solaire. Les applications à haute température doivent faire intervenir de grands capteurs répartis sur une surface importante, le tout coordonné par un mécanisme de

guidage. Les dispositifs sans concentration ni mécanisme de guidage, et qui fonctionnent donc à de basses températures, n'exigent pas un investissement très élevé. Il s'agit essentiellement de dispositifs qui produisent une chaleur légèrement plus élevée que la température ambiante en emprisonnant l'énergie solaire : par exemple, des chauffe-eau, séchoirs, cuisinières et cornues. Puisqu'il n'y a pas concentration du rayonnement, les économies d'échelle disparaissent lorsque la superficie des capteurs est encore relativement petite; on utilise donc largement ce procédé pour le chauffage domestique et la petite industrie. Cela ne signifie toutefois pas qu'il n'y a nécessairement aucune économie d'échelle dans leur fabrication. Ces économies dépendent de la conception et de la complexité technique. Jusqu'à présent, la plupart des travaux de recherche sur ces dispositifs ont été effectués par des spécialistes intéressés à fabriquer et à mettre à l'épreuve des prototypes. La plupart n'ont pas songé aux problèmes de production; ceux qui l'ont fait ont supposé qu'il s'agirait de commandes spéciales ou de petits lots. Cependant, si les pays en développement doivent adopter ces dispositifs sur une grande échelle, il faudra s'arrêter autant à leur technique de production qu'à la conception des produits.

Les variations de durée et d'intensité du rayonnement solaire signifient que ces dispositifs devraient être surdimensionnés et sous-utilisés, ou employés en combinaison avec des appareils fonctionnant à l'aide de combustibles conventionnels, ou les deux. Leur rentabilité s'établit donc en fonction des économies de combustibles de remplacement, et non en fonction de celles réalisées au titre des dépenses en capital sur d'autres dispositifs.

Il s'agit entièrement de dispositifs fonctionnant à des températures moyennes, c'est-à-dire situées entre 60 °C et 150 ° C. Les dispositifs opérant à des températures élevées sont moins économiques puisqu'ils nécessitent des matières plus dispendieuses et qu'ils fonctionnent sous des conditions beaucoup plus rigoureuses. Les dispositifs économiquement rentables seront probablement ceux qui fonctionnent à des températures relativement basses (Collins 1985). Utilisés en combinaison avec des appareils conventionnels, ces derniers agiraient alors comme source d'appoint.

Chauffe-eau

Des chauffe-eau solaires existent en assez grand nombre au Japon, en Israël et en Australie. Ils sont fabriqués par des entreprises que ces trois pays considèrent comme petites et qui ne seraient en aucun cas d'une taille importante dans les pays en développement. Toutefois, ces entreprises constituent essentiellement des chaînes d'assemblage qui achètent les composantes nécessaires. Dans ces trois pays, le niveau d'insolation est élevé en certaines saisons, mais les températures ambiantes sont assez basses pour privilégier les chauffe-eau solaires. Les pays en développement pourraient y recourir là où les conditions climatiques s'y prêtent, c'est-à-dire sous un climat tempéré ou subtropical ainsi que dans les régions sèches et montagneuses. Toutefois, la rentabilité de ces appareils repose largement sur le prix de l'électricité ou du mazout lorsqu'on peut y avoir accès. La technique des chauffe-eau solaires est bien établie et très peu de recherche à son sujet s'impose. Cependant, dans les grands immeubles d'appartement, leur raccordement aux systèmes de plomberie peut poser des problèmes (Isaza 1984).

Cuisinières

Les cuisinières à capteurs de concentration ont peu de chance de trouver des débouchés importants dans les pays en développement. À cause de leur prix élevé,

elles conviennent davantage aux familles appartenant à des tranches supérieures de revenu qui les acceptent cependant fort mal en raison de leur fonctionnement malaisé.

Les cuisinières à capteurs plats sont limitées à trois modes de cuisson : à l'eau, à la vapeur et à sec. Elles sont d'un fonctionnement lent et ne permettent pas toujours la cuisson au moment désiré. Leur efficacité varie d'une saison à l'autre. En revanche, elles se vendent bon marché et leur prix pourrait descendre davantage si elles étaient mieux conçues et produites à l'échelle commerciale. En outre, elles ne demandent aucune attention pendant la cuisson. Leur meilleure utilisation demeure comme appareil d'appoint et leur rentabilité doit se justifier par l'économie de combustible de l'appareil de cuisson principal. Leur acceptabilité sera probablement plus grande auprès des ménages qui possèdent déjà un autre appareil principal qui fonctionne à l'aide d'un combustible coûteux comme le kérosène, un GPL (gaz de pétrole liquéfié) ou du charbon de bois. Les cuisinières solaires n'offrent pas beaucoup de débouchés chez les familles pauvres — du moins dans les pays à faible revenu — d'où la nécessité d'identifier des marchés et de mettre au point une production d'échelle.

Appareils de distillation

Tant qu'une installation de distillation solaire se limite à emprisonner la chaleur, elle ne présente aucune économie de taille ; et les collectivités qui doivent s'approvisionner en eau pure ont des besoins importants. En conséquence, malgré les expériences réalisées avec des appareils de distillation solaires pendant plusieurs décennies, le dessalement s'effectue en grande partie dans de grosses usines alimentées par des combustibles fossiles dans les pays possédant de vastes quantités de pétrole. Les distillateurs solaires ont peu de chance de devenir de gros fournisseurs d'eau douce. Mais dans les régions où l'eau est polluée et sujette à provoquer des maladies endémiques, il conviendrait de promouvoir les petits appareils de distillation à cause des avantages qu'ils comportent pour la santé.

Pompes

Il faudrait diminuer considérablement les coûts nécessaires à l'installation des pompes thermodynamiques solaires pour qu'elles puissent concurrencer les systèmes photovoltaïques, même aux prix actuels. On croit que les travaux d'élaboration nécessaires à cette fin coûteront très cher. Compte tenu de l'aide financière actuelle et à venir, la recherche dans ce domaine est susceptible de ne pas progresser très vite (McNelis et Fraenkel 1984).

Séchoirs solaires

Le séchage est un processus thermique. Outre le recours aux combustibles et à l'électricité, il peut aussi se faire grâce au rayonnement solaire. Les pays en développement ont fait l'objet d'expériences approfondies sur des séchoirs solaires. Deux restrictions touchent leur utilisation. En premier lieu, il est possible de sécher une grande quantité de produits seulement en les étalant au soleil, sans qu'il soit nécessaire d'investir dans un séchoir. Lorsqu'on peut recourir au séchage à l'air ambiant, les séchoirs ne se justifient alors que par l'effet qu'ils ont sur la qualité du produit. Par exemple, ils empêchent la poussière de s'accumuler, les oiseaux ou les

insectes d'attaquer le produit ou les organismes étrangers de contaminer les matières en cours de séchage. On trouve bien peu de cas où ces petites améliorations influent de façon marquée sur la décision : ainsi, on peut enlever la poussière en lavant les produits, les oiseaux et les insectes peuvent être éloignés d'autres façons et, sauf si les produits servent à des usages médicaux particuliers, la contamination ne constitue pas un empêchement sérieux (il existe des séchoirs solaires pour la stérilisation du matériel médical, mais ils doivent atteindre des températures élevées, ce qui en augmente les coûts).

En deuxième lieu, les températures des séchoirs solaires simples restreignent leur efficacité et les rendent inappropriés lorsque la quantité de produits est importante ou que le séchage doit se faire rapidement. En temps ordinaire, seul un producteur ayant les moyens pourra se permettre l'investissement nécessaire à un séchoir solaire, mais si sa production agricole est importante, un séchoir électrique ou un moteur diesel coûterait probablement moins cher qu'une batterie de séchoirs solaires. En outre, on emploie habituellement le séchage artificiel lorsque la température ambiante ne s'y prête pas : p. ex., dans un système de polyculture lorsqu'il faut récolter une culture ensemencée avant qu'elle sèche sur pied, ou lorsque le temps est trop pluvieux ou trop froid après la saison de récolte pour permettre le séchage à l'extérieur.

Selon nous, s'il existe un marché, les séchoirs solaires subiront invariablement la concurrence des séchoirs électriques ou à combustible. En plus de leur lenteur, les séchoirs solaires actuels nécessitent un préposé pour la bonne manutention des produits alors qu'on peut facilement incorporer un moteur dans un séchoir électrique ou à carburant diesel pour assurer cette tâche. La rentabilité des séchoirs solaires est donc précaire (Bruggink 1984), mais il semble y avoir un meilleur avenir pour les séchoirs hybrides dans lesquels l'énergie solaire préchaufferait l'air utilisé dans un séchoir électrique ou diesel.

Chapitre 10 L'électricité

Polyvalente dans ses applications autant que dans ses modes de production, l'électricité est une source d'énergie de premier choix pour le secteur industriel et domestique, et sa demande s'accroît rapidement en fonction du développement.

Dans les pays en développement, il arrive souvent que les services publics desservent tout le pays et appartiennent à l'État. L'interférence politique au niveau de la gestion se traduit par de piètres structures organisationnelles ; des réformes institutionnelles et des relations sensées avec le gouvernement demeurent de la plus grande priorité alors que l'innovation dans le mode d'organisation constitue un secteur de recherche important. Outre l'organisation, les programmes d'investissement et d'établissement de prix représentent des domaines liés dans lesquels la recherche a un rôle de premier plan à jouer. Les examens diagnostics des usines en exploitation peuvent s'avérer fort utiles afin de leur apporter des mesures correctives.

Les cellules photovoltaïques à silicium cristallin ont été commercialisées et affichent déjà une baisse rapide de prix. Cependant, il reste encore beaucoup de recherche prometteuse à faire dans les cellules en couches minces, surtout les cellules à base de silicium amorphe. Jusqu'à ce que ces cellules soient commercialisées, la recherche à leur sujet dans les pays en développement offre des perspectives intéressantes.

Pour un pays en développement qui songe à produire de l'énergie éolienne, la première démarche consiste à identifier les emplacements. C'est leur nombre qui présidera à l'établissement d'un marché des génératrices après quoi il faut s'attaquer à la conception et au procédé de fabrication. L'adaptation des génératrices au réseau de transmission pose également des problèmes à la recherche.

On peut produire l'électricité à partir d'un grand nombre de sources d'énergie primaires, et ses applications sont tout aussi polyvalentes. L'électricité est devenue la principale source d'énergie motrice stationnaire dans l'industrie à cause de sa commodité, de son efficacité et de son faible coût par rapport aux autres sources principales qui font appel au mazout ou au charbon. Elle se prête également à de nombreuses utilisations qui ont rehaussé la qualité de la vie, tant dans le domaine de l'éclairage que pour le fonctionnement des appareils électriques. C'est ainsi que sa part dans la consommation d'énergie des pays en développement affiche une hausse soutenue (Brooks 1984).

Tous les pays en développement produisent de l'électricité et tous cherchent à améliorer la gestion et la production de cette énergie. L'électricité offre quelques-unes des voies de recherche les plus prometteuses.

Réglementation, gestion et organisation du secteur de l'énergie

Le secteur de l'électricité a pris une expansion rapide dans la plupart des pays en développement surtout depuis le début des années 50. Étant donné que c'est l'un

des secteurs de l'économie employant le plus de capitaux et en mesure de générer des recettes importantes, et du fait aussi que ce secteur dépend d'une technologie relativement moderne, l'électricité a favorisé une très grande participation des pays étrangers partout dans le Tiers-Monde. Au début, seules les grandes agglomérations étaient approvisionnées en énergie qui provenait de modestes centrales thermiques ou hydro-électriques isolées. Ces centrales étaient souvent le fait de grands utilisateurs industriels et de sociétés étrangères. Comme de plus en plus de pays en développement acquéraient leur indépendance après la Deuxième Guerre mondiale et que l'on assistait à une croissance de la demande de consommation, il est devenu avantageux de mettre en place des réseaux interconnectés — à l'échelon régional et national — ainsi que de plus grosses centrales de production afin d'obtenir des économies d'échelle dans la planification et les opérations, une fiabilité accrue, une coordination améliorée ainsi qu'une plus grande efficacité et d'autres retombées. Parallèlement, des pressions socio-économiques et politiques ont obligé de nombreux gouvernements à acheter les centrales privées (locales et étrangères) et à centraliser l'approvisionnement d'électricité.

L'approvisionnement en électricité a comme objectif principal de satisfaire la demande. Une compagnie moderne doit accomplir les fonctions techniques suivantes d'une manière efficace si elle veut fournir un service satisfaisant à ses abonnés : prévision de la demande (à court, moyen et long terme); planification des investissements à long terme et au moindre coût afin de répondre à la demande future sous forme d'un réseau de qualité acceptable (réseaux de production, de transmission et de distribution); opération et entretien optimals du système d'énergie (y compris la sécurité, les pertes, etc., du système); et l'établissement des prix.

Un service public efficace — comme, en fait, toute entreprise de l'État — devrait avoir :

- Des lignes directrices bien définies, à caractère général et de portée nationale, provenant de l'État mais n'imposant pas l'ingérence de ce dernier dans les activités quotidiennes;
- Un conseil d'administration indépendant ayant pour tâches d'interpréter les lignes directrices nationales, de mettre au point des directives plus particulières et, de façon générale, de protéger la direction d'une ingérence indue;
- Une direction compétente et bien motivée, ayant à coeur la poursuite de l'entreprise;
- Le pouvoir d'embaucher du personnel qualifié et de le garder en lui offrant un traitement concurrentiel et d'autres avantages, et celui de congédier les employés incompétents;
- Une indépendance et une stabilité financières marquées, y compris la capacité de dicter une tarification qui permettra de générer des recettes suffisantes, aidera à satisfaire les objectifs en matière de subventions, assurera l'efficience économique, et ainsi de suite;
- La responsabilité principale de la prestation des biens et services; et
- Un organe de réglementation distinct, non biaisé et juste qui s'attache aux questions primordiales (p. ex., les investissements et les prix) plutôt qu'aux aspects secondaires qui peuvent amener une ingérence indue et des délais dans la prise de décision.

Dans la réalité, une poignée seulement de pays en développement satisfont, et ce n'est pas toujours le cas, à quelques-unes de ces exigences. Habituellement, les pressions politiques visant à maintenir les prix à un bas niveau se soldent par un financement inapproprié, des investissements insuffisants et une négligence dans l'entretien des réseaux d'énergie. La qualité de l'approvisionnement peut se dégra-

der pendant qu'augmentent les pannes et les pertes, imposant ainsi un fardeau supplémentaire sur le service ainsi que sur les consommateurs. Une ingérence dans les décisions de la direction à l'égard du personnel, des achats et même des activités quotidiennes, de même que le remplacement fréquent des cadres supérieurs peuvent saper la compétence et le moral. Parallèlement, l'accroissement de la demande et des attentes des abonnés, alimenté par un discours politique (surtout en ce qui a trait à l'électrification des régions rurales), aggraveront encore plus la situation.

Le problème de la réforme institutionnelle se complique étant donné la nécessité de maintenir la continuité et non d'exposer le secteur énergétique souvent vulnérable d'un pays en développement à des modifications radicales comportant toutes sortes de conséquences imprévues. Il importe d'opérer les changements structurels en assurant une transition qui tienne compte des contraintes économiques et socio-politiques et du cadre institutionnel existants ainsi que de l'expérience passée.

Il conviendra d'examiner attentivement par rapport aux divers stades d'un système énergétique (production, transmission et distribution) les critères qui permettent de reconnaître un monopole naturel des approvisionnements en électricité dans un pays donné. Il faudra aussi étudier les économies découlant d'une intégration verticale et d'une coordination, à la fois au sein de chaque stade du réseau et entre ces derniers. De façon plus générale, le principe global à la base de la macro-économie (p. ex., à caractère socialiste, mixte ou capitaliste), le niveau de dépendance à l'égard des forces du marché et la possibilité d'accès aux marchés financiers des institutions autonomes représentent également des facteurs importants lorsqu'il s'agit d'établir le cadre institutionnel et les principes de réglementation du secteur.

Le stade de la distribution est probablement celui qui se prête le mieux à une réforme. Habituellement, le transfert de la fonction de distribution à partir d'un approvisionnement en vrac est un pas dans la bonne direction facile à franchir. Sur les grands marchés de l'énergie, on peut également favoriser une concurrence entre les producteurs — en commençant possiblement par la cogénération. Cependant, la complexité des problèmes d'ordre juridique et contractuel est susceptible d'être plus importante que celle des problèmes techniques.

En règle générale, les réformes organisationnelles ne débouchent pas sur des avantages marqués si l'on n'a pas d'abord établi une tarification appropriée de l'électricité, bien que l'on puisse toutefois accroître le rendement en installant des compteurs et en adoptant un système de facturation et de recouvrement. En conséquence, il conviendra de poursuivre les réformes en matière de tarification quel que soit le programme de réorganisation du secteur de l'énergie (Munasinghe et Warford 1982; Collier 1984).

On s'emploiera à surveiller l'expérience des autres pays et à effectuer un plus grand nombre d'études de cas de pays particuliers. On aura également avantage à examiner les progrès réalisés dans d'autres secteurs connexes comme les télécommunications et le gaz naturel.

Il importe de pousser la recherche appliquée afin de déterminer les possibilités d'adapter le type d'organisation d'un service public au nouveau milieu technologique. À notre avis, l'innovation en matière d'organisation dans l'industrie de l'énergie et les questions économiques afférentes représentent l'une des voies les plus prometteuses de la recherche dans les pays en développement.

Optimisation des opérations, de la tarification et de la planification des investissements

Les deux grandes décisions de principe que doivent prendre les services publics ont trait aux investissements et à la tarification de l'électricité; ces deux secteurs sont donc des candidats de premier choix à une recherche plus approfondie. Dans la plupart des pays en développement où le gouvernement est le principal fournisseur des services d'électricité, celui-ci peut intervenir directement dans le secteur. Une formulation et une analyse adéquates des programmes doivent reposer sur les éléments suivants. En premier lieu, on doit préciser clairement les objectifs de la politique du pays et des sociétés. En deuxième lieu, les modèles de la politique doivent définir et quantifier explicitement les relations technico-économiques les plus importantes au sein du secteur de l'électricité ainsi que ses interactions avec le monde extérieur. En troisième lieu, on doit tenir compte systématiquement des autres limites socio-politiques difficilement quantifiables. En dernier lieu, on doit pouvoir facilement établir des mesures simples à partir des résultats, et la méthode doit être pratique et applicable même en présence de données de piètre qualité.

Du point de vue technico-économique, l'analyse a comme objectif de base de préciser un train de mesures qui permettront de maximiser les retombées nettes de la consommation d'électricité pour la société dans son ensemble. Cette approche correspond à l'utilisation la plus efficace de ressources économiques rares et à la maximisation de la production ou du produit intérieur brut (PIB) en se basant sur un point de vue économique d'ordre national. Il y a plusieurs autres objectifs importants, comme satisfaire les besoins énergétiques fondamentaux des consommateurs moins nantis, rompre la dépendance à l'égard des sources étrangères de financement, mobiliser des ressources monétaires en vue des investissements futurs, etc., qui influenceront également la tarification et les plans d'investissement.

Dans un programme d'investissement, on peut utiliser le principe de la maximisation nette des bénéfices pour optimiser le processus global de planification et la fiabilité du réseau ainsi que pour réduire au minimum les pertes. Il arrive souvent que le critère de maximisation des bénéfices nets se réduise à une simple règle de minimisation du coût total, par exemple dans une planification des investissements au moindre coût. Ces dernières années, on a mis au point des techniques et des modèles complexes de planification de réseau ayant pour but de minimiser le coût d'approvisionnement d'une demande à long terme à un niveau de fiabilité acceptable (ou qualité d'approvisionnement) (Munasinghe 1979). C'est aussi sous cet angle que l'on aborde la taille optimale, la composition et le moment d'introduction des nouvelles installations, tout comme les modèles connexes permettent d'arriver à une exploitation optimale (au moindre coût) du réseau (Turvey et Anderson 1977).

À l'heure actuelle, des travaux ont lieu sur une nouvelle approche qui cherche à minimiser le coût total, c'est-à-dire le coût d'approvisionnement et le coût de pénurie (il s'agit ici du coût assumé par les abonnés en raison d'un approvisionnement déficient). Il faudra approfondir la recherche pour trouver des méthodes servant à évaluer le coût de pénurie dans les pays en développement.

Dans un programme de tarification, les principes économiques de base obligent l'exploitant à établir des prix qui traduisent les coûts marginaux d'approvisionnement, assurant ainsi la satisfaction des critères d'efficience économique. Toutefois, on doit systématiquement rajuster ces coûts marginaux pour offrir une tarification pratique qui réponde aux autres objectifs de la politique nationale, par exemple, satisfaire aux besoins fondamentaux en électricité des consommateurs moins bien

nantis, assurer la viabilité financière de l'entreprise, la stabilité des prix et ainsi de suite.

La rareté des ressources énergétiques et le coût croissant des approvisionnements en énergie dans le monde ont fait ressortir l'importance d'une politique en matière d'économie d'énergie et d'élimination des pertes par les producteurs et les utilisateurs de cette énergie. L'une des façons principales d'atteindre cet objectif dans le secteur de l'électricité consiste à réduire les pertes du réseau (Munasinghe et Scott 1982).

Lorsqu'elle approvisionne ses abonnés en électricité, une compagnie fait face à des pertes aux stades de la production, de la transmission et de la distribution. Elle peut réduire ses pertes de production en améliorant l'efficacité de la centrale et en diminuant l'utilisation des stations; par exemple, en recourant à de nouvelles installations comme des centrales thermiques à cycle binaire, en remplaçant les anciennes chaudières et, de manière générale, en augmentant la capacité des anciennes installations thermiques, en recourant aux plus récentes techniques dans les nouvelles centrales hydro-électriques, en remplaçant les vieilles turbines, etc. En faisant abstraction du stade de la production (où les normes acceptables en matière de pertes fluctuent selon le type de centrale), les récents travaux indiquent que les pertes énergétiques moyennes d'un réseau de distribution d'énergie, c.-à-d. dans la transmission et la distribution, devraient normalement se situer en deçà de 10 % de la capacité brute de production, alors que sur le plan économique le niveau optimal de pertes serait aussi minime que 5 %. Dans beaucoup de réseaux de pays en développement, ces pertes atteignent 20 % même après avoir tenu compte d'un pillage excessif du réseau.

Le principe de base consiste ici à minimiser le coût global d'approvisionnement, que l'on définit comme la somme des coûts du réseau majorée de la valeur des pertes dans le système. Des investissements modestes dans une modernisation du réseau peuvent souvent se traduire par une diminution plus que correspondante au niveau des pertes. En d'autres mots, il est souvent beaucoup plus rentable de chercher à réduire les pertes que de construire d'autres installations d'approvisionnement pour combler l'écart.

Un important secteur d'amélioration touche la capacité d'exploitation des centrales qui, selon les observations effectuées, est faible dans bon nombre de pays développés (Khatib 1983). En voici les principales causes :

- *Mauvaise configuration du réseau* L'absence d'un réseau interconnecté peut empêcher toute stabilisation du réseau; ou bien, la proportion de centrales importantes dans un réseau peut être trop élevée compte tenu des réserves secondaires.
- *Mauvaise répartition des investissements* Il peut y avoir un approvisionnement déficient en pièces de rechange ou une capacité de réserve insuffisante dans les réseaux auxiliaires, de contrôle et de protection.
- *Limites opérationnelles* Le combustible peut ne pas convenir à l'usine ou il peut y avoir pénurie de main-d'oeuvre spécialisée.
- *Diminution de capacité de la centrale* Une mauvaise gestion peut entraîner une baisse de la capacité de la centrale.

Les examens diagnostiques de certains réseaux et centrales en vue de leur apporter des mesures correctives se révèlent d'une utilité considérable.

Les réseaux électriques dans les pays en développement sont beaucoup plus petits que ceux des pays industrialisés, les centrales étant habituellement aussi d'une plus petite taille. Le matériel de ces centrales n'est pas produit en série par les

grands fabricants mais fait plutôt l'objet d'une commande spéciale. Toutefois, la demande est constante et si les fabricants normalisaient la capacité de ce matériel entre 25 MW et 250 MW, la production en série se traduirait par des économies d'échelle et des innovations graduelles. On pourrait d'ailleurs fabriquer plus facilement ce genre de matériel s'il était le fruit d'un programme mixte d'un certain nombre de pays en développement.

De façon générale, les pays en développement n'ont pas d'avantage comparatif dans la recherche et le développement du matériel dernier cri entrant dans les réseaux de production, de transmission et de distribution. Les grands pays comme le Brésil, la Chine et l'Inde disposent peut-être des ressources et des débouchés internes pour soutenir de façon rentable ce genre de recherche. Les pays en développement pourraient également conclure des ententes de collaboration entre eux et exploiter des coentreprises avec des sociétés étrangères.

Les réseaux photovoltaïques solaires

On connaît depuis longtemps le potentiel énergétique solaire des pays en développement qui, pour la plupart, bénéficient d'un climat tropical ou subtropical. Ce type d'énergie convient particulièrement bien aux régions arides d'Asie occidentale et d'Afrique du Nord qui jouissent d'un ensoleillement intense pendant la plus grande partie de l'année (Kettani 1982). Même si l'intérêt dans l'énergie solaire remonte à près de 30 ans (Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture 1956), les conséquences pratiques de cette énergie sont encore de faible envergure. En effet, les réseaux photovoltaïques solaires présentent des perspectives différentes de celles des systèmes thermiques solaires, ces derniers faisant l'objet de la section suivante.

L'absence d'économies d'échelle marquées favorise l'exploitation des réseaux photovoltaïques en mode autonome en dehors des réseaux interconnectés. Toutefois, les investissements par unité de puissance (watt) sont encore élevés, restreignant ainsi la technique à des applications de faible capacité. Les plus évidentes en sont la radio, la télévision et les télécommunications, mais l'éclairage présente aussi quelques attraits. Toutes ces applications nécessitent le stockage de l'énergie, mais on peut en éviter les coûts si l'on alimente directement le réseau. Dans les pays où la demande de pointe pendant le jour est élevée (par exemple où il y a des besoins importants de climatisation et de réfrigération et lorsque la demande résidentielle et commerciale domine la courbe de la charge), les réseaux connectés trouvent alors leur justification.

Les réseaux autonomes et connectés nécessitent l'emploi d'un matériel de transformation de l'énergie, dont le coût sera beaucoup plus important dans les petits réseaux. Dans les réseaux autonomes, le type de matériel varie selon l'utilisation. Ainsi, un réseau à tension alternative aura besoin d'un régulateur de tension et d'un inverseur autocommuté. Les réseaux à grille requièrent des inverseurs simples bon marché ainsi que des filtres harmoniques pour éliminer les parasites dans la grille.

Réseaux photovoltaïques actuels

Les réseaux photovoltaïques actuels, basés sur des cellules à silicium monocristallin et polycristallin, donnent lieu à quatre étapes de fabrication (Backus 1984a, b; Luque 1984).

- *Fabrication du silicium* Les efforts visant à diminuer les coûts se sont soldés par une perte de pureté du cristal. Cependant, cette perte entraîne aussi un fléchissement de l'efficacité de la cellule, ce qui limite les occasions de diminuer les coûts.
- *Fabrication de feuilles de silicium* Les progrès récents à ce chapitre, notamment les feuilles continues à silicium monocristallin et les tranches de silicium polycristallin, diminuent les coûts mais aussi l'efficacité.
- *Fabrication de cellules* La technique dans ce domaine ne change pas beaucoup et les progrès ont sans doute été arrêtés par l'automatisation des opérations.
- *Fabrication de panneaux* Dans ce domaine, on s'efforce d'accroître la production énergétique par cellule à l'aide de concentrateurs. Cette méthode a l'avantage de restreindre le nombre de cellules photovoltaïques sous ensoleillement direct mais elle nécessite des dispositifs de guidage. Ces dispositifs permettent des économies d'échelle pendant le fonctionnement et accroissent la taille minimale d'une centrale de production à 3 MW.

On a observé une chute rapide du coût des modules photovoltaïques, de 50 $ US/Wc (watt crête) en 1973 à 6 $ US en 1984. On a aussi constaté ces dernières années une guerre des prix entre les filiales des sociétés pétrolières et d'autres fabricants. Lorsque cet affrontement prendra fin, le prix des cellules pourrait bien augmenter. Quoi qu'il en soit, il semble peu probable que l'on assiste à des innovations majeures dans la fabrication de cellules photovoltaïques conventionnelles permettant de réduire les coûts de façon importante.

Perspectives de progrès

À l'heure actuelle, les cellules en couche mince ne sont pas concurrentielles mais on fonde beaucoup plus d'espoir sur leur amélioration; elles sont également d'une fabrication beaucoup plus aisée. Leur efficacité est faible de même que leur stabilité à l'extérieur. Il y a deux types de cellules en couche mince, c'est-à-dire les cellules à semi-conducteurs composés et les cellules à semi-conducteurs amorphes, ces dernières présentant le plus d'intérêt.

Par comparaison aux cellules à silicium cristallin, les cellules à semi-conducteurs amorphes absorbent mieux le rayonnement et affichent une meilleure photoconduction dans toute la gamme des radiations du spectre solaire; elles utilisent également moins de silicium. À l'heure actuelle, on s'en sert surtout dans les montres et les calculatrices. Toutefois, on peut les déposer sur n'importe quelle substance non cristalline. Ainsi, on effectue des essais de dépôt au Japon sur des pellicules de polymère, des substrats d'acier inoxydable et des substrats de céramique. Sanyo est sur le point de les intégrer à des carreaux de toiture. Dans les applications commerciales, ces cellules donnent un rendement estimatif d'environ 10 % (Hamakawa 1985).

La facilité avec laquelle on fabrique les cellules en couche mince a amené les pays en développement à effectuer une multitude de recherches à leur sujet. Lorsque la technique atteindra l'étape de la commercialisation, elle reposera sur des compétences différentes; entre-temps, elle ne souffre d'aucun handicap. Ainsi, la recherche sur les techniques des cellules en couche mince semble particulièrement prometteuse pour les pays en développement et il y aurait lieu de la faire progresser davantage en créant des réseaux d'échange entre les chercheurs de ces pays.

L'électricité thermique solaire

Le rayonnement solaire est très diffus; comme le faisait remarquer Tabor (1981)

> . . . en prenant le rayonnement solaire moyen dans le monde, qui est établi à environ 200 W/m^2 (en continu) ou 17 MJ/m^2 par jour, il faudrait à peu près 260 m^2 de capteurs pour remplacer un baril de pétrole par jour, en supposant une efficacité à 100 % de chaque capteur : dans la pratique, les rendements sont beaucoup plus bas de sorte qu'il faut mettre en place des superficies beaucoup plus considérables.

En fait, la centrale de réception Solar One de 10 MW était branchée à 1 818 héliostats de 39 m^2 chacun, atteignait une efficacité moyenne de 13 %, produisait 71 MWh/jour dans un endroit recevant une insolation de 950 à 990 W/m^2 pendant une journée moyenne d'ensoleillement d'entre 10 et 11 heures et enfin, coûtait 13 $ US le W (Weingard 1984). Là où la période d'ensoleillement est moins grande, l'investissement sera supérieur. Il est indéniable que la technique s'améliorera et que les coûts régresseront à mesure que l'on construira de nouveaux prototypes. Mais pour l'instant, c'est une technique très marginale dont l'avenir est incertain. Nous ne voyons donc aucune justification à effectuer des recherches à ce sujet dans les pays en développement à l'heure actuelle.

Production d'énergie éolienne

Les génératrices éoliennes peuvent être autonomes ou raccordées à un réseau. Autonomes, elles ont des débouchés dans les pays en développement, notamment dans les régions que le réseau ne peut atteindre. Ces génératrices nécessitent des batteries. Pour obtenir un taux de fiabilité à un faible coût, il est important de calculer la taille des batteries en fonction de l'emplacement.

Les génératrices raccordées à un réseau n'ont pas besoin de batteries; elles fournissent aussi des économies d'échelle puisque la demande locale ne limite pas leur production. Elles supposent donc des investissements inférieurs (Piepers 1985).

L'évolution des génératrices éoliennes a touché en grande partie les appareils reliés à un réseau aux États-Unis. Outre le régime favorable des vents dans certaines régions des États-Unis, trois raisons expliquent ce phénomène : les stimulants fiscaux ou l'aide financière directe du gouvernement visant à encourager les acheteurs d'appareils raccordés à un réseau; les instructions données par le gouvernement aux services publics pour qu'ils achètent l'électricité à un prix déterminé par la loi; et une génératrice éolienne connectée à un réseau représente une proposition beaucoup plus commercialisable et rentable pour les fabricants des États-Unis étant donné que les consommateurs potentiels d'électricité sont presque tous déjà raccordés à un réseau (Merriam 1984).

Une forte proportion des appareils raccordés au réseau sont dotés d'un axe horizontal dont la technique est assez bien établie. Bien que des appareils à axe vertical (Savonius et Darrieus) aient été mis au point, ils n'ont pas encore atteint la fiabilité et l'efficacité des appareils à axe horizontal (Kristoferson et al. 1984). L'un des gros inconvénients des génératrices à axe vertical réside dans l'impossibilité d'en réduire la vitesse par un enserrement de l'axe, ce qui oblige à utiliser d'autres méthodes pour arriver à la même fin.

Le principal problème opérationnel des génératrices éoliennes connectées à un réseau est celui de la commande de la puissance, opération nécessaire pour maintenir la stabilité dans les réseaux interconnectés. Pour contrôler la limite de puissance des génératrices éoliennes à axe horizontal, on modifie le pas de l'hélice alors que dans les génératrices à axe vertical, il faut recourir à un type quelconque de déporteur ou à un freinage aérodynamique (Quraeshi et al. 1984). La nécessité de régler la tension et la puissance réactive influe directement sur le choix d'une génératrice. À l'heure actuelle, les machines commerciales possèdent une hélice à pas fixe avec commande de survitesse et génératrice asynchrone, et une hélice à pas variable avec génératrice synchrone (Sexon et al. 1981).

Bien que l'on ait tenté d'utiliser des génératrices éoliennes en tandem avec des génératrices diesel dans certains pays industrialisés, des problèmes peuvent survenir lorsque la génératrice diesel est appelée à modifier fréquemment sa tension de sortie en fonction des fluctuations du vent. Outre un fléchissement de l'économie possible de mazout avec la génératrice éolienne, des mises au point plus fréquentes de la génératrice diesel pourraient s'avérer nécessaires. Il y aurait donc augmentation des coûts dans les deux cas (Kristoferson et al. 1984). On peut contourner ce problème par des batteries d'accumulation qui permettraient d'alléger le fardeau de la génératrice diesel mais qui feraient monter les coûts.

Un programme de production d'énergie éolienne nécessite une recherche approfondie sur le terrain pour établir si le régime des vents est favorable à cet égard : la vitesse des vents ne doit être ni trop basse pour la production ni trop élevée de manière à obliger la construction d'une structure trop solide et trop coûteuse. Le nombre d'emplacements propices à la production d'énergie éolienne est donc susceptible d'être restreint; c'est ce nombre qui déterminera l'étendue maximale du marché à l'intérieur duquel on pourra installer l'énergie éolienne. Si un pays en développement arrive à ce stade, il aura besoin de mettre au point un modèle normalisé pour la production. Il sera alors bien avisé de choisir le plus grand système possible pouvant être produit de façon économique étant donné que la production de puissance d'une éolienne varie proportionnellement au carré de l'envergure de son hélice. Les principaux problèmes techniques que ce pays éprouvera toucheront probablement le raccordement entre la génératrice elle-même et le réseau de distribution.

Chapitre 11 Sources d'énergie motrice

L'énergie motrice représente une grande part de la demande, mais seuls le vent, l'eau en mouvement et les sources d'«énergie vivante» («animate energy») peuvent directement en produire. L'énergie du vent occupait jadis une place primordiale dans le transport maritime et était largement utilisée dans les minoteries, mais le rôle qu'elle occupe aujourd'hui est insignifiant. L'énergie hydraulique servait autrefois à faire fonctionner l'industrie mais on n'y recourt plus maintenant que pour la production d'électricité. Toutefois, l'énergie vivante est toujours importante dans les pays en développement, mais à des niveaux variables. L'amélioration des conditions de travail constitue une étape importante du développement puisqu'elle se solde par une diminution des tâches physiques ingrates ; la recherche sur l'énergie humaine représente donc un domaine essentiel de la recherche énergétique.

La pompe éolienne devient de plus en plus légère et facile à assembler et à faire fonctionner, mais sa conception demeure toujours empirique ; on pourrait l'améliorer par des observations plus précises de son rendement. Le couplage des pompes aux rotors serait une autre voie de la recherche.

On peut mesurer l'énergie humaine de trois façons : en termes de travailleurs, de temps de travail et de calories. Les deux premières constituent des approximations. Les données de mesures réelles en ce qui touche les calories n'ont pas permis d'établir une théorie valable parce que l'on n'a pas encore pu étudier de façon systématique les fluctuations de la dépense calorifique du travail. Dans ce domaine, l'innovation théorique devrait correspondre à des mesures plus précises.

Bien que l'énergie motrice figure pour une large proportion dans l'énergie consommée par l'industrie, l'agriculture et les transports, seules trois sources primaires fournissent directement ce genre d'énergie : le vent, l'eau en mouvement et les sources «vivantes». L'énergie du vent occupait une place primordiale dans le transport maritime jusqu'à l'avènement du bateau à vapeur et on y a recouru de façon marquée dans le broyage des céréales dans certaines parties d'Europe et en Chine. Aujourd'hui, son importance a beaucoup diminué et elle est peu susceptible de devenir une source d'énergie de premier plan. L'énergie hydraulique jouait un rôle important dans le fonctionnement des industries dans de nombreux endroits avant l'apparition des moteurs; on s'en sert uniquement aujourd'hui dans la production d'électricité.

Avant la révolution industrielle, l'homme et l'animal constituaient les principales sources d'énergie motrice. Depuis lors, on les a remplacés et complétés par des sources d'énergie «inanimées» dans les pays industrialisés où leur importance est insignifiante par rapport à celle des sources d'énergie «non vivantes» ; en outre, les travailleurs sont occupés pour la plupart à des tâches non physiques.

Dans les pays en développement, on observe également un accroissement de la part des sources d'énergie «inanimées» et une prépondérance de cette forme d'énergie dans beaucoup d'entre eux. Toutefois, la proportion des deux types d'énergie

fluctue considérablement d'un secteur à l'autre; l'énergie «vivante» demeure importante en agriculture et dans les petits réseaux de transport. Il ne fait pas de doute qu'une forte proportion de la population active tire sa subsistance du travail physique. Étant donné que le développement est autant une question d'amélioration des conditions de travail que du niveau de vie, l'énergie humaine et ses applications constituent l'un des plus importants secteurs de la recherche énergétique.

L'énergie éolienne

Les éoliennes n'ont aucune utilisation directe, ce qui explique pourquoi on les emploie toujours avec une génératrice ou une pompe. Pour minimiser les coûts, il est nécessaire d'harmoniser le régime des vents, l'éolienne et l'appareil de conversion. Cette tâche oblige à effectuer à chaque emplacement des calculs mathématiques assez complexes. Parallèlement, il importe de produire un minimum d'éoliennes et de convertisseurs pour ramener les coûts à un niveau raisonnable. En conséquence, la planification intégrée des systèmes éoliens peut rapporter des dividendes substantiels.

Des vents intenses accroissent la puissance potentielle mais ils obligent cependant à construire des éoliennes plus solides; l'investissement augmente donc en fonction de la vitesse maximale du vent, mais passé un certain point, les éoliennes deviennent trop coûteuses pour être rentables. Même si on peut les exploiter, on doit s'assurer qu'elles ne pourront être endommagées par des vents violents. On y parvient en modifiant le pas des hélices ou l'orientation du rotor par rapport à la direction du vent. Si ces opérations s'effectuent manuellement, elles nécessitent une surveillance constante et des coûts de main-d'œuvre correspondants; par contre, l'emploi de servomécanismes fait grimper l'investissement. De plus, l'exposition aux intempéries et les contraintes imposées aux pièces mobiles supposent un entretien fréquent. Les immobilisations nécessaires aux éoliennes peuvent donc atteindre un niveau substantiel et leur coût de fonctionnement, une proportion non négligeable.

Nous avons abordé la question des génératrices éoliennes au chapitre 10, de sorte que nous nous limiterons ici aux pompes éoliennes. Certains paramètres de conception différencient les pompes éoliennes des génératrices éoliennes. Pour mettre la pompe en mouvement, il faut d'abord amener le piston à son point mort supérieur. Les pompes éoliennes nécessitent donc un couple élevé au démarrage qui varie en proportion inverse du rapport de la vitesse périphérique des hélices. En revanche, la puissance d'une génératrice éolienne est en relation directe avec cette vitesse périphérique. En conséquence, les éoliennes qui présentent un faible rapport de la vitesse périphérique des hélices et un rapport élevé de la surface des pales à la surface balayée (pleine) servent dans les pompes éoliennes : c'est le cas des rotors Savonius ou des appareils à axe horizontal à hélices multiples.

Les pompes éoliennes comportent deux applications distinctes : les pompes d'approvisionnement en eau et les pompes d'irrigation. Les premières doivent être fiables, pouvoir fonctionner sans surveillance la plupart du temps et nécessiter un minimum d'entretien. Leur prix est donc élevé en comparaison de leur puissance. De fabrication industrielle, ces pompes comportent des composantes en acier ainsi que des dispositifs de protection automatiques qui empêchent l'emballement des hélices pendant les tempêtes (McNelis et Fraenkel 1984). Les pompes éoliennes agricoles traditionnelles à hélices multiples appartiennent à cette catégorie; outre

leur poids, elles renferment un grand nombre de pièces d'un assemblage complexe, mais elles sont robustes et fiables. Les modèles plus récents tendent à être plus légers puisqu'ils utilisent des tubes de construction au lieu de sections laminées. Leur montage par module en simplifie la structure et la fabrication. On peut également leur assortir un entraînement électrique lorsqu'elles sont utilisées dans les régions à vents intenses (Intermediate Technology Power Ltd 1983).

Comme les pompes éoliennes d'irrigation sont uniquement utilisées en saison, on s'attache davantage à leur coût qu'à leur capacité de fonctionnement sans surveillance. Ce genre de pompe est donc souvent conçu ou improvisé localement par les agriculteurs qui utilisent des matériaux disponibles pour arriver à un produit peu coûteux. La plupart de ces machines «bricolées» se composent de bois ou d'éléments de charpente de base en acier et utilisent une voilure de toile ou de bois. Elles sont moitié moins efficaces que les pompes d'approvisionnement et peuvent nécessiter des ajustements et une lubrification assez fréquentes. On a déjà tenté de les améliorer en appliquant certains principes scientifiques aux matériaux et aux modèles locaux (voir Stanley 1977; Govinda Raju et Narasimha 1980).

Les anciens modèles ont tendance à afficher une plus grande fiabilité, mais ils sont plus lourds, plus coûteux à l'expédition et plus complexes à assembler. Par contre, l'efficacité ou la durée de vie des nouveaux modèles n'est pas encore éprouvée sur le terrain. Les tentatives visant à transférer d'une région à l'autre la technique des pompes éoliennes d'irrigation de faible coût se sont habituellement soldées par un échec, possiblement à cause d'une discordance sur le chapitre du régime des vents, des besoins en irrigation et de la capacité de pompage. Il se pourrait aussi que l'on n'ait pas considéré le faible coût d'une pompe éolienne comme une fonction du coût des matières premières et de la main-d'oeuvre. D'où les variations régionales dans le coût d'une pompe éolienne.

Sur le plan technique, deux secteurs de la recherche pourront se révéler prometteurs à long terme. À cause de l'absence de données scientifiques et d'équipement de mesure, la conception des pompes éoliennes dans le passé était en grande partie le fruit d'un travail empirique, ce qui explique dans une large mesure leur rendement sous-optimal. En apportant des modifications mineures, on pourrait accroître considérablement la performance de quelques-unes de ces machines.

Dans un deuxième temps, il conviendrait d'apparier les rotors aux pompes chaque fois que l'on recourt à une pompe alternative. On constate deux anomalies à ce titre. La première vient du fait que la puissance disponible d'un rotor est proportionnelle au cube de la vitesse du vent alors que la demande de puissance d'une pompe varie uniquement en courbe linéaire avec sa vitesse. La seconde anomalie provient du couple cyclique des pompes à piston où le couple de démarrage pour le premier cycle est trois fois plus élevé que le couple moyen une fois le moteur lancé. Dans le premier cas, il conviendrait d'effectuer des recherches sur des pompes dont la vitesse correspond mieux à la puissance disponible, alors que dans le second, il faudrait mettre au point des méthodes pour diminuer le couple de démarrage.

Bien que les pompes électriques éoliennes donnent un meilleur rendement que les systèmes mécaniques à vent, on ne possède pas beaucoup de données jusqu'à maintenant à ce sujet. On peut toutefois les utiliser à une hauteur plus élevée, loin des plans d'eau et dans des régions plus favorables au vent, outre qu'on puisse également les employer pour charger des batteries d'accumulateurs.

L'énergie humaine

L'énergie humaine constitue sans doute l'aspect le plus important du domaine énergétique dans les pays en développement; il ne fait pas de doute que l'importance des études énergétiques diminuerait grandement si l'on n'en tenait pas compte. C'est également un secteur où la recherche a le moins permis de comprendre les forces en jeu ou d'établir des politiques à cet égard. La difficulté tient à la mesure de l'énergie humaine elle-même.

En économique, le concept qui se rapproche le plus de l'énergie humaine est le nombre de travailleurs. Le nombre potentiel de travailleurs s'appelle la main-d'oeuvre alors que l'on désigne par les mots emploi et chômage le nombre respectif de personnes réellement occupées et non occupées. Dans les années 30, au moment où le chômage frappait une forte proportion des travailleurs dans les pays industrialisés, Keynes offrait une explication du chômage (1936). Dans les pays en développement, le problème surgit souvent non pas à cause du chômage total des personnes désireuses de travailler, mais bien du chômage occasionnel ou partiel. C'est ce que Joan Robinson (1947) a appelé le chômage déguisé. On a d'ailleurs observé diverses variations conceptuelles du phénomène et offert des explications pour celles-ci (Turnham et Jaeger 1970; Todaro 1981). Toutefois, les estimations empiriques du nombre de travailleurs demeurent trop approximatives en termes d'intensité de travail pour être utilisées dans la recherche énergétique.

Les mesures de l'utilisation du temps permettent de mieux comprendre le concept et d'étudier plus en détail le phénomène du travail. Les études anthropologiques ont recueilli une foule de données sur l'utilisation du temps (Carlstein et al. 1978, b, c). Récemment, Carlstein (1983) recourait à ces données pour affiner le concept de la capacité de charge. On l'a employé comme valeur de remplacement de la charge de travail au sein de la famille (Tinker 1984). Les sociologues (voir Szalai et al. 1972) et les économistes (voir Winston 1982) se sont également intéressés à l'utilisation du temps. Toutefois, les études de l'utilisation du temps supposent que l'énergie dépensée par unité de temps est constante, ce qui n'est manifestement pas le cas.

Les physiologistes connaissent depuis longtemps les fluctuations de l'intensité énergétique dans l'activité humaine; Passmore et Durnin (1955) sont d'ailleurs ceux qui ont tenté de la façon la plus systématique de les quantifier. Depuis ce temps, on a produit de nombreuses estimations de la dépense d'énergie par unité de temps dans un vaste éventail de circonstances pour ensuite calculer les bilans énergétiques du genre humain (p. ex., Thomas 1973).

C'est Leibenstein qui a avancé l'idée que le coût du travail pouvait varier en fonction de l'alimentation. Selon son hypothèse, le rendement en travail physique provenant de la transformation d'aliments est faible lorsque le travailleur subit une malnutrition grave, elle augmente en fonction de l'apport de nourriture puis régresse pour atteindre un point où une ingestion supplémentaire n'accroîtra pas la production de travail. On a largement utilisé cette relation, connue sous le nom du mécanisme d'efficacité du travail (Bliss et Stern 1978), en théorie économique. Il faudra cependant attendre les travaux de Sukhatme et Margen (1982) sur les fluctuations systématiques du rendement de l'énergie humaine dans l'activité physique pour que cette relation soit acceptée en physiologie. Plus récemment, Borrini et Margen (1984), dans une communication que nous leur avions commandée, ont largement démontré que l'énergie humaine présentait une efficacité variable et ils ont remis en doute la validité des modèles mécaniques de l'équilibre énergétique

chez l'homme. D'autres physiologistes contestent vivement leur point de vue (voir Rand et Scrimshaw 1984).

À notre avis, tout le domaine de la physiologie de l'énergie humaine n'est qu'une multitude de théories non appuyées par des mesures suffisamment précises, un effarant travail empirique non assorti des théories d'essai pertinentes et enfin des généralisations fondées sur des moyennes sans considération aucune de leurs fluctuations. Dans les conditions actuelles, il se peut que des données plus précises sur le métabolisme humain en réaction à des variations dans le travail, la nutrition et le milieu puissent déboucher sur des hypothèses plus concrètes. Quoi qu'il en soit, il semble évident que toute nouvelle recherche empirique dans ce domaine entraînera un gaspillage de fonds si l'on ne s'attache pas d'abord à clarifier la théorie.

Entre-temps, le rôle de l'énergie humaine dans les systèmes de production demeure au centre des problèmes de développement. Nous ne saurions trop insister sur l'importance de la recherche dans ce domaine mais nous croyons qu'une innovation théorique s'impose pour mieux comprendre l'utilisation ou plutôt la sous-utilisation de l'énergie humaine dans les activités socio-économiques.

Chapitre 12 Effets sur l'environnement

Bien que l'on retrouve partout dans l'environnement les conséquences de l'utilisation et de la production d'énergie, ces conséquences ne sont pas uniquement le fait de l'énergie et leur étude ne relève pas directement de la recherche énergétique. Notre rapport porte donc seulement sur trois questions apparentées étroitement à l'énergie : le déboisement et la désertification, l'effet de serre et les pluies acides.

Le lien logique entre la consommation de bois de feu, le déboisement et la désertification est ténu et fondé en partie sur une mauvaise interprétation. En effet, l'utilisation de bois de feu n'a pas nécessairement ni fréquemment comme conséquence le déboisement des forêts. Le phénomène du déboisement peut être cause de préoccupation pour des raisons scientifiques, esthétiques ou économiques; dans chaque cas, le reboisement ne constitue pas nécessairement la meilleure solution. La désertification provient de l'enlèvement de la couverture végétale, laquelle se compose rarement de forêt dans les régions arides susceptibles d'être envahies par le désert. Ici encore, plusieurs solutions s'offrent à nous et le reboisement n'est pas toujours la meilleure. Ce domaine doit faire l'objet d'une recherche plus approfondie.

Des preuves irréfutables nous indiquent que la concentration de gaz carbonique dans l'atmosphère augmente de plus en plus et son rapport avec l'utilisation de combustibles fossiles est également assez évident bien que l'on doive tenir également compte d'autres facteurs. D'après cette relation, la concentration de gaz carbonique devrait doubler d'ici le milieu du XXI^{e} siècle. Cependant, il subsiste encore beaucoup d'incertitudes sur le niveau d'élévation des températures dans le monde à la suite de cette concentration, ainsi que sur les effets de réchauffement. On comprend mal le mécanisme des fluctuations climatiques et les pays industrialisés auraient autant avantage que les pays en développement à approfondir leurs connaissances dans ce domaine.

La plupart des précipitations de pluie sont légèrement acides. On croit que cette acidité proviendrait des oxydes d'azote. Bien qu'elles soient formées par la combustion et la rupture des engrais naturels, la plupart des émissions dans le monde proviennent de la décomposition naturelle de la biomasse. L'acidité peut aussi se produire par l'anhydride sulfureux et le sulfure d'hydrogène qui se dégagent de la combustion des combustibles sulfureux et dans les éruptions volcaniques. Ces dernières années, les précipitations en Amérique du Nord et dans les pays d'Europe de l'Ouest sont devenues tellement acides qu'elles ont détruit certaines espèces de la flore et de la faune; on a relié ce phénomène à la combustion de matières sulfureuses. Toutefois, le chimisme des pluies acides comporte deux points obscurs : le cycle des oxydes d'azote et des composés organiques instables et le rôle des radicaux hydroxyle et hydroperoxyle. La compréhension de ces deux questions influe fortement sur la façon de traiter ce problème. Les mesures de lutte nécessitent également que l'on effectue des recherches sur la préparation du charbon, la géométrie des chaudières, l'efficacité de la combustion et le traitement des fumées. Ces recherches pourraient être utiles aux pays en développement qui consomment de la biomasse et des combustibles fossiles à grande échelle.

Les grandes activités de consommation et de production d'énergie ont pour la plupart des effets sur l'environnement dont certains touchent de vastes territoires. Par exemple, l'extraction minière et l'utilisation du charbon peuvent avoir de vastes répercussions sous terre, sur terre et dans les airs (fig. 1). Certains de ces effets sur l'environnement sont délétères et constituent une matière à préoccupation. Il faudrait clairement les définir et en tenir compte dans la planification des investissements énergétiques.

Tout au long du présent rapport, le Groupe a été confronté au problème des limites, particulièrement aigu dans le domaine de l'environnement. En effet, quelques-uns des principaux effets sur l'environnement sont liés, non pas aux activités énergétiques comme telles, mais bien aux différents modes d'exploitation et de transformation des ressources. Dans la formulation des politiques touchant les questions environnementales, il serait erroné d'attribuer les problèmes uniquement au domaine de l'énergie. Les effets environnementaux proviennent de toute une gamme de phénomènes liés à la croissance comme l'accroissement démographique, l'augmentation des revenus et le développement de l'agriculture, de l'industrie, des mines et des transports; c'est à ces phénomènes que les politiques environnementales doivent s'attaquer. Au surplus, la recherche environnementale n'a aucun lien étroit avec la recherche énergétique. Les personnes, les techniques et les questions qui touchent ces deux domaines sont encore fort éloignées. Pour rendre justice à la recherche environnementale, il aurait fallu retenir les services de toute une panoplie de spécialistes. Pour ces raisons, le Groupe a décidé de se restreindre à la recherche énergétique au sens strict.

Toutefois, il y a trois questions environnementales qui sont étroitement liées à l'énergie et qui méritent, à notre avis, que les pays en développement s'y intéressent de façon sérieuse : le déboisement et la désertification, l'effet de serre et les pluies acides. Nous les examinons ci-après.

Déboisement et désertification

Le lien logique entre la combustion domestique de bois de feu, le déboisement et la désertification, bien qu'il n'ait jamais été observé à fond dans la documentation, a sensibilisé l'opinion à un point tel qu'il importe de l'aborder sérieusement.

Consommation de bois de feu

Les estimations dont on dispose sur la consommation de bois de feu ne nous permettent tout simplement pas de juger de la nature et du sérieux du problème. Smil (1983:81–83) estime la quantité consommée entre 1,3 (sa propre estimation) et 3,2 milliards de mètres cubes par année, et estime que les facteurs de conversion varient de 0,15 à 0,8 t/m^3. Les incertitudes touchent trois aspects. Premièrement, la consommation de combustible par habitant fluctue énormément. Deuxièmement, sa composition varie non seulement d'un endroit à l'autre et d'une famille à l'autre, mais au sein de la même famille au cours des saisons, selon les approvisionnements et les besoins en combustible. Enfin, la plus grande partie de ce que nous connaissons provient d'enquêtes sur la consommation d'énergie, dont la plupart ne nous donnent aucune information sur l'origine du combustible — c'est-à-dire arbres ou cultures; dans le premier cas, le combustible a-t-il été récolté sur les arbres mêmes ou obtenu après destruction de ceux-ci?; et enfin, ce combustible est-il un produit

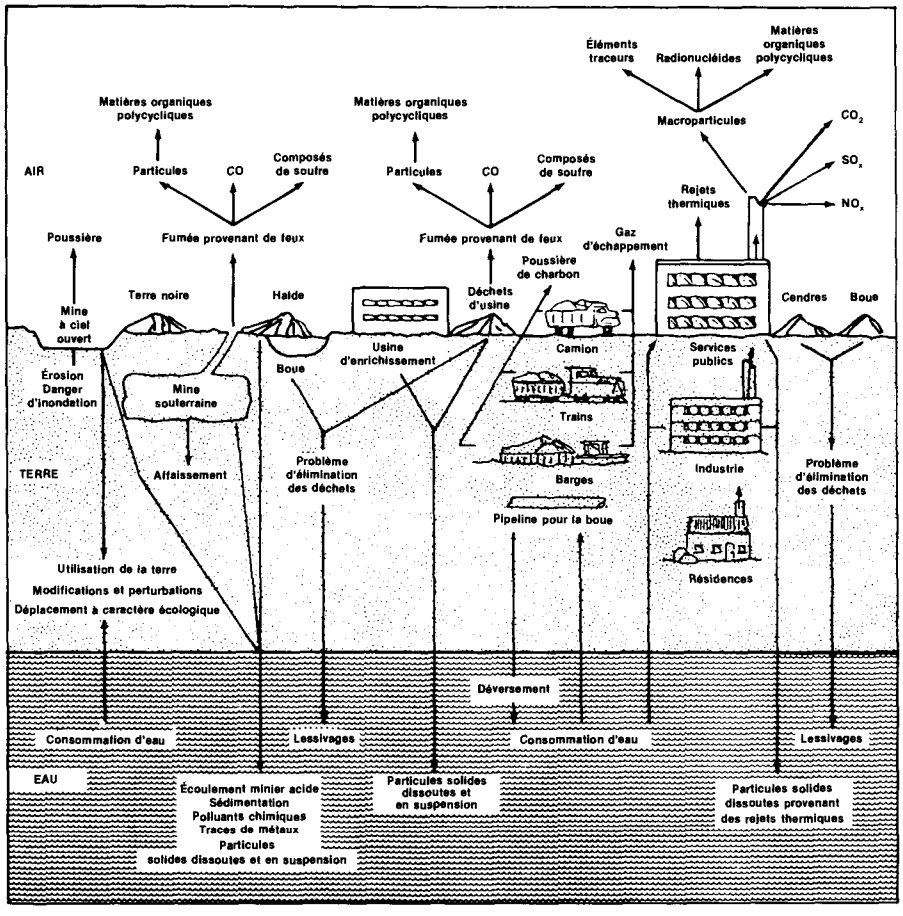


Fig. 1. Effets sur l'environnement provenant des activités afférentes à l'industrie du charbon (Source : États-Unis d'Amérique 1979).

principal ou le dérivé d'une autre activité comme l'exploitation forestière? Il est très important de distinguer entre le combustible provenant de l'accroissement annuel de la biomasse et ses autres origines.

Le déboisement

Le déboisement est strictement un problème régional mettant en cause deux types de situations : le défrichement de la terre aux fins de l'agriculture, comme au Brésil et en Indonésie (qui exportent tous deux du bois vers les pays industrialisés) et, dans les agglomérations urbaines, l'utilisation massive du bois pour deux raisons majeures, notamment la construction et la combustion; c'est le cas, par exemple, au Népal et dans certaines parties de la Chine et de l'Afrique. Les pays industrialisés connaissent cet effet d'une forte demande industrielle et urbaine qui conduit au déboisement : on l'a observé autour de la Méditerranée à l'époque romaine, en Grande-Bretagne et en Europe dès le XVIII^{e} siècle, aux États-Unis au XIX^{e} siècle, et même à l'heure actuelle au Canada et en U.R.S.S. Ce phénomène peut susciter des préoccupations pour de nombreuses raisons : scientifiques (par exemple la destruc-

tion d'essences dans les forêts tropicales), esthétiques (par exemple la laideur des terres dénudées), ou économiques (par exemple l'érosion peut provoquer des inondations ou faire diminuer la productivité des terres; la destruction des forêts peut enlever le moyen de subsistance aux populations qui dépendent des forêts; le déboisement peut entraîner la désertification). Il importe cependant d'étudier le problème du déboisement dans un contexte régional puisque les causes du déboisement, les préoccupations et les remèdes différeront d'une région à l'autre. Si tel est le cas, on constatera que le reboisement représente rarement le remède au problème du déboisement puisque, comme pour la désertification, on peut trouver des solutions plus efficaces et meilleur marché pour contrer les problèmes qu'il suscite.

La désertification

Tel que nous le connaissons, le phénomène de la désertification n'est pas la création de nouveaux déserts dans des régions jusque là couvertes d'une riche végétation, mais plutôt la progression des déserts qui existent depuis quelques milliers d'années. Le lien entre le climat et le désert est palpable tout comme on connaît assez bien la relation qui existe entre les fluctuations climatiques des derniers 4 000 à 6 000 ans et la désertification (Kellogg et Schneider 1977). Toutefois, bien que la désertification soit un phénomène local et graduel, les variations climatiques sont globales; le climat de toute la planète est plus sec et plus frais qu'il ne l'était il y a 4 000 à 6 000 ans. Les preuves amassées depuis de longues années infirment la thèse selon laquelle la désertification serait la cause du changement climatique.

On a proposé deux mécanismes par lesquels l'élimination de la couverture végétale provoquait une diminution des précipitations pour ensuite se terminer par la désertification (Le Houérou 1977:20).

> Lorsque la végétation d'une zone aride n'est pas dégradée, on retrouve toujours sur le sol une couverture diffuse composée d'au moins 20 % à 40 % d'espèces pérennes comme des broussailles, broussailles naines et herbes pérennes. Cette couverture suffit à protéger le sol de l'érosion; ou, plus précisément, dans ces conditions l'érosion éolienne est compensée par le sable qui s'accumule derrière les obstacles que constituent les plantes pérennes.
>
> Lorsque la distance entre deux plantes pérennes est égale ou supérieure à cinq fois leur hauteur, l'accumulation de sable ne suffit plus à remplir les dépressions et l'érosion gagne du terrain jusqu'à ce que toute la surface des terres soit couverte par des cailloux ou des pierres une fois effectuée l'élimination de tout le matériel meuble. Le sable ainsi enlevé s'accumule sous forme de barkhanes, reboubs, nebkas, rideaux de sable et autres. Ce déplacement du sable se produit sur des distances assez courtes, dépassant rarement quelques centaines de mètres mais pouvant parfois aller jusqu'à quelques kilomètres. Il s'ensuit donc une juxtaposition, par suite de l'érosion éolienne, des couches du sol qui étaient auparavant superposées sous forme de dépôts sableux ou argileux sur les affleurements rocheux ou les croûtes calcaires. Les plantes permanentes ne peuvent alors survivre puisque l'absence de nappes phréatiques sous les profondeurs du reg empêche les jeunes plants de survivre à la première période prolongée de sécheresse. De même, les espèces pérennes ne peuvent s'établir là où le sable se déplace continuellement. Dès que les jeunes plants apparaissent, le vent les déracine et les emporte.

Il est ici question de la végétation naturelle des régions arides, c'est-à-dire les arbustes et les herbes pérennes, et non les arbres.

Le deuxième mécanisme proposé met en cause une augmentation de l'albédo et une diminution des débris végétatifs par suite d'un pâturage excessif. En effet, une augmentation de l'albédo abaisse le niveau de température du sol et réduit la formation de panaches de convection qui sont à l'origine des précipitations (Charney et al. 1975). La présence de noyaux glaçogènes dans les nuages facilite la formation de nuages de pluie. Ces noyaux ou particules sont constitués de bactéries et de particules végétales microscopiques provenant de la décomposition des déchets de la feuille, dont la production fluctue selon la couverture végétale (Schnell et Vali 1976; Vali et al. 1976). Il se peut donc qu'une diminution du couvert végétal tende à diminuer la quantité de précipitations à cause d'une diminution de la production de noyaux glaçogènes (Kellogg et Schneider 1977).

Au nombre des mesures correctives, les tenants de la désertification placent le reboisement très bas dans l'échelle puisqu'il n'a aucun effet important sur le climat régional et qu'il nécessite ultérieurement un programme de gestion et d'organisation (Le Houérou 1977). On a proposé une multitude étonnante de mesures pour le Sahara (Glantz 1977). De ce nombre, l'irrigation a fait ses preuves en Égypte et au Pakistan où l'on rencontre des régions désertiques. Une autre — l'ensemencement des nuages — a souvent été mise à l'essai mais n'a fait l'objet d'aucune évaluation. D'autres solutions plus spéculatives et plus audacieuses ont vu le jour : bandes asphaltiques (pulvérisation d'asphalte sur de grandes superficies pour réduire l'albédo); saupoudrage des nuages au moyen d'une poussière de charbon afin d'absorber le rayonnement solaire, de réchauffer l'air ambiant et d'accroître l'évaporation des océans; et enfin inondation du Sahara par un canal à partir de la Méditerranée. À l'échelle sociale, on a proposé diverses solutions dont un contrôle du pâturage excessif (Kellogg et Schneider 1977), la concentration du développement dans certaines régions plus prometteuses, l'urbanisation et l'industrialisation (Ware 1977).

C'est le phénomène de la famine dans le Sahel qui a contribué à mettre en lumière les problèmes des régions désertiques. Nous savons que les solutions ne sont pas évidentes, mais nous savons aussi que l'identification de relations à deux variables comme celles qui existent entre le déboisement et la désertification provient d'une mauvaise définition d'un ensemble de relations. Si l'on y recourt pour établir une politique, il y a risque d'un gaspillage énorme des ressources. Il importe donc d'effectuer une étude plus méticuleuse et plus globale des relations qui tient compte de toutes les variables appropriées.

L'effet de serre

Le gaz carbonique s'accumule surtout dans la basse atmosphère où il absorbe très bien les rayons infrarouges réfléchis par le sol. On prévoit qu'une hausse des concentrations de gaz carbonique dans l'atmosphère provoquera un accroissement de l'accumulation du rayonnement solaire, qui se serait autrement échappé dans la stratosphère. Ceci se traduira par une élévation des températures globales.

Depuis que l'on a commencé à relever des échantillons de la concentration de gaz carbonique dans l'atmosphère au laboratoire de Mauna Loa à Hawaii en 1958, on a constaté une nette augmentation de 315 ppm (parties par million) en 1958 à 339 ppm en 1981 (Bergman 1983). Il y a des fluctuations saisonnières très fortes de 5 à 7 ppm chaque année mais la tendance à la hausse n'en est pas moins évidente. On ne dispose pas de mesures directes avant 1958, mais on peut évaluer indirectement les concentrations de ce gaz en analysant la composition végétale ainsi que les

isotopes d'oxygène dans les strates géologiques. De cette manière, on a pu établir une concentration de l'ordre de 265 à 290 ppm en 1860 (Rotty 1983). La concentration progressive de gaz carbonique au cours du dernier siècle, et surtout pendant les dernières décennies, est donc manifeste.

Il y a dégagement de gaz carbonique dans l'atmosphère par suite de l'utilisation d'un combustible carbonique — charbon, pétrole, gaz, combustibles synthétiques ou biomasse. Pour chaque 100 quads (105 EJ) d'énergie libérée, le gaz naturel produit 1,45 gigatonnes de carbone dans le gaz carbonique dégagé, le mazout 2 Gt, le charbon 2,5 Gt et les combustibles synthétiques, probablement 50 % de plus par unité d'énergie utile dans le produit final; le gaz carbonique produit 3,67 fois plus de carbone libéré en termes de masse. À partir de tous ces chiffres, on estime que les émissions de gaz carbonique provenant de combustibles fossiles s'établissaient à 150 Gt entre 1860 et 1975; au cours de cette période, l'augmentation de la teneur en gaz carbonique dans l'atmosphère s'est située entre 95 et 148 Gt. Ainsi, le gaz carbonique libéré par les grands combustibles entre 1860 et 1975 semble avoir largement dépassé l'accroissement de ce gaz dans l'atmosphère (Woodwell 1974). D'autres facteurs ont donc contribué à faire diminuer la teneur en gaz carbonique dans l'atmosphère. Cependant, l'utilisation des combustibles représente le facteur le plus important dans cette augmentation de concentration et continue de l'être encore.

On a utilisé les modèles de la circulation atmosphérique générale pour prédire l'effet de la teneur en gaz carbonique sur la température. Selon ces modèles, le doublement de la teneur en gaz carbonique, établi récemment à 335 ppm, augmenterait la température globale de 3 °C ± 1,5 °C (National Research Council 1983a). Une telle hausse des températures modifierait de manière importante le schéma des précipitations, notamment en faisant baisser la pluviosité dans certaines régions tempérées qui sont de grandes productrices d'aliments dans le monde aujourd'hui. Cette hausse de la température pourrait faire fondre une partie de la calotte glacière de l'Antarctique et accroître le niveau des mers, provoquant ainsi une inondation massive des régions côtières. C'est l'éventualité de ces changements, si incertains qu'ils puissent être, qui a amené les chercheurs à s'attaquer de toute urgence aux problèmes de l'effet de serre.

Prévisions globales

Bien que les prévisions ne servent qu'à préciser les effets actuels ou à venir des tendances, on les a employées ces dernières années pour étudier les répercussions des discontinuités déjà observées ou sur le point de se produire. Toutes ces discontinuités qui sont à la base des récents modèles énergétiques globaux représentent des catastrophes. En conséquence, les modèles comportent un élément important de solution : ce sont, implicitement ou explicitement, des modèles normatifs mettant surtout en évidence quelques variables accessoires.

Le premier de ces grands modèles, mis au point par les membres du Workshop on Alternative Energy Strategies (WAES), posait comme point de départ l'hypothèse d'un épuisement des réserves pétrolières. Le problème qui découle de ce phénomène consiste essentiellement à modifier l'utilisation des combustibles. Selon Wilson (1977), on pourrait le résoudre si

> l'on éliminait presque tous les combustibles fossiles servant à la production d'électricité dans les centrales, afin de diminuer les pertes en cours de transformation; le pétrole brut synthétique est fabriqué à partir du charbon disponible afin de

> pouvoir répondre à la demande essentielle de combustibles liquides; et les secteurs industriels et domestiques utilisent beaucoup plus de charbon et beaucoup moins d'électricité que ne l'indiquent les plans actuels et souhaités.

En d'autres mots, les membres de ce colloque prônaient une utilisation de l'énergie nucléaire et du charbon aux dépens du pétrole. L'International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA) prévoyait une diminution encore plus rapide de la consommation de pétrole et, partant, une adoption plus rapide des autres combustibles. L'Institut manifestait également des réserves sur la capacité de mettre en place rapidement une production nucléaire. Voilà pourquoi il favorisait un accroissement plus important de la production de charbon que le WAES jusqu'à l'an 2000. Après cette date, cependant, les limites physiques de la production de charbon ont incité l'IIASA à prôner une augmentation plus rapide du nucléaire; son choix des combustibles en service en 2030 ne s'écartait donc pas tellement de celui proposé par le WAES pour l'an 2000 (Häfele et al. 1981).

Les prévisions de l'Agence internationale de l'énergie (AIE) comportent un déplacement similaire vers le charbon et l'énergie nucléaire d'ici l'an 2000 dans les pays de l'OCDE. Toutefois, ses prévisions indiquent une utilisation plus forte du charbon mais plus faible de l'énergie nucléaire que celles du WAES; elles se rapprochent donc davantage des prévisions de l'IIASA (Agence internationale de l'énergie 1982b).

En corrélation avec les prévisions de l'AIE, l'Institut de l'analyse énergétique d'Oak Ridge a calculé les émissions implicites de gaz carbonique; toutefois, étant donné que l'effet de serre ne deviendra un problème sérieux qu'après la date terminale des prévisions de l'AIE, l'Institut a étendu les siennes jusqu'en 2050. Comme on peut le constater au tableau 12, les prévisions d'Edmonds et de Reilly (1985a) sont semblables à celles de l'IIASA pour l'an 2000. Toutefois, à partir de 2050, toute extrapolation à partir du même ensemble d'hypothèses se solde par une plus grande consommation d'énergie et donc par une demande de charbon et d'énergie nucléaire. Les prévisions d'Edmonds et de Reilly en matière d'approvisionnements pétroliers semblent trop importantes si l'on se fie aux courbes d'épuisement de cette ressource; si tel est le cas, l'estimation de la croissance de la production de charbon et d'énergie nucléaire serait également trop faible. En se fondant sur leur modèle, ils ont conclu que la teneur en gaz carbonique du globe doublerait entre 2049 et 2067 — c'est-à-dire environ 30 ans plus tard que les études précédentes ne l'avaient prédit. Toutefois, à leur avis, les seules façons de retarder sensiblement cette période critique consistent en un ralentissement de la croissance économique mondiale ou en une utilisation plus accrue des techniques nucléaires et solaires moins propices à la formation de gaz carbonique.

D'autres chercheurs à Oak Ridge ont également calculé les mêmes conséquences que l'IIASA au sujet du gaz carbonique et en sont venus à la conclusion qu'il fallait agir de toute urgence (Perry et al. 1982). Selon eux, il serait peut-être nécessaire de maintenir le niveau global maximum de gaz carbonique sous les 800 ppm et peut-être en deçà de 500 ppm. Si tel est le cas, il faudra commencer d'ici les prochaines décennies, peut-être dès 2010 mais probablement en 2040, à délaisser les combustibles, surtout les combustibles fossiles. Cela suppose une augmentation de l'utilisation des énergies renouvelables, en particulier les sources non combustibles. Toutefois, leur potentiel maximum réalisable au cours du prochain siècle ne devrait pas dépasser 250 à 315 EJ. Cela signifie qu'il faudra imposer une limite absolue à la consommation totale d'énergie dans le monde et s'assurer que les revenus s'accroissent en decà de ce seuil. En d'autres mots, la croissance devra reposer sur une efficience énergétique accrue — c'est-à-dire sur l'économie d'énergie.

Tableau 12. Quelques prévisions récentes de la consommation mondiale d'énergie (EJ), certaines années, 2000–2050.

Champ d'observation	Total pour l'année				Origine						Source
	2000	2025	2030	2050	Pétrole	Gaz naturel	Énergie nucléaire	Hydro-électricité	Charbon	Autres	
MSPC[a]	436				204	61	62	26	75	8	Wilson
	364				161	47	86	19	47	4	(1977)
Monde	531				186	98	55	26	156	10	Häfele et
	428				150	80	40	26	124	8	al. (1981)
			1 122		215	188	255	46	377	41	
			705		158	109	163	46	203	26	
OCDE[b]	244				88	35	26	–[c]	73	22[d]	Agence inter-
	213				67	40	24	–[c]	62	20[d]	nationale de
	231				63	43	27	–[c]	78	20[d]	l'énergie (1982b)
Monde	485				154	82	40	57[d]	152	–	Edmonds et
		922			183	113	158	118	350	–	Reilly (1985a)
				1 646	301	89	363	119	747	27[e]	

[a] «Monde sans les pays communistes».
[b] Pays membres de l'Organisation de coopération et de développement économiques.
[c] Inclus sous «autres».
[d] Comprend l'énergie électrique solaire.
[e] Y compris l'hydro-électricité.

C'est là le point de départ de l'étude effectuée par Goldemberg et al. (1985). Étant donné le caractère non renouvelable des combustibles fossiles, on devra les remplacer éventuellement par des énergies renouvelables. Entre-temps, l'utilisation de ces combustibles fossiles entraîne toutes sortes de conséquences indésirables, dont la hausse de la teneur en gaz carbonique dans l'atmosphère, pour ne mentionner que celle-là. D'autres chercheurs ont prôné la même consommation élevée de combustibles fossiles dans les décennies à venir pendant que l'on mettrait au point des solutions techniques pour régler les problèmes environnementaux qui se posaient. En revanche, Goldemberg et ses collègues s'emploient à l'élimination des problèmes mêmes, en favorisant un développement vers une super-efficacité énergétique mondiale.

Domaines d'incertitude

Il n'existe pas encore de preuve convaincante qui permette de démontrer que l'accroissement de la teneur en gaz carbonique ferait augmenter la température globale. Il est vrai que la température moyenne dans l'hémisphère nord était plus élevée (de 0,4 à 0,5 °C) au cours de la période 1920–1960 que pendant l'intervalle 1880–1920; toutefois, elle semble avoir régressé légèrement depuis 1960 (de 0,2 °C à 0,3 °C) (Bergman 1983). Mais les fluctuations annuelles des températures sont si importantes qu'il devient risqué d'interpréter des tendances ou des cycles sur de courtes périodes.

De toute évidence, il y a des facteurs à court terme qui influent sur la température globale au point d'obscurcir le lien qu'elle devrait avoir avec la teneur en gaz carbonique. Cette relation fait également l'objet d'un certain nombre de raffinements ou de modifications.

Premièrement, il y a des quantités considérables de carbone sur terre et dans l'eau et divers mécanismes autres que la combustion donnent lieu à des échanges qui se répercutent sur la teneur en gaz carbonique (fig. 2). Deuxièmement, il y a des mécanismes de rétroaction qui introduisent des retards dans la relation (Hansen et al. 1985). Troisièmement, Somerville (Yulsman 1985) conteste l'ampleur de l'effet de réchauffement par le gaz carbonique puisque, selon lui, l'accumulation de ce gaz augmentera la densité et la réflectivité des nuages, bloquant ainsi une partie du rayonnement solaire pénétrant dans l'atmosphère. Enfin, une étude récente affirme que l'influence de traces de gaz, notamment les hydrocarbures fluorés, l'ozone, le méthane et les oxydes d'azote, peut induire un réchauffement entre 1,5 et 3,4 fois plus important que celui du gaz carbonique. Dans ce cas, les causes des changements climatiques pourraient bien être beaucoup plus diversifiées que l'utilisation seule des combustibles (Ramanathan et al. 1985). La quantité des diverses traces de gaz dans l'atmosphère s'accroît à un rythme différent qui peut avoir des répercussions importantes sur l'évolution de l'effet de réchauffement. Les mesures visant à en diminuer les émissions varient également : certains gaz sont plus faciles à contrôler que d'autres, entre autres le gaz carbonique dont la réduction des émissions nécessiterait une baisse de la consommation globale des combustibles fossiles et de la biomasse.

L'effet de serre constitue l'un des domaines les plus actifs de la recherche et il est impossible de résumer avec précision l'état actuel des connaissances. Il est vrai que de nombreux éléments du mécanisme complexe du changement climatique sont encore entachés d'une très forte incertitude, mais les répercussions potentielles de ce changement sont aussi graves (mais différentes) pour les pays en développement

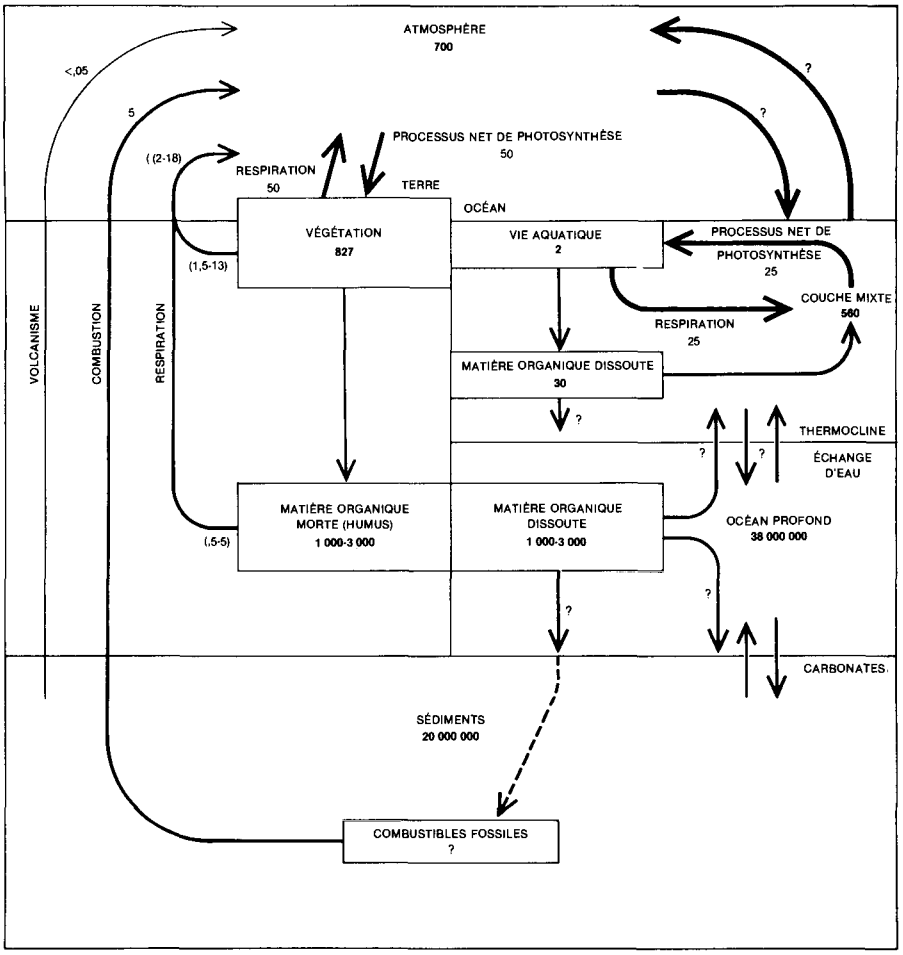


Fig.2. Concentrations et mouvements de carbone dans le monde. Les concentrations sont exprimées en milliard de tonnes métriques de carbone, les mouvements en milliards de tonnes métriques de carbone par année (Source : Woodwell 1974).

que pour les pays industrialisés. Les pays en développement ont intérêt à surveiller l'activité de la recherche ainsi qu'à y participer. C'est un domaine où on ne peut pas éviter la collaboration internationale au niveau de la recherche, et éventuellement dans la mise en place de politiques.

Les pluies acides

On ne peut plus douter du phénomène des pluies acides ni de leurs conséquences sur la végétation, la faune aquatique, les routes, les bâtiments, etc. Le mécanisme à l'origine de ce phénomène n'est pas encore précisé avec exactitude mais le rôle de la combustion est également assez bien connu, quoique l'on n'en connaisse pas encore toute l'importance.

Les pluies normales sont légèrement acides; la dissolution du gaz carbonique atmosphérique dans l'eau de pluie confère à celle-ci un pH normal variant entre 5,60 et 5,65. Cette valeur diffère quelque peu d'une région à l'autre et peut être inférieure à 5,6 lorsque l'on constate une faible teneur en matières alcalines dans l'atmosphère (Canada 1981; Harte 1982; Haines et al. 1983).

Toutefois, on a observé une augmentation du taux d'acidité de la pluie (c.-à-d. des précipitations de pluie et de neige pour être plus précis) dans certaines régions d'Amérique du Nord et d'Europe de l'Ouest qui a eu des conséquences néfastes sur la flore et la faune, plus particulièrement en détruisant certaines essences courantes dans les forêts et en éliminant des lacs certains poissons sensibles à l'acide comme la truite et le saumon. On pense que les ions d'hydrogène présents dans les pluies acides se substituent aux minéraux dans les feuilles et dans le sol empêchant ainsi les plantes de les absorber par leur système radiculaire. Il se peut que le taux accru d'acidité des pluies augmente l'absorption de substances toxiques comme le cadmium dans les plantes et le mercure dans les poissons d'eau douce; toutefois, cette dernière corrélation demeure imprécise. On ne possède pas non plus de preuve directe des effets des pluies acides sur les populations humaines (Taylor 1980).

La tolérance de la végétation à certains produits toxiques diffère considérablement d'une espèce à l'autre et souvent entre les variétés de la même espèce (Taylor 1980). De même, la capacité d'absorption des sols détermine l'étendue des conséquences des précipitations acides sur les écosystèmes. Ainsi, lorsque le sol et les lacs présentent un pH alcalin, les pluies acides les affectent très peu, mais ailleurs, la même augmentation pourra modifier l'équilibre pédologique et transformer la composition d'éléments nutritifs essentiels au point qu'ils ne peuvent plus être absorbés par les plantes (Haines et al. 1983).

Les précipitations acides s'expliquent principalement par l'émission d'anhydride sulfureux, de sulfure d'hydrogène et d'oxydes d'azote dans l'atmosphère, ces derniers réagissant avec l'eau pour donner de l'acide sulfurique et de l'acide nitrique. Les émissions d'anhydride sulfureux proviennent principalement de l'utilisation de combustibles au soufre et du volcanisme; on estime que cette dernière source serait deux fois moins importante que la première (tableau 13). Toute combustion effectuée à haute température produit des oxydes d'azote par réaction avec l'oxygène et l'azote contenus dans l'atmosphère; dans les villes, ce sont les véhicules qui constituent la principale source de cette pollution. Toutefois, la

Tableau 13. Sources mondiales d'émissions d'anhydride sulfureux, de sulfure d'hydrogène et d'oxydes d'azote[a].

	Émissions (millions de tonnes)			Concentration atmosphérique (ppm[b])	Temps de résidence (jours)
	Activités humaines	Naturelles	Total		
Anhydride sulfureux	207	100	307	0,2	4–8
Sulfure d'hydrogène	–[c]	200	200	0,2	1–2
Oxydes d'azote	48	391	439		
Peroxyde d'azote	–[c]	598	598		
Ammoniac	4	1 054	1 055		
Oxyde nitreux	–[c]	536	536		

Source : Chamberlain (1981).

[a]Ces estimations s'appliquent au début des années 70. Les estimations des émissions provenant de sources naturelles peuvent s'écarter du chiffre réel avec un facteur de 2 ou plus.

[b]Parties par milliard.

[c]Petites quantités seulement (<0,5 million).

décomposition de la biomasse constitue la plupart des émissions d'oxydes d'azote, lesquelles seraient également attribuables à la dégradation des engrais nitrés (Chamberlain 1981).

En raison même de leur volume, les rejets d'oxydes d'azote jouent un rôle de premier plan dans la formation des pluies acides puisqu'ils s'oxydent directement pour donner de l'acide nitrique tout en constituant la matière première d'autres matières oxydantes fortes comme le peroxyde d'hydrogène et l'ozone. Les émissions d'oxydes d'azote, qui dépassent celles d'anhydride sulfureux, existent partout dans le monde, à cause de leur origine naturelle, et interviennent probablement pour l'acidification normale des précipitations. Il y a de nombreuses indications à l'adaptation locale de ce phénomène d'acidité. Cependant, c'est surtout en Amérique du Nord et en Europe de l'Ouest que l'on a observé les effets destructeurs des précipitations acides, que l'on associe aux émissions d'anhydride sulfureux.

La recherche

On devra effectuer encore beaucoup de recherches avant de pouvoir réellement expliquer les réactions chimiques dans l'atmosphère à l'origine des pluies acides. Bien qu'il existe plusieurs modèles numériques, la multitude de paramètres variables nous empêche de dire si le succès prévisible d'un modèle reflète l'exactitude du processus en cause. En effet, nos connaissances actuelles s'arrêtent aux réactions homogènes en phase gazeuse suivies, par ordre descendant, des réactions en phase aqueuse (composition des «gouttelettes»), des réactions hétérogènes et enfin des réactions catalytiques.

Il y a deux grands secteurs de la recherche qui nous aideraient à mieux comprendre le chimisme des précipitations acides. Ce sont la compréhension du cycle oxydes d'azote–COI (composés organiques instables) et son influence sur les concentrations de radicaux hydroxyle et hydroperoxyle, et la compréhension du rôle de ces radicaux.

Le radical hydroxyle est un réactif important en phase gazeuse (c'est-à-dire à l'extérieur des nuages et de la pluie) tant pour l'anhydride sulfureux que pour les oxydes d'azote. C'est un élément essentiel dans la formation du peroxyde d'hydrogène, oxydant très puissant de l'anhydride sulfureux dans les gouttelettes des nuages et de la pluie. Beaucoup de chimistes croient que l'oxydation en phase liquide de l'anhydride sulfureux serait la cause principale de la production d'acide sulfurique. Enfin, le peroxyde d'azote lui-même s'oxyde en présence du radical hydroxyle pour donner de l'acide nitrique (Chamberlain 1981 ; Shaw 1984).

La compréhension des deux phénomènes susmentionnés a des conséquences directes sur les mesures de lutte contre les pluies acides. La photodissociation et la formaldéhyde constituent les principales sources des oxydes d'hydrogène. Dans les deux cas, les oxydes d'azote sont des éléments fondamentaux dans la réaction (bien que la formation de formaldéhyde débute en présence de radicaux d'hydrocarbures dans l'atmosphère). De cette manière, si l'on peut diminuer la teneur en oxydes d'azote dans l'atmosphère, on réduira la concentration d'oxydes d'hydrogène qui, à leur tour, pourraient faire régresser les deux principales sources d'acidification (en diminuant la formation directe d'acide nitrique) et l'oxydation aqueuse de l'anhydride sulfureux en acide sulfurique. Une diminution du taux d'oxydation de l'anhydride sulfureux favoriserait davantage son absorption sous forme de gaz sur le sol, entraînant ainsi une diminution des précipitations acides. Toutefois, une certaine

quantité d'anhydride sulfureux absorbée au niveau du sol se transformerait en sulfate au contact d'oxydants, notamment de l'oxygène moléculaire.

Dans la pratique, donc, une oxydation réduite de l'anhydride sulfureux dans l'atmosphère n'éliminerait pas toutes les répercussions néfastes des rejets acides, mais modifierait sa répartition géographique et probablement aussi la nature de ses conséquences.

Les mesures de lutte

En Amérique du Nord, l'élévation des cheminées est passée d'une hauteur moyenne de 61 m en 1960 à 183 m en 1981 (Chamberlain 1981). On ne saurait toutefois considérer cela comme une mesure de lutte contre la pollution. En effet, les cheminées élevées diminuent la pollution locale mais accroissent fortement le danger d'une pollution éloignée (Postel 1984).

On ne devrait voir dans le «chaulage» des lacs qu'une mesure visant à atténuer la dégradation au point de contact (régions polluées par l'action des vents) plutôt qu'un contrôle des émissions à la source (États-Unis d'Amérique 1984). Tout au plus s'agit-il d'une mesure palliative temporaire puisque la diminution du taux d'acidité ne remet pas les métaux lessivés dans le roc.

Pour donner des résultats positifs à long terme, les méthodes de lutte doivent plutôt s'attacher aux techniques de diminution des émissions nuisibles. Dans le cas de l'anhydride sulfureux il s'agira : de laver le charbon, d'«épurer» les fumées dans les vieilles centrales énergétiques, d'adopter des combustibles à plus faible teneur en soufre et d'utiliser des brûleurs à injection de pierre à chaux. La première solution n'est pas très rentable à l'heure actuelle dans le cas des charbons à faible teneur en soufre alors que la dernière solution est une technique à l'étape de mise au point aux États-Unis et au stade de la démonstration commerciale en République fédérale allemande (États-Unis d'Amérique 1984).

Le contrôle des émissions d'oxydes d'azote donne plus de difficultés que celui des rejets d'anhydride sulfureux. À l'heure actuelle, le réglage du mélange d'air et de carburant dans la combustion permet de contrôler la libération des oxydes d'azote. Toutefois, ce ne sont pas toutes les chaudières utilitaires que l'on peut munir après coup d'un nouveau dispositif de combustion. Quoi qu'il en soit, cette technique ne réduirait les émissions que d'environ 25 %. Pour atteindre des pourcentages plus élevés, on devra modifier la géométrie des fours. On peut aussi éliminer les oxydes d'azote par traitement des fumées, et les réduire par la mise en service des brûleurs à injection mentionnés précédemment.

Si le nombre de petits appareils alimentés au charbon (p. ex., des poêles) augmente dans une région, il est probable que les fortes teneurs en acide nitrique occasionnent des problèmes locaux importants. En pareil cas, il deviendra tout particulièrement utile d'effectuer des recherches sur le contrôle des émissions d'oxyde d'azote ainsi que sur l'efficacité de la combustion des poêles à charbon (Harte 1982).

Les vastes pays en développement comme la Chine, l'Inde et le Brésil, où l'utilisation des combustibles fossiles et de la biomasse est fortement concentrée, auraient intérêt à étudier le phénomène d'acidification des précipitations et toutes les corrélations qu'il présente avec la végétation et la faune. S'ils peuvent démontrer l'existence de tels rapports, des programmes de lutte contre les pluies acides seraient tout aussi avantageux que pour les pays industrialisés.

Chapitre 13 Les conditions préalables

Les chapitres 13, 14 et 15 résument les conclusions générales du rapport.

L'efficacité d'un système de recherche repose sur la capacité d'intervention des usagers, sur l'accumulation à long terme des connaissances, sur la définition des voies de recherche pertinentes et enfin sur le financement des objectifs.

Les usagers éclairés désignent ceux qui peuvent définir les problèmes en vue d'une recherche et évaluer la qualité de celle-ci. Ils doivent être disséminés dans les organismes qui utilisent la recherche. Ces usagers doivent être formés afin de pouvoir mener et évaluer des études et ils doivent de temps à autre se tenir au courant des progrès réalisés.

L'accumulation des connaissances est un processus de longue haleine qui nécessite des installations matérielles telles que des bibliothèques, mais ce sont les chercheurs qui les rendent utilisables grâce à un processus d'apprentissage et de solution des problèmes. Il importe donc de planifier la carrière des chercheurs pour accroître leur niveau de spécialisation mais aussi pour les rendre plus polyvalents à long terme.

La définition des voies de recherche pertinentes doit s'inspirer d'une étude des conditions propres à la recherche, plus particulièrement des nouveaux besoins des utilisateurs de la recherche, afin de pouvoir les traduire en problèmes que les chercheurs pourront tenter de résoudre et ainsi accroître leurs moyens d'intervention.

Le financement des objectifs nécessite des investissements à long terme dans des programmes pouvant intéresser les utilisateurs de la recherche, et traduire cet intérêt par la mise en place de projets pertinents.

Ayant terminé notre relevé des priorités en matière de recherche énergétique, nous résumerons nos conclusions dans le présent chapitre et les deux qui le suivent immédiatement. Le chapitre 13 aborde la question des conditions préalables à la recherche alors que le chapitre 14 porte sur les utilisations de l'énergie et le chapitre 15 les ressources énergétiques.

L'établissement des priorités de la recherche énergétique n'a aucune utilité si l'on ne se dote pas au préalable d'un cadre organisationnel propice à leur mise en oeuvre. Il faut d'abord construire le système et, s'il est déjà en place, améliorer au besoin ses rouages. Le système doit non seulement pouvoir s'adapter aux priorités de la recherche mais également produire une recherche de qualité. Pour donner son plein rendement, le système doit reposer sur quatre grands facteurs : des utilisateurs éclairés, des installations permettant l'accumulation à long terme des connaissances, la définition de voies de recherche pertinentes et enfin une pratique de financement des objectifs.

Utilisateurs éclairés

Les utilisateurs éclairés désignent ceux qui peuvent définir les limites de la recherche nécessaire à la résolution de problèmes particuliers et qui sont ensuite en mesure d'évaluer la qualité de cette recherche. Il importe que les organismes pouvant utiliser les fruits de la recherche, en particulier les administrations publiques et les producteurs, comptent ce type d'utilisateurs dans leurs rangs. En outre, les organismes de recherche peuvent également devenir des utilisateurs éclairés pour ceux qui ne peuvent le devenir (p. ex., des petits producteurs); cependant, c'est lorsque cette capacité est intégrée à l'organisme même qu'elle peut fournir un rendement optimal.

Pour devenir un utilisateur éclairé, il faut d'abord être formé en conséquence. La formation n'a pas besoin d'être aussi spécialisée que celle d'un chercheur, mais elle en présente les mêmes caractéristiques.

La deuxième condition préalable a trait à la présence de personnes qualifiées dans les centres de décision des organismes utilisateurs. Il est beaucoup trop facile pour les techniciens de ne s'intéresser qu'aux tâches administratives routinières qui n'apportent, cependant, aucune contribution à leur capacité d'évaluer le processus de recherche. Il importe que les spécialistes soient précisément employés à l'évaluation des résultats de la recherche, tâche dont ils peuvent seuls s'acquitter.

Une personne qualifiée ne peut poursuivre adéquatement son travail que par une mise à jour régulière de ses connaissances, ce qui ne saurait mieux se faire que par un échange périodique de personnel entre les organismes de recherche et les organismes utilisateurs de recherche. Ces échanges permettraient également de consolider les relations informelles dont l'apport est tellement utile dans le transfert des techniques et des procédés de recherche. Toutefois, s'il n'est pas possible de procéder à de tels échanges, il n'en demeurerait pas moins souhaitable que les spécialistes des organismes utilisateurs puissent se recycler périodiquement et séjourner dans les organismes de recherche et de formation afin de renouveler leur bagage de connaissances.

En dernier lieu, certains progrès apparaîtraient plus facilement dans les organismes utilisateurs que dans les centres de recherche. Ainsi, les renseignements nécessaires quotidiennement à la prise de décision présidant à l'élaboration des stratégies trouvent leur meilleure utilisation immédiate au sein de l'administration publique. Dans les organismes producteurs, le processus de «développement» — c.-à-d. la mise en place d'un procédé de fabrication d'un nouveau produit, la commercialisation des innovations, etc., — est une étape en aval qui se situe entre la recherche et son application et que les organismes utilisateurs se doivent de mettre en place.

Toutes ces conditions sont particulièrement importantes lorsque la recherche doit contribuer à la formulation de politiques : les problèmes énergétiques sérieux se traduisent invariablement par une politique nationale et le volume et la qualité des recherches effectuées dépendront de la capacité qu'auront les décideurs d'orienter et d'utiliser la recherche. Cet aspect devient plus manifeste dans la gestion de la demande d'énergie, dont l'utilité n'apparaît que dans le cadre d'une politique. Il importe donc que les pouvoirs publics embauchent des spécialistes dans les postes clés de l'administration afin de pouvoir traduire sous forme de recherche les problèmes afférents à la politique ainsi que les résultats de la recherche en actions appropriées. En outre, ils devraient adopter des vues suffisamment générales — par exemple, dans un cadre de planification nationale — pour être en mesure d'utiliser les conclusions de la recherche.

Accumulation à long terme des connaissances

C'est chez les chercheurs que s'accumulent les connaissances et l'expérience qui servent à régler les problèmes de manière rapide et satisfaisante ; cependant, les chercheurs acquièrent ce bagage par un processus d'apprentissage et de résolution des problèmes. L'orientation professionnelle des chercheurs prend donc une place importante — les problèmes auxquels ils s'attaquent et les installations dont ils disposent à cette fin influeront sur leur capacité. Il est donc nécessaire de constituer des installations de recherche sur une longue période dans les organismes de recherche. Il pourra s'agir d'installations simples et modestes dans un domaine comme les mathématiques — bien que l'informatique ait ouvert de nouvelles possibilités — ou coûteuses et complexes dans un secteur comme la physique nucléaire. Cependant, l'ampleur et la nature appropriée des installations mises en place sur une longue période influent réellement sur la capacité accumulée des chercheurs.

Par contre, bien que la somme des expériences d'un chercheur soit fonction des installations à sa disposition et de l'usage qu'il en fait, la diversité des problèmes qu'il a affrontés déterminera sa polyvalence et son champ de spécialisation. C'est aux directeurs de la recherche qu'il incombera de veiller à ce que les chercheurs oeuvrent dans les domaines d'utilité courante.

Le directeur éclairé

Le directeur de la recherche a deux tâches : traduire les demandes de l'extérieur sous forme de problèmes pouvant être confiés à des chercheurs et trouver une utilisation aux talents manifestés par chaque chercheur. Dans ce rôle, le directeur doit avoir une perspective générale et être en mesure de prévoir les domaines susceptibles d'occuper une place importante.

Il doit également connaître les ressources de son pays qui façonnent les besoins de la recherche. Le recours aux ressources locales fait naître invariablement des problèmes locaux alors qu'une pénurie de ressources — dans les pays qui ne peuvent en importer — engendre des problèmes au niveau des produits de substitution.

En dernier lieu, le directeur éclairé doit connaître l'environnement extérieur — tant national qu'international — dans les domaines de sa compétence. Chaque chercheur doit se tenir au fait des travaux menés parallèlement aux siens, mais dans l'orientation de la recherche, cette tâche prend une importance particulière puisqu'elle empêche le dédoublement et le gaspillage des ressources tout en accélérant les progrès de la recherche.

Le financement

Le financement produira une recherche utile seulement si les conditions institutionnelles susmentionnées sont satisfaites ; toutefois, le financement peut dans une certaine mesure influer sur les institutions. La mise en place d'une institution est un processus assez lent qui nécessite un financement des programmes sur une longue période. Cependant, dès que l'institution est installée, elle doit être en mesure de répondre rapidement aux problèmes qui se posent, et pour y arriver il faut une aide financière à court terme.

Il faudrait considérer les dépenses engagées à la mise en place d'institutions et de secteurs de programme comme un investissement dans le capital humain et

physique. Bien qu'il ne faille pas s'attendre à des résultats rapides, cet investissement doit à la longue générer des bénéfices sous la forme de projets, et c'est à ce moment qu'on jugera de la pertinence de la décision initiale. La décision d'investir dans une installation de recherche et le choix des domaines sur lesquels sera fondée cette recherche engendreront les éventuels projets dont on espère bénéficier.

Chapitre 14 Les utilisations

Il importe de prévoir pour les systèmes énergétiques nationaux une période au moins égale à l'intervalle de gestation propre aux industries énergétiques. On basera de telles projections sur la connaissance que l'on a des relations qui existent au sein des industries productrices d'énergie ainsi qu'entre elles et le reste du système socio-économique.

Une connaissance des liens structuraux aidera à établir la façon de modifier la demande d'énergie par simple variation des schémas de consommation et de production. Parallèlement, on peut influencer et ajuster la consommation d'énergie des consommateurs lorsqu'on comprend leur comportement.

La substitution interénergétique s'impose lorsqu'on constate l'épuisement des sources d'énergie. Le remplacement de l'énergie mécanique par l'énergie humaine pendant une phase de développement constitue une forme principale de substitution de combustible qui entraîne des problèmes importants au niveau des mesures à prendre. Ces problèmes nécessitent alors des recherches étendues.

Deux types de recherche axés sur l'économie d'énergie offrent des avantages particuliers pour les pays en développement. Le premier consiste à répertorier les divers équipements énergivores utilisés, à préciser les causes d'inefficacité énergétique et à mettre en place des solutions appropriées. Dans le second type, on utilise les études effectuées en premier lieu pour concevoir de nouveaux équipements.

L'expression «pays en développement» est un générique derrière lequel se cachent de nombreuses variations. La décision de mettre en oeuvre les priorités en matière de recherche énergétique devrait se faire au niveau d'un pays en développement ou encore à celui d'un producteur ou d'un organisme de recherche. En effet, si l'on connaissait les perspectives à long terme du développement du système énergétique, la prise de décision à tous ces niveaux s'en trouverait largement améliorée.

La période sur laquelle porte la projection doit correspondre à celle que les industries énergétiques touchées par le long intervalle de gestation doivent calculer dans leur planification avancée. Cette période est particulièrement longue dans le cas du charbon, du pétrole et du gaz; en effet, il peut s'écouler entre 8 et 15 ans depuis le début de l'exploitation jusqu'à la pleine production commerciale. Pour l'électricité, la période peut être plus courte, mais il ne faut pas oublier que la mise en service d'une centrale hydro-électrique peut nécessiter jusqu'à 10 ans, surtout lorsque des problèmes imprévus de nature géologique surgissent. Dans toutes ces industries, il importe de recueillir des renseignements, de faire des estimations au meilleur de sa connaissance et de réduire les incertitudes pendant tout l'intervalle de gestation au moins. En ce qui concerne les énergies renouvelables, les intervalles de gestation ne sont pas nécessairement courts. Ainsi, une plantation forestière exige au moins cinq ans avant de produire un bénéfice économique. Par conséquent, les intervalles de gestation propres aux industries énergétiques imposent par le fait même une vue à long terme aux décideurs.

En raison des longues périodes en cause, il est impossible d'établir le cheminement des industries énergétiques sans se faire d'abord une bonne idée des relations qu'elles présentent entre elles ainsi qu'avec le reste du système socio-économique. Trois domaines doivent donc être particulièrement approfondis : les liens qui ressortent entre la consommation d'énergie et le système socio-économique, les possibilités de substitution entre les sources d'énergie et les possibilités d'accroître l'efficacité énergétique.

Les liens structuraux

Si l'on fait exception du transport particulier, de la consommation d'électricité, de la cuisson et du chauffage domestiques, ce ne sont pas les consommateurs finals qui utilisent l'énergie mais bien les producteurs pour la fabrication d'autres biens et services. On peut examiner les liens entre ces producteurs et la consommation énergétique — c.-à-d. des liens structuraux — en s'aidant des techniques énumérées au chapitre 4. Habituellement, les techniques plus complexes donneront des résultats plus cohérents, mais elles nécessiteront aussi des données et des calculs plus nombreux. On pourrait également faire un compromis entre les différentes techniques.

L'utilisation de la recherche dans une démarche «macro» ou globale fournit les meilleurs résultats lorsqu'elle indique de quelle façon on peut modifier la composition de la demande d'énergie en diversifiant la structure de la production et de la consommation. Si l'on met au point des modèles pertinents à cette fin, on pourra formuler des mesures fiscales et d'autres politiques qui orienteront la demande vers les sources d'énergie plus abondantes. Ces mesures peuvent toucher soit les secteurs de la consommation, comme le transport et l'industrie, soit les sources d'énergie comme les produits pétroliers.

À un niveau plus restreint ou «micro», il importe d'accroître la recherche sur le comportement des consommateurs dans l'allocation des sommes qu'ils affecteront à la satisfaction des besoins énergétiques. Les consommateurs des pays en développement affichent des caractéristiques particulières. Ainsi, leur revenu ne sera pas toujours d'ordre monétaire puisqu'il pourra se présenter sous la forme de leur propre travail ou d'une rentrée en nature; en outre, les décisions qu'ils prennent concernent la famille plutôt que l'individu. Pour ces raisons, des outils analytiques spéciaux s'imposent.

La substitution interénergétique

La substitution interénergétique la plus importante pour les pays en développement est la substitution d'énergie «inanimée» pour de l'énergie «animée». Cette substitution permettrait d'accroître la productivité du travail et le niveau de vie, au risque toutefois de faire apparaître du chômage. Les pays en développement qui désirent mener à bien cette transition énergétique font face à des difficultés d'ordre politique fort complexes, surtout dans le domaine de l'agriculture sur lequel repose la subsistance d'une grande partie de la population. La substitution interénergétique en agriculture peut avoir des répercussions macro-économiques sur l'emploi, la balance des paiements et l'utilisation des ressources énergétiques; la mise en place de mesures utiles nécessite alors une étude globale de ces facteurs. Les travaux

agricoles peuvent produire une biomasse utilisable sous de nombreuses formes; si l'on accroît la productivité de la biomasse dans une culture, on pourra alors consacrer une partie de la superficie à une autre culture. On constate donc que la recherche peut poursuivre des objectifs plus généraux que l'utilisation de l'énergie et la productivité énergétique.

Le remplacement des combustibles utilisés pour le transport a fait l'objet d'une recherche considérable pour les douze dernières années à cause de la dépendance de ce secteur à l'égard du pétrole. La recherche n'a pas permis d'établir le produit de remplacement du pétrole le plus avantageux, mais elle a quand même donné lieu à un accroissement de l'efficacité énergétique dans les pays industrialisés. Dans les pays en développement, la recherche sur la planification des zones urbaines et rurales en vue de minimiser le transport ainsi que la recherche sur un usage plus efficient des installations de transport pourrait se traduire par de meilleurs résultats à long terme.

L'économie d'énergie

Une bonne partie du matériel utilisé dans la production et la transformation d'énergie est fabriquée dans les pays industrialisés, mais les pays en développement utilisent également une quantité impressionnante d'appareils énergivores comme des chaudières, moteurs, poêles, etc. Il y aurait lieu d'assurer une large diffusion des techniques en matière d'efficacité énergétique touchant ce type d'appareil afin d'obtenir des économies importantes. Cette approche pourrait se concrétiser de deux façons différentes dans la recherche.

En premier lieu, il conviendrait de répertorier le matériel existant, d'établir les raisons de son inefficacité énergétique et enfin, d'améliorer son mode de fonctionnement afin d'atteindre à une efficience accrue. Tout le matériel pourrait alors être modifié en conséquence.

L'autre façon serait de concevoir de nouveaux modèles sur la base de relevés-diagnostics du même genre et de les introduire ensuite sous forme de nouveaux appareils. Les conséquences potentielles dépendront alors du taux de croissance et de remplacement du stock existant; elles peuvent être insignifiantes à court terme mais déboucher sur des économies d'énergie substantielles sur une plus longue période.

Chapitre 15 Les ressources

Le critère adopté par notre Groupe était d'établir les priorités selon la contribution de la recherche aux grandes décisions en matière de réglementation et de production. Sous cet angle, on peut définir deux groupes principaux de ressources : celles dont l'exploitation fructueuse repose principalement sur une étude minutieuse des marchés, et celles dont il faut abaisser les coûts pour en généraliser l'utilisation.

De manière générale, c'est le marché du gaz naturel qui suscite les plus fortes incertitudes et qui bénéficierait le plus d'une recherche sur la demande potentielle. L'industrie du charbon est peut-être également dans cette situation lorsqu'il y a une vive concurrence, mais elle peut s'adapter plus facilement à de nouveaux utilisateurs. Le pétrole jouit d'un marché relativement bien protégé qui est délimité par le réseau de distribution, mais ce secteur doit subir les aléas d'une concurrence internationale, d'où le besoin d'en examiner le marché international. Le secteur de l'électricité est celui sur lequel les forces du marché ont moins d'emprise à moins d'une situation de surinvestissement. Les petites sources d'énergie accapareront habituellement des marchés locaux restreints qu'il faut quand même chercher à repérer au moyen d'une recherche.

Comme ces sources d'énergie peu importantes doivent habituellement subir la concurrence des autres sources exploitées à grande échelle, on aurait avantage à orienter la recherche vers la réduction des coûts de production. Dans le cas des ressources commandant des coûts en capital élevés, un accroissement de l'utilisation de la capacité peut se répercuter directement sur leur viabilité. En ce qui a trait aux ressources à caractère saisonnier — comme l'éthanol dérivé de la canne à sucre — le stockage à faible coût pourrait constituer le moyen d'augmenter l'utilisation de la capacité. Lorsque les coûts d'entreposage sont élevés — par exemple avec l'énergie solaire et éolienne — l'identification des applications et de sites favorables constitue un bon sujet de recherche. On peut accroître la quantité de toutes les ressources de biomasse terrestre par une augmentation de la productivité des terres ; une recherche sur la productivité de la biomasse serait profitable aux biocombustibles parce qu'elle libérerait davantage de terres à cette fin. Les réserves de combustibles minéraux présentent souvent des surprises pour les géologues ; la recherche minière pourrait améliorer la viabilité des projets d'exploitation minière en identifiant précocement les inattendus en question et en élaborant des solutions particulières à chacun.

Comme il est expliqué au chapitre 1, le Groupe a décidé de ne pas examiner en détail les techniques de production et le génie des grandes industries énergétiques comme le charbon, le pétrole, le gaz et l'électricité (thermique, hydro-électrique et nucléaire). Il a également décidé de ne pas considérer comme un indicateur de priorité les nouveautés et les progrès effectués au niveau des connaissances; il a plutôt choisi d'établir les priorités selon la contribution de la recherche aux grandes

décisions stratégiques en matière de réglementation et de production. Essentiellement, il a essayé d'évaluer les améliorations que pourrait apporter la recherche au niveau de la qualité et de la vigueur des principales décisions, alors qu'une erreur pourrait se solder par un gaspillage des ressources. L'amélioration ainsi recherchée porterait le plus de fruits lorsque le marché d'une ressource est incertain ; de même, la viabilité d'une ressource est mieux préparée en s'assurant qu'elle dispose d'un débouché suffisamment important et qu'elle peut concurrencer les autres formes d'énergie ; et lorsque l'application des techniques existantes à de nouvelles situations est susceptible de provoquer de sérieux problèmes particuliers. Parmi les nombreux cas exposés sur les trois types aux chapitres 6 à 11, nous relevons ici seulement les plus importants. Les secteurs prioritaires sont délimités en fonction des genres ou des groupes de problèmes.

Ressources sensibles aux forces du marché

Du point de vue du volume et de la stabilité de la demande, le gaz naturel est probablement le secteur qui fait face à la plus grande incertitude et qui bénéficierait le plus de la recherche. On doit identifier d'avance ses usagers étant donné l'ampleur de son seuil minimum de production. Le travail de base qu'il est nécessaire d'effectuer pour établir la capacité de production, les débouchés et les conditions du contrat exige une bonne part de recherche indispensable pour chaque projet d'exploitation gazière.

Le charbon peut connaître des problèmes du même genre lorsqu'il constitue une source d'énergie relativement nouvelle ou qu'il faut accroître sensiblement sa production. Mais de façon générale, le charbon est plus facile à transporter et à adapter à un nouvel usager. La viabilité des projets charbonniers dépendra probablement plus du coût de production que de l'identification préalable du marché.

Dans la mesure où les pays en développement possèdent pour la plupart un réseau de distribution du pétrole, celui-ci subira également moins les pressions du marché. Toutefois, il doit composer avec les risques de la concurrence internationale — et ce, beaucoup plus dans les pays fortement dépendants à l'égard d'exportations ou d'importations pétrolières. D'où le besoin d'effectuer des recherches sur le marché international du pétrole et la fixation des prix pétroliers.

L'électricité produite par un service public est la forme d'énergie la moins sensible aux pressions du marché, surtout dans les pays qui connaissent un accroissement de sa demande. C'est d'ailleurs le cas de toutes les installations de production appartenant à des services publics. Bien qu'elle soit relativement bien protégée contre l'intrusion d'autres sources d'énergie concurrentielles, la demande d'électricité peut, bien sûr, limiter la croissance lorsqu'il y a surinvestissement ou que de très grandes installations génèrent une capacité supérieure à la demande courante.

Les petits exploitants des sources d'énergie décentralisées sont destinés à des marchés relativement restreints et, en conséquence, éprouvent moins de difficultés graves à chercher de nouveaux débouchés, tâche à laquelle ils ne peuvent toutefois pas se soustraire. C'est le cas des poêles, cuisinières solaires, dispositifs photovoltaïques à l'intention des consommateurs, séchoirs solaires, etc.

Même lorsqu'il n'y a aucune restriction au niveau des marchés, les préférences des consommateurs peuvent cependant représenter une limitation. Ce genre de problème est susceptible de se poser dans le cas, par exemple, de poêles à haut

rendement énergétique qui ne répondraient pas aux attentes de l'acheteur à d'autres égards. Le problème de la recherche dans ce cas se situe dans l'adaptation du modèle aux besoins du marché.

Ressources d'exploitation coûteuses

Lorsqu'on peut remplacer des ressources par d'autres produits meilleur marché, le problème posé à la recherche consiste à réduire les coûts de production des premières. Les sources d'énergie décentralisées et exploitées sur petite échelle engendrent un volume de production restreint et ont moins de difficultés sérieuses à dénicher un marché. Mais si elles font face à des formes d'énergie produites à grande échelle, leur viabilité dépendra de leurs coûts de production. C'est particulièrement vrai des centrales d'énergie décentralisées — photovoltaïque, éolienne, géothermique, dendrothermique, etc. — lorsqu'elles doivent subir la concurrence d'un réseau d'électricité; mais c'est également vrai des autres ressources comme le charbon de bois, le gaz de gazogène et les pompes éoliennes.

Un grand nombre de sources d'énergie renouvelables et nouvelles se caractérisent par des coûts de fonctionnement faibles — voire négligeables — et un coût en capital élevé. Lorsque le coût en capital est substantiel, l'utilisation du plein rendement peut avoir un effet considérable sur la viabilité. Pour cette raison, il devient prioritaire de mettre au point des techniques de stockage de l'énergie à faible coût. Pour une énergie difficile ou coûteuse à emmagasiner — par exemple l'énergie solaire ou éolienne — l'utilisation du plein rendement reposera sur la disponibilité de la ressource ainsi que sur la structure de la demande. Dans de telles circonstances, l'objet le plus important de la recherche est d'identifier les emplacements favorables et les applications appropriées. Même dans le cas de sources d'énergie produites à partir d'une biomasse bon marché — par exemple le gaz de gazogène, le biogaz et l'éthanol — une diminution du rapport capital investi/énergie produite peut souvent représenter la solution principale à une viabilité accrue.

Les ressources énergétiques dérivées de la biomasse nécessitent de vastes surfaces et leur productivité par unité de superficie a des conséquences importantes sur les coûts de leur récolte. Cette productivité joue également un rôle de premier plan lorsqu'il y a pénurie des terrains; en pareil cas, une augmentation des rendements d'une culture libérera des terres pour une autre. De cette manière, une recherche globale sur la productivité de la biomasse aura des retombées indirectes sur les ressources énergétiques dérivées de la biomasse.

L'exploitation de la biomasse est limitée par les coûts de récolte. Si la productivité de la biomasse s'accroît, une production à plus grande échelle peut devenir rentable — par exemple dans la fabrication d'éthanol, d'électricité dendrothermique et de charbon de bois. Ainsi, une augmentation de la productivité de la biomasse pourra conduire à une recherche ultérieure en vue d'étendre les marchés.

En dernier lieu, l'exploitation des combustibles minéraux entraîne souvent des difficultés et des surprises de nature géologique. La solution à considérer sera le plus souvent particulière à l'emplacement et la recherche que l'on effectuera est susceptible d'amener des retombées substantielles sous forme de rendement accru. Ce genre de situation est fréquent dans l'industrie des charbonnages.

Bibliographie

Adelman, M.A., J.C. Houghton, G. Kaufmann et M.B. Zimmerman. 1983. Energy resources in an uncertain future. Coal, gas, oil and uranium forecasting. Ballinger, Cambridge, Mass., É.-U.

Advisory Committee on Technology Innovation. 1977. Methane generation from human, animal and agricultural wastes. National Academy of Sciences, Washington, DC, É.-U.

Agence internationale de l'énergie. 1979a. Colloque sur les données énergétiques dans les pays en développement, décembre 1978. Comptes rendus, vol. 1. Résumé des discussions et des communications techniques. Organisation de coopération et de développement économiques, Paris.

———— 1979b. Colloque sur les données énergétiques dans les pays en développement, décembre 1978. Comptes rendus, vol. 2. Bilans et statistiques énergétiques de base dans les pays en développement. Organisation de coopération et de développement économiques, Paris.

———— 1982a. L'utilisation du charbon dans l'industrie. Rapport du Conseil consultatif de l'industrie du charbon, Agence internationale de l'énergie, Organisation de coopération et de développement économiques, Paris.

———— 1982b. Perspectives énergétiques mondiales. Organisation de coopération et de développement économiques, Paris.

———— 1984. Bilans énergétiques des pays en développement, 1971–1982. Agence internationale de l'énergie. Organisation de coopération et de développement économiques, Paris.

Alam, M., J. Dunkerley et A.K.N. Reddy. 1985. Fuelwood use in the cities of the developing world: Two case studies from India. Natural Resources Forum 9(3), 205–213.

Alston, L.L. 1984. Railways and energy. World Bank Staff Working Paper, 634, Banque mondiale, Washington, DC, É.-U.

Apte, P.C. 1983. Substitution among energy and non-energy inputs in selected Indian manufacturing industries: an econometric analysis. Indian Economic Journal 31(2), 71–90.

Asian Development Bank (Banque asiatique de développement). 1984. Compilation of technical assistance activities in the energy sector of Asian Development Bank's developing member countries. Asian Development Bank, Manille, Philippines.

Aureille, R. 1984. Deux siècles de production d'hydrogène. Dans T.N. Veziroglu et J.B. Taylor, éd. Hydrogen energy progress V : Proceedings of the 5th World Hydrogen Energy Conference, Toronto, Canada, 15–20 July 1984, Vol. 1, Pergamon Press, New York, NY, É.-U., 21–46.

Backus, C.E. 1984a. Principles of photovoltaic conversion. Dans G. Furlan, N.A. Mancini et A.A.M. Sayigly, éd. Nonconventional energy. Plenum Press, New York, NY, É.-U. 297–348.

———— 1984b. Photovoltaic technology assessment. Dans G. Furlan, N.A. Mancini et A.A.M. Sayigly, éd. Nonconventional energy. Plenum Press, New York, NY, É.-U. 349–386.

Baldwin, S. 1986. New opportunities in electric motor technology. Institute for Electrical and Electronic Engineers, Technology and Society 5(1), 11–18.

Baudequin, F., M. Boillot et B. Mignard. 1984. Sugar canes bagasse gasification. Dans H. Egnéus et A. Ellegärd, éd. Bioenergy 84. Comptes rendus d'un colloque international sur la bioénergie tenu du 15 au 21 juin 1984 au Centre des foires commerciales de Suède, Göteborg, Suède. Vol. III, Biomass conversion. Elsevier, Londres, R.-U. 80–93.

Baumol, W.J., J.C. Panzar et R.D. Willig. 1982. Contestable markets and the theory of industrial structure. Harcourt, Brace Jovanovich, New York, NY, É.-U.

Beale, W.T. 1981. Stirling engines for developing countries. (Ébauche d'un article publié dans National Academy of Sciences. Supplement — Energy for rural development : renewable resources and alternative technologies for developing countries. National Academy Press, Washington, DC, É.-U.)

Becker, G.S. 1981. A treatise on the family. Harvard University Press, Cambridge, Mass., É.-U.

Behrens, A. 1984. Energy and output implications of income redistribution in Brazil. Energy Policy 12(2), 110–116.

Bellin, A., H.-J. Scharf, L. Schrader et H. Teggers. 1985. Application of Rheinbraun HTW-gasification process to biomass feedstocks. Dans H. Egnéus et A. Ellegärd, éd. Bioenergy 84. Comptes rendus d'un colloque international sur la bioénergie tenu du 15 au 21 juin 1984 au Centre des foires commerciales de Suède, Göteborg, Suède. Vol. III, Biomass conversion. Elsevier, Londres, R.-U. 65–72.

Ben Daniel, D.J. et E.E. David Jr. 1979. Semi-conductor alternating-current motor drives and energy conservation. Science 206(4420), 773–776.

Bergman, K.H. 1983. Climate change. International Journal of Environment Studies 20, 91–101.

Berndt, E. et D. Wood. 1975. Technology, prices, and the derived demand for energy. Review of Economics and Statistics 57(3), 259–268.

———— 1979. Engineering and economic interpretations of capital–energy complementarity. American Economic Review 69(3), 342–354.

Berry, R.A. et W. Cline. 1979. Agricultural development: an international perspective. John Hopkins University Press, Baltimore.

Bhagavan, M. et R. Carlman. 1982. Strengthening of energy research capacity in developing countries. Agence suédoise de la recherche avec les pays en développement, Stockholm, Suède.

Bhatia, R. 1984a. Energy alternatives for irrigation pumping: an economic analysis for Northern India. ILO Working Paper 137. Organisation international du travail, Genève, Suisse.

———— 1984b. Energy and agriculture in developing countries. Energy Research Group, Ottawa (Ont.), Canada.

Bhushan, B. 1984. Energy research and development programmes in India. Energy Research Group, Ottawa (Ont.), Canada.

Bialy, J. 1979. Firewood use in a Sri Lankan village: a preliminary survey. University of Edinburgh, Edimbourg, R.-U. Occasional Papers on Appropriate Technology.

Binswanger, H.P. 1978. The economics of tractors in South Asia — An analytical review. Agricultural Development Council, New York et ICRISAT, Hyderabad, Inde.

Bliss, C. et N. Stern. 1978. Productivity, wages and nutrition. Journal of Development Economics 5(4), 331–398.

Blitzer, C.R. 1984. Energy demand in Jordan: a case study of energy economic linkages. The Energy Journal 5(4), 1–19.

Blitzer, C.R., P. Clarke et L. Taylor. 1975. Economy-wide models and development planning. Oxford University Press, Oxford, R.-U.

Blitzer, C.R. et R.S. Eckaus. 1983. Energy-economy interactions in Mexico: a multiperiod general equilibrium model. Working Paper MIT-EL 83-017WP. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Mass., É.-U.

Bockris, J. O'M. et T.N. Veziroglu. 1985. A solar-hydrogen energy system for environmental compatibility. Environmental Conservation 12(2), 105–118.

Bockris, J. O'M, D. Dandapani, D. Cocke et J. Ghoroghchian. 1985. On the splitting of water. International Journal of Hydrogen Energy 10(3), 179–202.

Borrini, G. et S. Margen. 1984. Human energetics. Energy Research Group, Ottawa (Ont.), Canada.

Bos, M.G. et J. Nugteren. 1974. On irrigation efficiencies. Publication 19, International Institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen, Pays-Bas.

British Mining Consultants Ltd. 1983a. Progress Report no 2 : Operational assistance, mechanized longwall mines, coal sector India. For Overseas Development Administration (U.K.), Londres, R.-U.

———— 1983b. Report on further development of Moonidih Mechanized Longwall Training Institute and proposed scheme of training for work on mechanised longwall faces for Coal India Limited. For Overseas Development Administration (U.K.), Londres, R.-U.

Brooks, D. 1984. Markets for electricity with efficient application. Energy Research Group, Ottawa (Ont.), Canada.

Brown, N. et P. Tata. 1984. Biomethanation. Energy Research Group, Ottawa (Ont.), Canada.

Bruggink, J.J.C. 1984. The socio-economic aspects of introducing solar flat plate collector technology in the Sahel. ILO Working Paper 130. Organisation internationale du travail, Genève, Suisse.

Buchanan, M., N. Bursey, K. Lewis et P. Mullen. 1980. Transport planning for Greater London, U.K. Saxon House, Aldershot, Angleterre.

Bullard III, C.W. et R.A. Herendeen. 1975. The energy costs of goods and services. Energy Policy 3(6), 268–278.

Bullard III, C.W., D.A. Pilati et P.S. Penner. 1978. Net energy analysis: handbook for combining process and input–output analysis. Resources and Energy 1, 267–313.

Caceres, A. 1985. Combustion of wood and charcoal : challenges to the diffusion of efficient stoves and kilns. Symposium sur les systèmes énergétiques de la biomasse : Building Blocks for sustainable Agriculture, Airlie, Virginie, É.-U., 29 janvier–1er février 1985.

Campbell, B. 1983. Petrodollar recycling : an explanation and evaluation of what happened from oil shock one to the present time. Dans R.M. Bautista et S. Naya, éd. Energy and structural change in the Asia Pacific region : Communications et comptes rendus du 13e Colloque sur le commerce et le développement du Pacifique tenu à Manille, Philippines, 24–28 janvier 1983. Philippine Institute for Development Studies et Banque asiatique de développement, Manille, Philippines. 447–467.

Campos, E.V. 1984. Electrolytic hydrogen: application feasibility in Brazil. Dans T.N. Veziroglu et J.B. Taylor, éd. Hydrogen energy progress V : proceedings of the 5th World Hydrogen Energy Conference, Toronto, Canada, 15–20 July 1984. Vol. 1, Pergamon Press, New York, NY, É.-U. 313–322.

Canada. 1981. Chambre des communes. Les eaux sournoises — La tragique réalité des pluies acides : Rapport du Sous-comité sur les pluies acides et du Comité permanent des pêches et des forêts. Ministère des Approvisionnements et Services, Ottawa (Ont.), Canada.

Carlstein, T. 1983. Time resources, society and ecology : on the capacity for human interaction in space and time : Volume I : Preindustrial societies. Allen and Unwin, Londres, R.-U.

Carlstein, T., D. Parkes et N. Thrift, éd. 1978a. Timing space and spacing time : Volume 1 : Making sense of time. Edward Arnold, Londres, R.-U.

———— 1978b. Timing space and spacing time : Volume 2 : Human activity and time geography. Edward Arnold, Londres, R.-U.

———— 1978c. Timing place and spacing time : Volume 3 : Time and regional dynamics. Edwards Arnold, Londres, R.-U.

Carpetis, C. 1984. Break-even and optimization conditions for overall energy systems wherein hydrogen storage facilities are used. Dans T.N. Veziroglu et J.B. Taylor, éd. Hydrogen energy progress V : proceedings of the 5th World Hydrogen Energy Conference, Toronto, Canada, 15–20 July 1984. Vol. 1, Pergamon Press, New York, NY, É.-U. 233–248.

Casimir, H.B.G. 1983. Commentaire d'une communication présentée par R.L. Garwin : Industrial support for research mechanisms and magnitude. Dans J. Kendrew et J.H. Shelley, éd. Priorities in research : Comptes rendus du 4e Symposium Beohringer Ingelheim tenu à Kronberg, Taunus, 12–15 mai 1982. Excerpta Medica, Amsterdam, Pays-Bas.

Casler, S. et S, Wilbur. 1984. Energy input-output analysis : A simple guide. Resources and Energy 6, 187–201.

Cecelski, E. 1984. The rural energy crisis, women's work and family welfare : Perspectives and approaches to action. World Employment Programme Research Working Paper WEP10/WP.35. Organisation internationale du travail, Genève, Suisse.

Chamberlain, J. 1981. The physics and chemistry of acid precipitation. Technical Report JSR-81-25. SRI International, Menlo Park, Cal., É.-U.

Charney, J., P.H. Stone et W.J. Quirck. 1975. Drought in the Sahara : a biogeophysical feedback mechanism. Science 187, (4175), 434.

Chateau, B. et B. Lapillonne. 1978. Long-term energy demand forecasting : A new approach. Energy Policy 6(2), 140–157.

———— 1979. Long-term energy demand simulation. Dans A. Strub, éd. Energy models for the European Community. IPC Science and Technology Press, Gulford, Surrey, R.-U. 120–128.

———— 1984. La simulation des actions et investissements de maîtrise de l'énergie pour l'industrie et le chauffage des logements dans le modèle MEDEE3-ME. Institut économique et juridique de l'énergie, Grenoble, France. (ébauche).

Chili. 1982. Comisión Nacional de Energía. Balance de Energía 1961–1980 Chile. Comisión Nacional de Energía, Santiago, Chili.

Choucri, N. et S. Lahiri. 1984. Short-run energy-economy interactions in Egypt. World Development 12(8), 799–820.

Christensen, L., D.W. Jorgenson et L.J. Lau. 1973. Transcendental logarithmic production frontiers. Review of Economics and Statistics 55, 28–45.

Chung, K. 1985. Issues of civilian nuclear technology policy in developing countries. IDRC project : 3-A-78-4120. Centre de recherches pour le développement international, Ottawa (Ont.), Canada (miméo).

Clifford, T.E. et W.J. Mead. 1984. The external costs of electric power from coal fired and nuclear power plants. Communication présentée à la réunion de l'association internationale des économistes de l'énergie tenue à New Delhi, Inde, 4–7 janvier 1984.

Cole, D.E. et D.J. Patterson. 1983. Future trends of U.S. passenger car engines. Communication présentée à la table ronde sur les «Progrès au titre des combustibles du transport», 11e Congrès mondial du pétrole, Londres, R.-U. Preprint of the Eleventh World Petroleum Congress, RTD 6. John Wiley and Sons, Chichester, R.-U.

Colitti, M. 1985. Oil industry participation in natural gas development. Energy 10(2), 151–156.

Collier, Hugh. 1984. Developing electric power. John Hopkins University Press, Baltimore, Maryland, É.-U.

Collins, R.E. 1985. Medium temperature solar thermal systems. Dans E. Bilgen et K.G.T. Hollands, éd. Intersol 85 : Résumés des communications : Congrès biennal de la Société internationale d'énergie solaire, ISES, 23–27 juin 1985, Montréal, Québec, Canada.

Commission des communautés européennes. 1983. Scénarios à l'horizon 2000 : une étude du marché de l'énergie dans la Communauté européenne. Commission des communautés européennes, Bruxelles, Belgique.

———— 1984. Energy and development. What challenges? Which methods? Synthesis and conclusions. Lavoisier, Paris, France.

Coombs, J., D.O. Hall et P. Chartier. 1983. Plants as solar collectors : optimizing productivity for energy. An assessment study. Solar Energy R&D in the European Community. Series E, Vol. 4 : Energy from Biomass. D. Reidel, Dordrecht, Pays-Bas.

Cooper, C. 1973. Science, technology and development : The political economy of technical advance in underdeveloped countries. Frank Cass., Londres, R.-U.

Costanza, R. et R.A. Herendeen. 1984. Embodied energy and economic value in the United States economy : 1963, 1967 et 1972. Resources and Energy 6. 129–163.

Deaton, A. 1978. Specification and testing in applied demand analysis. Economic Journal 88(3), 524–536.

Deaton, A. et J. Muellbauer. 1980. Economics and consumer behavior. Cambridge University Press, Cambridge, R.-U.

de Cabrera, S., M.C. de Arriola, E. Morales et C. Rolz. 1982. EX-FERM ethanol production using chipped sugarcane in packed bed fermenters. European Journal of Applied Microbiology and Biotechnology 14. 21–28.

De Lepeleire, G., K. Krishna Prasad, P. Verhaart et P. Visser. 1981. A woodstove compendium. Woodburning Stove Group, Eindhoven University of Technology, Eidhoven, Pays-Bas.

Demos, J. et S.S. Boocock, éd. 1978. Turning points : historical and sociological essays on the family. American Journal of Sociology, Supplement 84.

Deolalikar, A.B. et Vijverberg, W.P.M. 1983. The heterogeneity of family and hired labour in agricultural production : a test using distinct-level data from India. Journal of Economic Development 8(2), 45–69.

Desai, A.V. 1985. Ends and means in rural energy surveys. IDRC Manuscript report, IDRC-MR112e. CRDI, Ottawa (Ont.), Canada.

Desai, N. 1984. Atoms for peace, atoms for war, atoms for profit. Energy Research Group, Ottawa (Ont.), Canada.

De Vallée, P. 1985. Alternative methods and costs of financing gas development projects. Energy 19(2), 181–185.

Doniat, D. et R. Rouget. 1984. Étude d'une pile alcaline H_2/O_2 pour le véhicule orbital récupérable Hermès. Entropie 20(116–117), 79–81.

Dorado, H.J. 1985. Strategies for cooperation in petroleum exploration and development among developing countries. Symposium des Nations Unies sur le financement des projets d'exploitation et de mise en valeur du pétrole dans les pays en développement, Athènes, 22–27 avril 1985.

Dowdy, M.W. 1983. Advanced automotive heat engines. Dans R.A. Meyers. Handbook of energy technology and economics. John Wiley and Sons, New York, NY, É.-U., 1003–1031.

Dryden, I.G.C. 1982. The efficient use of energy. 2e édition. Butterworth Scientific Publications, Londres, R.-U.

Duersten, A.L. 1983. External financing for energy in the developing countries. World Bank Energy Department Paper no 8. Banque mondiale, Washington, DC, É.-U.

Dumont, R. 1957. Types of rural economy : studies in world agriculture. Methuen, Londres, R.-U.

Du Toit, R.F., B.M. Campbell, R.A. Haney et D. Dore. 1984. Wood usage and tree planting in Zimbabwe's communal lands : a baseline survey of knowledge, attitudes and practices. Rapport rédigé pour la Commission des forêts du Zimbabwe et la Banque mondiale. Resources Studies, Harare, Zimbabwe.

Edmonds, J. et J.M. Reilly. 1985a. Global energy. Assessing the future. Oxford University Press, New York, NY, É.-U.

———— 1985b. Uncertainty in carbon emissions. Report of the carbon dioxide emissions project. Institute for Energy Analysis, Oak Ridge Associated University, Oak Ridge, TN, É.-U. (miméo).

Egnéus, H. et A. Ellegärd, éd. 1985. Bioenergy 84 : Comptes rendus d'un colloque international sur la bioénergie tenu du 15 au 21 juin 1984 au Centre des foires commerciales de la Suède, Göteborg, Suède. (5 volumes). Elsevier, Londres, R.-U.

El Salvador. 1980. Comisión Ejecutiva Hidroélectrica del Río Lempa. Balance energético nacional. San Salvador.

Fein, E. 1982. An assessment of nonfossil hydrogen. Dans T.N. Veziroglu, éd. Alternative energy sources IV - volume 5: Nuclear. hydrogen, biogas. Ann Arbor Science Publishers, Ann Arbor, Mich. 1: 265–282.

———— 1985. Hydrogen : an accomodating fuel. International Journal of Hydrogen Energy 10(5), 281–290.

Fettweis, G.B. 1984. Some remarks on coal and development. Berg-und Hüttenmänische Monatshefte 129(10), 379–385.

Foley, G. et G. Barnard. 1982. Biomass gasification in developing countries. Rapport final à la Banque mondiale. Earthscan, Londres, R.-U.

Foley, G. et P. Moss. 1983. Improved cooking stoves in developing countries. Earthscan, Londres, R.-U.

Fonds monétaire international. 1984. Statistiques financières internationales, Annuaire. Fonds monétaire international, Washington, DC, É.-U.

Food and Agriculture Organization (Organisation pour l'alimentation et l'agriculture). 1978. Improved use of plant nutrients. Rapport du groupe d'experts sur une meilleure exploitation des éléments nutritifs dans les plantes, Rome, 18–22 avril 1977. FAO Soils Bulletin no 37, Rome.

———— 1983. Simple technologies for charcoal making. Organisation pour l'alimentation et l'agriculture, Rome.

———— 1984. Annuaire FAO de la production, 1983, vol. 37. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, Rome.

Foster, J. 1985. Petroleum exploration and development trends in the developing countries. Symposium des Nations Unies sur le financement des projets d'exploitation et de mise en valeur du pétrole dans les pays en développement, Athènes, 22–27 april 1985.

Freeman, C. 1982. The economics of industrial innovation. Frances Pinter, Londres, R.-U.

Freeman, C., J. Clark et L. Soete. 1982. Unemployment and technical innovation : A study of long waves and economic development. Frances Pinter, Londres, R.-U.

Fridleifsson, I.B. 1984. Geothermal energy exploration and utilization. Energy Research Group, Ottawa (Ont.), Canada.

Gaines, L, et A.M. Wolsky. 1984. Economics of hydrogen production : The Next twenty-fire years. Dans T.N. Veziroglu et J.G. Taylor, éd. Hydrogen energy progress V: proceedings of the 5th World Hydrogen Energy Conference, Toronto, Canada, 15–20 July 1984, vol. 1, Pergamon Press, New York, NY, É.-U. 259–270.

Gelin, P. et G. Petit. 1980. Évolution du marché de l'hydrogène au cours des 25 prochaines années. Dans A.A. Strub et G. Imarisio, éd. Hydrogen as an energy vector: proceedings of the International Seminar held in Brussels, 12–14 February 1980. D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Hollande. 664–674.

Georgescu-Roegen, N. 1976. Energy and economic myths : institutional and analytical economic essays. Pergamon Press, New York, NY, É.-U.

Gibbons, J. 1984. Capital-energy substitution in the long run. The Energy Journal 5(2), 109–118.

Glantz, M.N. 1977a. The U.N. and desertification : dealing with a global problem. Dans M.N. Glantz, éd. 1977b. Desertification : environmental degradation in and around arid lands. Westview Press, Boulder, Col. 1–16.

Goblirsch, G.M. et R.D. Talty. 1980. Recent developments in fluidized bed combustion technology for lignites and subbituminous coals in the USA. Dans Fluidized combustion : systems and applications. Graham and Trotman, Londres, R.-U. Institute of Energy Symposium Series no 4, volume III, 1A-4-1–IA-4-9.

Gold, T. 1985. The origin of natural gas and petroleum, and the prognosis for future supplies. Annual Review of Energy 19. 53–78.

Goldberger, A.S. 1967. Functional form and utility : a review of consumer demand theory. Systems Formulation, Methodology and Policy Workshop Paper 6703, Social Systems Research Institute, University of Wisconsin, Madison, Wisconsin.

Goldemberg, J., R.Y. Hukai, C.A. Scarpinella, E.N. Kaneko, E.R. Ueki et al. 1984. Country study — Brazil. A study on end-use energy strategy. Communication présentée au Colloque mondial sur les stratégies énergétiques axées sur les utilisations finales, 4–15 juin 1984, São Paulo, Brésil.

Goldemberg, J., T.B. Johansson, A.K.N. Reddy et R.H. Williams. 1985. Energy for a sustainable world. (2 vols.). Center for Energy and Environmental Studies, Princeton University, Princeton, N.J. (miméo).

Gordon, A. 1984. Guide to world coal markets. Pasha Publications, Arlington, Va.

Govinda Raju, S.P. et R. Narasimha. 1980. A low-cost waterpumping windmill using a sail type Savonius rotor. Dans A.K.N. Reddy, éd. Rural technology, Indian Academy of Sciences, Bangalore. 163–178.

Grainger, L. et J. Gibson. 1981 Coal utilization : technology, economics and policy. Graham and Trotman, Londres, R.-U.

Greene, R.P. et J.M. Gallagher. 1980. World coal study : coal — bridge to the future. Ballinger, Cambridge, Mass.

Griffin, J. et P. Gregory. 1976. An inter-country translog model of energy substitution responses. American Economic Review 66(5), 845–857.

Häfele, W., J. Anderer, A. McDonald et N. Nakicenovik. 1981. Energy in a finite world : paths to a sustainable future. Ballinger Publishing Company, Cambridge, Mass.

Haines, B., C. Jordan, H. Clark et K.E. Clark. 1983. Acid rain in an Amazon rain forest. Tellus 35B(1), 77–80.

Halbouty, M.T. 1983. Reserves of natural gas outside communist block countries. Communication présentée au 11^{e} Congrès mondial du pétrole, Londres, pour une table ronde sur les réserves

mondiales de gaz naturel. Preprint of the Eleventh World Petroleum Congress, PD12. John Wiley and Sons, Chichester, R.-U.

Hall, D.O. 1984. Biomass : fuel versus food, a world problem? Dans N.S. Margaris, M. Arianoustou-Faraggitaki et W.C. Oechel, éd. Being alive on land : Comptes rendus du Colloque international sur l'adaptation à l'environnement terrestre, tenu à Halkidi, Grèce, 1982. Dr. W. Junk Publisher, Dordrecht, Hollande.

Hamakawa, Y. 1985. Recent advances in amorphous silicon solar cells and their technologies. Dans E. Gilgen and K.G.T. Hollands, ed. Intersol 85 : Résumé des communications : Congrès biennal de la Société internationale d'énergie solaire, ISES, 23–29 juin 1985. Montréal, Québec.

Hansen, J., G. Russell, A. Lacis, I. Fung, D. Rind et P. Stone. 1985. Climate response times : Dependence on climate sensitivity and ocean mixing. Science 229(4716), 857–859.

Harris, M. 1977. Cannibals and kings : the origins of cultures. Random House, New York, NY, É.-U.

Harte, J. 1982. New Developments in Acid Precipitation Research. Dans S.W. Yuan, éd. Energy, resources and environment : Communications presentées au premier colloque Chine–É.-U., 7–12 novembre 1982. Pergamon Press, New York, NY, É.-U.

Hayami, Y. et V.W. Ruttan. 1971. Agricultural development : an international perspective. John Hopkins University Press, Baltimore.

Hossain, K. 1979. Law and policy in petroleum development : changing relations between transnationals and states. Frances Pinter, Londres, R.-U.

Houthakker, H. 1957. An international comparison of household expenditure patterns commemorating the centenary of Engel's law. Econometrica 25(3), 532–551.

Howard, J.R. 1979. A technology for helping to alleviate the energy problem — fluidized bed combustion and heat transfer. Dans P.W. O'Callaghan, éd. Energy for industry : Recueil de communications scientifiques et techniques sur l'utilisation industrielle de l'énergie avec une efficience maximale. Pergamon Press, Oxford. 111–129.

Howes, M. 1985. Rural energy surveys in the Third World : a critical review of issues and methods. IDRC Manuscript Report, IDRC-MR107e. CRDI, Ottawa (Ont.), Canada.

Hubbert, M. K. 1962. Energy resources : a report to the Committee on Natural Resources. National Academy of Sciences. National Research Council, Pub. 1000-D, Washington, DC, É.-U.

Hudson, E.A. et D.W. Jorgenson. 1974. U.S. energy policy and economic growth. Bell Journal of Economics 5(2), 461–514.

Hughart, D. 1979. Prospects for traditional and non-conventional energy sources in developing countries. Banque mondiale, Washington, DC, É.-U.

Humphreys, G.C. 1977. Methanol production and fuel methanol vs. LNG. Dans D.M. Considine, éd. Energy technology handbook. McGraw-Hill, New York, NY, É.-U., p. 2-120 – 2-132.

Hurst, C. 1984. Energy for small-scale engines : a review of potential energy sources. Energy Research Group, Ottawa (Ont.), Canada.

Instituto de Economía Energética. 1982. Methodology for the evaluation of energy requirements in the developing countries. (polycopié). Fundación Bariloche, Buenos Aires, Argentine.

———— 1983. Latin American integral energy balances — Second report. (polycopié). Fundación Bariloche, Buenos Aires, Argentine.

Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT). 1981. Potencial de biomassas vegetais para fins energéticos no estado de São Paulo. Companhia Energética de São Paulo, São Paulo, Brésil.

Instituto Nacional de Energía. 1984. Perspectivas energéticas para el año 2000 : enscenarios de evolución de la demande. Instituto Nacional de Energía, Quito, Équateur.

Inter-American Development Bank (Banque interaméricaine de développement). 1982. The impact of energy costs on transportation in Latin America. Economic and Social Development Department, IDB, Washington, DC, É.-U.

Inter-American Development Bank and Institute for the Integration of Latin America. 1981. Fuentes neuvas de energía situación y perspectivas de desarrollo y cooperación — encuesta regional. IDB, Buenos Aires.

Intermediate Technology Power Ltd. 1983. Wind Technology Assessment Study. Volume I. Wind Study Report. Intermediate Technology Power Ltd., Mortimer Hill, R.-U.

International Labour Organization (Organisation internationale du travail). 1974. Mechanization and employment in agriculture : case studies from four continents. Organisation internationale du travail, Genève.

Isaza, J.F. 1984. Solar energy in the tropics. Dans Y. Lambert, D. Fall et J.F. Isaza, Renewable energy resources. Manuscript report no 3. Energy Research Group, Ottawa (Ont.), Canada.

Jenkins, D.M., B.R. Allen et T.S. Reddy. 1982. Evaluation of the EX-FERM process to UNIDO. Organisation des Nations Unies pour le développement industriel, Vienne.

Julius D. 1985. Natural gas utilization studies : Methodology and application. World Bank Energy Department Paper no 24, Banque mondiale, Washington, DC, É.-U.

Kahane, A. 1985. Economic aspects of the Brazilian alcohol program. Thèse de maîtrise, University of California, Berkeley.

Kamien, M.I. et N.L. Schwartz. 1982. Market structure and innovation. Cambridge University Press, Cambridge, R.-U.

Karch, E.G. et M. Boutette. 1983. Charcoal : small scale production and use. German Appropriate Technology Exchange/Deutsche Gessellschaft für Technische Zusammenarbeit, Eschborn, République fédérale allemande.

Kaupp, A. et J.R. Goss. 1984. State of the art for small-scale (up to 50 kW) gas producer-engine systems. Rapport rédigé pour le Service des forêts du USDA. Tipi Workshop Books, Allenspark, Col., É.-U.

Kellogg, W.M. et S.H. Schneider. 1977. Climate, desertification, and human activities. Dans M.H. Glantz, éd. Desertification : environmental degradation in and around arid lands. Westview Press, Boulder, Col. 141–164.

Kettani, M.A. 1982. Photovoltaics in the Arab world. Solar Cells 6(3), 239–249.

Keynes, J.M. 1936. General theory of employment, interest and money. Macmillan, Londres, R.-U.

Khatib, H. 1983. Availability of thermal generating plant in developed and less developed countries. Communication présentée au groupe de travail sur l'accès aux centrales thermiques, 12e congrès de la Conférence mondiale sur l'énergie, 18–23 septembre 1983. New Delhi.

Klass, D.L., président du colloque. 1982. Energy from biomass and wastes, VI. Communications du colloque présentées du 25–29 janvier 1982, Lake Buena Vista, Floride. Institute of Gas Technology, Chicago, Ill.

Koide, S., R.B. Brooks et T. Vicharangsan. 1982. Regional study on production of fuel ethanol from agro-products. Commission économique et sociale pour l'Asie et le Pacifique, Bangkok.

Kristoferson, L., V. Bokalders et M. Newham. 1984. Renewable energy for developing countries : A review. Volume D : Solar, wind, hydro, etc. The Beijer Institute, Stockholm, Suède.

Ladomatos, N., N.J.D. Lucas et W. Murgatroyd. 1978. Industrial energy use, I: power losses in electrically driven machinery. Energy Research 2.179–196.

Ladomatos, N., N.J.D. Lucas, W. Murgatroyd et B.C. Wilkins. 1979. Industrial energy use, II : the prospects for providing motive power in a machine tool shop from a centralized hydraulic system. Energy Research 3. 19–28.

Lapillonne, B. 1983. The MEDEE approach and its application to developing countries. Dans H. Neu et D. Bain, éd. National energy planning and management in developing countries. D. Reidel Publishing, Dordrecht, Pays-Bas, 271–298.

Laslett, P., aidé de R. Wall. 1972. Household and family in past time. Cambridge University Press, Cambridge, R.-U.

Leach, G. 1976. Energy and food production. IPC Science and Technology Press, Guildford, Angleterre.

———— 1985. Household energy handbook for developing countries. Section III : Household energy consumption. Ébauche rédigée par la Banque mondiale, Washington, DC, É.-U. International Institute for Environment and Development, Londres, R.-U.

Leach, G., L. Jarass, L. Hoffmann et G. Obermair. 1986. Energy and growth : a comparison of five industrialized and eight developing countries. Butterworth Scientific, Guildford, Angleterre.

Le Houérou, H.N. 1977. The nature and causes of desertification. Dans M.H. Glantz, éd. 1977 : Desertification : environmental degradation in and around arid lands. Westview Press, Boulder, Colorado. 17–38.

Leibenstein, H. 1957. Economic backwardness and economic growth. John Wiley & Sons, New York, NY, É.-U.

Li Jing-ding, Lu Ying-qing et Du Tian-shen. 1984. Improvement in the combustion of hydrogen-fueled engines. Dans T.N. Veziroglu et J.B. Taylor, éd. 1984. Hydrogen energy progress V : proceedings of the 5th World Hydrogen Energy Conference, Toronto, Canada, 15–20 July 1984, Vol. 4. Pergamon Press, New York, NY, É.-U. 1579–1593.

Lluch, Constantino et al. 1977. Patterns in household demand and saving. Oxford University Press, Oxford.

Long, R. 1982. Constraints on international trade in coal. Agence internationale de l'énergie, Londres, R.-U.

Lovins, A.B. 1977. Soft energy paths : toward a durable peace. Harper and Row Publishers, New York, NY, É.-U.

Luque, A. 1984. Photovoltaic solar electricity in developing countries. Energy Research Group, Ottawa (Ont.), Canada.

Mack, Ruth P. et T.J. Leigland. 1982. "Optimizing" in households toward a behavioral theory. American Economic Review 72(2), 103–105.

Mahin, D.B. 1984. Bioenergy Systems Report : downdraft gasifier engine systems. U.S. Agency for International Development, Washington, DC, É.-U.

Makhijani, A. et A. Poole. 1975. Energy and agriculture in the Third World. Ballinger Publishing Company, Cambridge, Mass.

Maly, R. 1983. General prospects of improving combustion efficiency of I.C. engines. Communication spéciale présentée au 11e Congrès mondial du pétrole, Londres, R.-U. Preprint of the Eleventh World Petroleum Congress, SP14. John Wiley and Sons, Chichester, R.-U.

Manibog, F.R. 1984. Improved cooking stoves in developing countries : Problems and opportunities. Annual Review of Energy 9. 199–227.

Martin, W.F. et F.J.P. Pinto. 1979. A perspective on existing and contemplated methodologies for analysing developing country energy prospects. Dans Colloque sur les données énergétiques dans les pays en développement, décembre 1978, vol. 1. Organisation de coopération et de développement économiques, Paris. 94–96.

Masters, C.D. 1983. Distribution and quantitative assessment of world petroleum reserves and resources. Communication présentée au 11e Congrès mondial du pétrole, Londres, pour une table ronde sur les réserves mondiales de pétrole brut. Preprint of the Eleventh World Petroleum Congress, PD 11. John Wiley and Sons, Chichester, R.-U.

Mathur, S.P. 1980. Underground mine mechanisation : Appropriateness of intermediate technology for coal industry. Séminaire national sur les politiques et programmes de l'exploitation minière, Station centrale de recherche sur les mines, Dhanbad, Inde, 23 novembre 1980.

Mattos, M.C. 1985. National hydrogen energy programme in Brazil. International Journal of Hydrogen Energy 10(9), 601–606.

McCaslin, J.C., éd. 1983. International petroleum encyclopedia. PennWell, Tulsa, Okla.

McNelis, B. et P. Fraenkel. 1984. Solar and wind technologies for developing countries : Current status and anticipated development. Energy Research Group, Ottawa (Ont.), Canada.

Meier, R.L. 1974. Planning for an urban world : The design of resource-conserving cities. MIT Press, Cambridge, Mass.

Menard, H.W. 1971. Science : Growth and change. Harvard University Press, Cambridge, Mass.

Mendeleev, D. 1877. L'origine du pétrole. Revue de Science, 2e série, 7e année, 18.409–16.

Merriam, M. 1984. Use of wind for electricity generation. Energy Research Group, Ottawa (Ont.), Canada.

Meta Systems Inc. 1980. State-of-the-art review of economic evaluation of non-conventional energy alternatives. Rappport rédigé pour le département d'Agriculture des États-Unis. Meta Systems Inc., Cambridge, Mass.

_____ 1982. An examination of the substitution of woody biomass based fuels for oil in the industrial sectors of Costa Rica. Meta Systems Inc., Cambridge, Mass.

Metals Society, The. 1981. Energy-conscious iron- and steel-making. Comptes rendus d'une conférence internationale organisée par Metals Society, Londres, et Verein Eisenhütte Osterreich, Leoben, à Montanuniversität, Leoben, Autriche, 21–24 avril 1980. The Metals Society, Londres, R.-U.

Meyers, R.A., éd. 1983. Handbook of energy technology and economics. John Wiley and Sons, New York, NY, É.-U.

Moavenzadeh, F. et D. Geltner. 1984. Transportation, energy and economic development : a dilemma in the developing world. Elsevier Publishing, Amsterdam.

Moles, F.D. 1984. The economic management of energy in the world's cement industry. Dans A. Reis, J.L. Peube, I. Smith et K. Stephan, éd. 1984. Energy economics and management in industry : Comptes rendus du Congrès européen, Algarve, Portugal, 2–5 avril 1985 : volume 2 ; Energy Management, Pergamon Press, Oxford.

Moscoso, S.R., et A.A.R. Barbalho. 1983. Modelo Maben — versão I : Metodologia para projeção de curto prazo e análise de balanços energéticos. Ministério das Minas e Energia, Secretaria de Technologia, Brasília, Brésil.

Mubayi, V. et P.M. Meier. 1981. Energy models for developing countries : A comparative assessment. Brookhaven National Laboratory Upton, N.Y.

Mudahar, M.S. et T.P. Hignett. 1982. Energy and fertilizer : Policy implications and options for developing countries. International Fertilizer Development Center, Muscle Shoals, Ala.

Müller, M., K. Maher et S. Rath-Nagel. 1982. Energy technology systems analysis project, summary report on technology characterizations. Agence internationale de l'énergie, Paris.

Munasinghe, M. 1979. The economics of power system reliability and planning. John Hopkins University Press, Baltimore, Maryland.

_____ 1980. Energy in Sri Lanka. Association du Sri Lanka pour l'avancement de la science, Colombo, Sri Lanka.

_____ 1983. Third world energy policies : Demand management and conservation. Energy Policy 11(1), 4–18.

_____ 1984a. Energy strategies for oil-importing developing countries. Natural Resources Journal 24(2), 351–368.

_____ 1984b. A framework for establishing energy research and development (R&D) policies and priorities in a developing country. Energy Research Group, Ottawa (Ont.), Canada.

_____ 1986. Rural electrification : Analysis and policy applications. Westview Press, Boulder, Colorado.

Munasinghe, M. et G. Shramm. 1983. Energy economics, demand management and conservation policy. Van Nostrand Reinhold, New York, NY, É.-U.

Munasinghe, M. et W.G. Scott. 1982. Energy efficiency : optimization of electric power system losses. World Bank, Washington, DC, É.-U.

Munasinghe, M. et J.J. Warford. 1982. Electricity pricing : Theory and case studies. John Hopkins University Press, Baltimore, Maryland.

Munasinghe, M., M. Dow et J. Fritz, éd. 1985. Microcomputers for development. Issues and policy. Conseil de l'informatique et de la technique de l'information de Sri Lanka, Colombo, et National Academy of Sciences, Washington, DC, É.-U.

Mwandosya, M.J., S. Lwakabamba et S.R. Nkonoki. 1983. Comptes rendus du colloque régional sur l'énergie pour le développement de l'Afrique orientale et australe. Volume II. Communications du Colloque. Colloque régional sur l'énergie pour le développement de l'Afrique orientale et australe, 4–13 avril, Université de Lund, Lund, Suède.

Natarajan, I. 1985. Domestic fuel survey with special reference to kerosene. (Volume I). Conseil national de la recherche économique appliquée, New Delhi.

National Research Council. 1983a. Changing climate : report of the Carbon Dioxide Assessment Committee. National Academy Press, Washington, DC, É.-U.

———— 1983b. Producer gas : another fuel for motor transport. National Academy Press, Washington, DC, É.-U.

Nema, S.K., K.V.C. Rao, V.N. Krishnamurthy, V. Swaminathan, V. Mitra et V.R. Gowariker. 1984. "Speed" — A solid polymer electrolyte electrolyzer development programme for electrolytic generation of hydrogen. Dans T.N. Veziroglu et J.B. Taylor, éd. 1984. Hydrogen energy progress V : proceedings of the 5th World Hydrogen Energy Conference, Toronto, Canada, 15–20 July, vol. 1, Pergamon Press, New York, NY, É.-U. 373–382.

Neto, C., J. Cravo, A. de Sousa, H. Baguenier, A. Martins et al. 1980. A procura de energia en Portugal (cenários alternativas). Direção geral da Energia, Lisbonne.

Newbery, D.M.G. et N.H. Stern. 1985. The theory of taxation for developing countries. Banque mondiale, Washington (miméo).

North, F.K. 1982. Review of Thomas Gold's deep-earth-gas hypothesis. Energy Exploration and Exploitation. 1(2), 105–110.

Ocampo, R.B. 1982. Low-cost transport in Asia : a comparative report on five cities. CRDI, Ottawa (Ont.), Canada.

Odell, P.R. 1984. The oil crisis : Its nature and implications for developing countries. Dans D.C. Ion, P.R. Odell et B. Massaver, The oil prospect. Energy Research Group Manuscript Report, ERG-MR1e. Energy Research Group, Ottawa (Ont.), Canada. 23–45.

Odum, H.T. et E.C. Odum. 1976. Energy basis for man and nature. McGraw-Hill, New York, NY, É.-U.

Ohta, T., J.E. Funk, J.D. Porter et B.V. Tilak. 1985. Hydrogen production from water : Summary of recent research and development presented at the 5th World Hydrogen Energy Conference. International Journal of Hydrogen Energy 10(9), 571–576.

Organisation de coopération et de développement économiques. 1973. Comptes rendus du symposium sur les techniques d'amélioration des conditions urbaines par limitation du trafic routier. OCDE, Paris.

———— 1984. External support for energy development in developing countries. Organisation de coopération et de développement économiques, Paris.

Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture. 1956. Énergie solaire et éolienne : actes du colloque de New Delhi. UNESCO, Paris.

Organización Latinoamericana de Energía. 1981. Balances energéticos de América Latina. OLADE, Quito, Équateur.

Ostrovski, C.M., J. Aitken et D. Free. 1985. New developments in fuel ethanol production by gaseous anhydrous hydrofluoric acid (HF) hydrolysis of hardwood *Populus tremuloides*. Dans H. Egnéus et A. Ellegärd, éd. 1985. Bioenergy 84 : Comptes rendus d'un colloque international sur la bioénergie tenu du 15 au 21 juin 1984 au Centre des foires commerciales de Suède, Göteborg, Suède. Volume III : Biomass conversion. Elsevier Applied Science Publishers, Barking, Angleterre. 181–187.

Ozatalay, S., S. Grubaugh et T. Veach Long II. 1979. Energy substitution and national energy policy. American Economic Review 69(2), 369–371.

Parra, F.R. 1983. Petroleum exploration in the developing countries 1971–1981 : results and expectations. Communication présentée au 11e Congrès mondial du pétrole, Londres, pour une table ronde sur les réserves mondiales de pétrole brut. Preprint of the Eleventh World Petroleum Congress, PD11. John Wiley and Sons, Chichester, R.-U.

Passmore, R. et J.V.G.A. Durnin. 1955. Human energy expenditures. Physiological Reviews 35, 801–840.

Pathak, B.S., M.L. Gupta, S.L. Jindal, D. Singh et A.P. Bhatnagar. 1980. Energy balance and utilization of agricultural waste on a farm. Department of Processing and Agricultural Structures, College of Agricultural Engineering, Punjab Agricultural University, Ludhiana, Inde.

Patterson, W.C. et R. Griffin. 1978. Fluidized bed energy technology : Coming to a boil. Inform, New York, NY, É.-U.

Pavitt, K. 1984. Sectoral patterns of technical change : towards a taxonomy and a theory. Research Policy 13(6), 343–374.

Peng, S.S. et H.S. Chiang. 1984. Longwall mining. John Wiley and Sons, New York, NY, É.-U.

Perry, A.M., K.J. Araj, W. Fullerson, D.J. Rose, M.M. Miller et R.M. Rotty. 1982. Energy supply and demand implications of CO_2. Energy 7(12), 991–1004.

Piepers, G.G. 1985. Wind energy : Current status and prospects. Dans E. Bilgen et K.G.T. Hollands, éd. Intersol 85 : Résumés des communications : Congrès biennal de la Société internationale d'énergie solaire, ISES, 23–29 juin 1985, Montréal, Québec.

Pimentel, D. 1980. Handbook of energy utilization in agriculture. CRC Press, Boca Raton, Fl.

Pindyck, R.S. 1979. Interfuel substitution and the industrial demand for energy : An international comparison. Review of Economics and Statistics 61(2), 169–179.

_____ 1980. The structure of world energy demand. MIT Press, Cambridge, Mass.

Poersch, W. et G. Zabeschek. 1980. Fluidized combustion of fuels with different ash contents. Dans Fluidized combustion : systems and applications. Graham and Trotman, Londres, R.-U. Institute of Energy Symposium Series no 4, volume III, 1A-4-1–1A-4-9.

Poleman, T.T. et D.K. Freebairn, éd. 1973. Food, population and employment. The impact of the Green Revolution. Praeger, New York, NY, É.-U.

Pollak, R.A. 1985. A transaction cost approach to families and households. Journal of Economic Literature 23(2), 581–608.

Pollak, R.A. and M.L. Wachter. 1975. The relevance of the household production function and its implications for the allocation of time. Journal of Political Economy 83(2), 255–277.

Pollak, R.A. et T.J. Wales. 1978. Estimation of complete demand systems from household budget data : the linear and quadratic expenditure systems. American Economic Review 68, 348–359.

Postel, S. 1984. Air pollution, acid rain, and the future of forests. Worldwatch Paper 58. Worldwatch Institute, Washington, DC, É.-U.

Prado, L.T.S. 1981. A utilização do modelo MEDEE na avaliação da demanda energia no Brasil. Estudos Económicos 11 (numéro especial).

Prasad, K.K. 1983. Woodburning stoves : their technology deployment. ILO Working Paper 115. Technology and Employment Programme, Organisation internationale du travail, Genève.

Price, W.J. et L.W. Bass. 1969. Scientific research and the innovative process. Science 164(3881), 802–6.

Pryor, F.L. 1977. The origin of the economy : a comparative study of distribution in primitive and peasant economies. Academic Press, New York, NY, É.-U.

Québec, ministère de l'Énergie et des Ressources. 1984. L'implantation de MEDEE-3 au Québec : la méthodologie et les résultats. Ministère de l'Énergie et des Ressources, Québec, Canada.

Quraeshi, S., B.M. Pederson et A. Sayigh. 1984. Wind turbine generators : State-of-the-art. Solar and Wind Technology 1(1), 37–48.

Ramanathan, V., R.J. Cicerone, H.B. Singh et J.T. Kiehl. 1985. Trace gas trends and their potential role in climate change. Journal of Geophysical Research 90(D3), 5547–5566.

Ramaswamy, N.S. 1979. The modernization of the bullock-cart system and the management of animal energy resources : Communications de référence en vue d'un exposé livré le 22 janvier 1979 à la 39e Réunion annuelle du Congrès des routes de l'Inde, Bangalore. Institut de gestion de l'Inde, Bangalore.

Ramsay, W. 1979. Unpaid costs of electrical energy : health and environmental impacts from coal and nuclear power. Étude rédigée pour le National Energy Strategies Project of Resources for the Future. John Hopkins University Press, Baltimore, Maryland.

Rand, W.M. et N.S. Scrimshaw. 1984. Protein and energy requirements : insights from long-term studies. Bulletin of the Nutrition Foundation of India 5(4), 1–2.

Ray, R. 1980. Analysis of a time series of household expenditure surveys for India. Review of Economics and Statistics 62(4), 595–602.

Reddy, A.K.N. 1978. Energy options for the Third World — part II. Bulletin of Atomic Scientists. 34, 28–33.

_____ 1982. Rural energy consumption patterns — a field study. Biomass 2, 255–280.

_____ 1985. The energy and economic implications of agricultural technologies : an approach based on the technical options for the operations of crop production. Working Paper 2-22/WP149. Bureau international du travail, Genève.

Reddy, A.K.N et B.S. Reddy. 1983. Energy in a stratified society. Case study of firewood in Bangalore. Economic and Political Weekly 18(41), 1757–1770.

Reed, T.B., éd. 1981. Biomass gasification : principles and technology. Noyes Data Corporation, Park Ridge, N.J.

Robinson, J. 1947. Essays in the theory of employment. 2e édition. Blackwell, Oxford.

Rogers, P. 1983. Irrigation and economic development : some lessons from India. Dans K.C. Nobe et R.K. Sampath, éd. Issues in Third World development. Westview Press, Boulder, Col. 347–373.

Rolz, C., S. de Cabrera, F. Calzada, R. Garcia, R. de Leon, M. del C. Arriola, F. de Micheo et E. Morales. 1983. Concepts on the biotransformation of carbohydrates into fuel ethanol. Dans A. Mizrahi et A.L. Van Wezel, éd. 1983 : Advances in biotechnological processes, volume 1. Alan R. Liss, New York, NY, É.-U. 97–142.

Rosa, R.J. n.d. Discussion of an automative engine designed for the direct use of low-grade fuels. Mechanical Engineering Department, Montana State University, Bozenan, Montana.

Ross, R.J.P. 1984. Petroleum exploration and production in developing countries. Energy Research Group, Ottawa (Ont.), Canada.

Rotty, R.M. 1983. A current view of atmospheric CO_2. Dans P. Auer et D. Douglas, éd. Advances in energy systems and technology, volume 4. Academic Press, New York, NY, É.-U. 1–37.

Rowley, J.C. 1982. Worldwide energy resources : Dans L.M. Edwards, G.V. Chilingar, H.H. Rieke III et W.H. Ferth, éd. 1982. Handbook of Geothermal Energy. Gulf Publishing Company, Houston, Texas. 44–176.

Sahlins, M.C. 1972. Stone age economics. Tavistock, Londres, R.-U.

Saida, T., H. Michiki, H. Miyakawa, K. Matsumara, S. Moriyama et H. Ishibashi. 1985. EtOH production from cellulosics. Dans H. Egnéus et A. Ellegärd, éd. 1985. Bioenergy 84 : Comptes rendus d'un colloque international sur la bioénergie tenu du 15 au 21 juin 1984 au Centre des foires commerciales de Suède, Göteborg, Suède. Volume II : Biomass conversion. Elsevier Applied Science Publishers, Barking, Angleterre. 212–219.

Sarkar, S.K. 1980. Longwall mechanisation in India — Intermediate vs. advanced technology — The unsettled controversy. Séminaire sur les politiques et programmes de l'exploitation minière, Station centrale de recherche sur les mines. Inde, novembre 1980.

Sarkar, S.K., S. Roychowdhury, N. Gautam, R.K. Srivastava, R.D. Biswas et B. Singh. 1983. Some aspects of strata control experiences at the powered support longwall face at Dheno-main colliery. Journal of Mines, Metals and Fuels, novembre, 493–501.

Scharmer, K., K.-H. Brachthäuser, J. Mühlensiep, K. Tambakis et E. Tüttenberg-Winter. 1984. Technischer und wirtschaftlicher Vergleich von kleinen Anlagen zur Vergasung/Verbrennung von Holz und holzähnlichen Biomassen. Gesellschaft für Entwicklungstechnologie mbH, Eschborn.

Schilling, H.D., B. Bonn et U. Krauss. 1981. Coal gasification — Existing processes and new developments. Commission des communautés européennes. Graham and Trotman, Londres, R.-U.

Schnell, R.C. et Gabor Vali. 1976. Biogenic ice nuclei : Part I : terrestrial and marine sources. Journal of Atmospheric Science 33(3), 1554–1564.

Sen, A. 1981. Poverty and famines : an essay on entitlement and deprivation. Clarendon Press, Oxford.

Sener, T. 1977. An international comparison of demand elasticities : empirical analysis of consumption patterns. Studies in Development 15, 124–159.

Sexon, B., G. Slack, P. Musgrove, N. Lipman et P. Dunn. 1981. Aspects of a wind energy conversion system. Dans J. Twidell, éd. Energy for rural island communities. Pergamon Press, Oxford. 153–158.

Shaw, R.W. 1984. Le transport des oxydes d'azote dans l'atmosphère. Service de la protection de l'environnement, Environnement Canada. Rapport EPS2/TS/2. Beauregard Press, Ottawa (Ont.), Canada.

Siddayao, C.M., éd. 1985. Criteria for energy pricing policy. Graham and Trotman, Londres, R.-U.

Siemens, W. Von 1880. Die Elektrizität in Dienste des Lebens. Elektrotechnische Zeitschrift 1(1), 16–23.

Simon, H.A. 1957. Models of man : social and rational. John Wiley and Sons, New York, NY, É.-U.

Singer, S.F. 1983. The world price of oil. Annual Review of Energy 8, 451–508.

———— 1985. Prospects for the world oil market. The Energy Journal 6(1), 13–16.

Smil, V. 1983. Biomass energies : resources, links, constraints. Plenum Press, New York, NY, É.-U.

Smil, V., P. Nachman et T.V. Long II. 1983. Energy analysis and agriculture : An application to U.S. corn production. Westview Press, Boulder, Col.

Smoot, L.D. et S.C. Hill. 1983. Critical requirements in combustion research. Progress in Energy and Combustion Science 9, 77–103.

Spence, M. 1983. Contestable markets and the theory of industry structure : a review article. Journal of Economic Literature 21(3), 981–990.

Srinivasan, S. 1984. Fuel cell power sources for transportation applications : Types, status and needed advances in tehnologies. Dans T.N. Veziroglu et J.B. Taylor, éd. Hydrogen energy progress V : proceedings of the 5th World Hydrogen Energy Conference, Toronto, Canada, 15–20 July 1984. Vol. 4, Pergamon Press, New York, NY, É.-U. 1717–1728.

Stanley, D. 1977. The Arusha windmill : a construction manual. Bénévoles en Asie, à Stanford, en Californie et bénévoles sur le plan de l'aide technique, Mt. Rainier, Maryland.

Stewart, F. 1977. Technology and underdevelopment. Macmillan, Londres, R.-U.

Strout, A.M. 1983. Estimating energy consumption from cross-country relationships. Public Economics Division, Development Research Department, Banque mondiale, Washington.

———— 1985. Energy-intensive materials and the developing countries. Energy Research Group, Ottawa (Ont.), Canada.

Stuckey, D.C. 1983. Technology assessment study of biogas in developing countries. Centre international de référence pour l'élimination des déchets, Duebendorf, Suisse.

Subba Rao, G.V. 1981. Some considerations regarding energy resource development in areas without adequate infrastructure. Dans Institut des Nations Unies pour la formation et la recherche. Long-term energy resources. Pitsman, Boston, Mass.

Subba Rao, S., M. Raizada, S. Iyer et A. Ramanathan. 1981. Determination of energy costs and intensities of goods and services in the Indian economy — An input–output approach. Dans Manas Chatterji, éd. Energy and environment in the developing countries. John Wiley and Sons, Chichester, R.-U. 205–222.

Subramanian, D.K., P. Rajabapaiah et A.K.N. Reddy. 1980. Studies in biogas technology. Part II : optimization of plant dimensions. Dans A.K.N. Reddy, éd., Rural technology. Académie des sciences de l'Inde, Bangalore. 79–90.

Sukhatme, P.V. et S. Margen. 1982. Autoregulatory homeostatic nature of energy balance. American Journal of Clinical Nutrition 35, 355–365.

Surrey, J. et J. Chesshire. 1984. Technology and market structure in equipment for the energy industries : coal, oil and electricity. Energy Research Group, Ottawa (Ont.), Canada.

Szalai, A., P.E. Converce, E.K. Scheuch, P. Feldheim et P.J. Stone. 1972. The use of time. Daily activities of urban and suburban populations in twelve countries. Mouton, La Haye.

Tabor, H. 1981. Solar ponds. Solar Energy 27(3), 181–194.

Tata Energy Research Institute. 1983. Energy conservation bulletin. Tata Energy Research Institute, Bombay, Inde.

Taylor, J.H. 1977. Increasing the efficiency of agricultural traction and transport. Dans W. Lockeretz, éd. Agriculture and energy. Academic Press, New York, NY, É.-U. 223–232.

Taylor, L. 1979. Macroeconomic models for developing countries. McGraw-Hill, New York, NY, É.-U.

Taylor, O.C. 1980. Impact of air pollutants on vegetation. Dans Supporting Paper 8 : energy and the fate of the ecosystems. National Academy Press, Washington, DC, É.-U.

Thomas, R.B. 1973. Human adaptation to a high Andean energy flow system. Department of Anthropology Occasional Papers no 7. Pennsylvania State University, Philadelphia, Penn.

Thomas, T.H. 1981. Rickshaws in Calcutta. Unnayan, Calcutta.

Thomson, M.J. 1983. Toward better urban transport planning in developing countries. World Bank Staff Working Paper no 600. Banque mondiale, Washington, DC, É.-U.

Tinker, I. 1984. The real rural energy crisis : women's time. Energy Research Group, Ottawa (Ont.), Canada.

Tissot, B.P. et D.H. Welte. 1984. Petroleum formation and occurence. 2e édition. Springer Verlag, Berlin.

Todaro, M.P. 1981. Economic development in the Third World. 2e édition. Longman, New York, NY, É.-U.

Tokuyama, F. 1984. Biomass technology survey in Japan. Energy Research Group, Ottawa (Ont.), Canada.

Torres, J.E. 1984. Latin American research and development in the energy field : a review. Energy Research Group Manuscript Report, ERG-MR5e. Energy Research Group, Ottawa (Ont.), Canada.

Tunnah, B.G. 1985. Energy use in industry. Energy Research Group, Ottawa (Ont.), Canada.

Turnham, D. et I. Jaeger. 1970. The employment problem in less developed countries. Organisation de coopération et de développement économiques, Paris.

Turvey, R. et D. Anderson. 1977. Electricity economics. John Hopkins University Press, Baltimore, Maryland.

Umaña, A. 1984. Economics of energy and natural resources : review of an expanding field of transdisciplinary research. Energy Research Group, Ottawa (Ont.), Canada.

United Nations (Nations Unies). 1981. Report of the United Nations conference on new and renewable sources of energy. Conférence des Nations Unies sur les sources d'énergie nouvelles et renouvelables, Nairobi, 10–21 août 1981. Nations Unies, New York, NY, É.-U. Rapport no A/CONF.100/11.

———— 1984. 1982 Yearbook of international trade statistics : volume 1 : trade by country. Nations Unies, New York, NY, É.-U.

United Nations Industrial Development Organization (Organisation des Nations Unies pour le développement industriel). 1985. Use and conservation of energy in the cement industry. Sectoral Working Paper Series no 31, Vienne.

United States of America (États-Unis d'Amérique). 1979. Congressional Office of Technology Assessment. Direct Use of Coal. Report #OTA-E-86. U.S. Governement Printing Office, Washington, DC, É.-U.

United States of America (États-Unis d'Amérique). 1980. Department of Energy. Classification and evaluation of electric motors and pumps. U.S. Government Printing Office, Washington, DC, É.-U.

United States of America (États-Unis d'Amérique). 1984. Report to the Congress of the United States : an analysis of issues concerning "Acid Rain". The Comptroller General, General Accounting Office, Washington, DC, É.-U. GAO/RECED-85-13.

United States of America, Congressional Office of Technology Assessment. 1979. Direct use of coal. U.S. Government Printing Office, Washington, DC, É.-U. Report OTA-E-86.

University of Oklahoma. 1975. Energy alternatives : a comparative analysis. A study of the Science and Public Policy Program. National Technology Information Service, Springfield, Va.

Uri, N.D. 1981. Dimensions of Energy Economics. Jai Press, Greenwich, Conn.

Vali, G., M. Christensen, R.W. Fresh, E.L. Galyan, L.R. Maki et R.C. Schnell. 1976. Biogenic ice nuclei. Part *II* : bacterial source. Journal of Atmospheric Science 33(3), 1565–1570.

Van Meurs, A.P.H. 1981. Modern petroleum economics. Van Meurs and Associates, Ottawa, Ont., Canada.

Vanin, V.R. et G.M. Gil Graça. 1982. Obtenção de coefficientes de intensidade de energia (direta mais indireta) - Brésil 1970. Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo.

Ward, G.M., T.M. Sutherland et J.M. Sutherland. 1980. Animal as an energy source in Third World agriculture. Science 208(4444), 570–574.

Ware, H. 1977. Desertification and population : sub-Saharan Africa. Dans M.N. Glantz, éd. 1977. Desertification : environmental degradation in and around arid lands. Westview Press, Boulder, Col. 165–202.

Weinberg, F. 1975. The first half-million years of combustion research and today's burning problems. Progress in Energy and Combustion Science 1, 17–32.

Weingart, J. 1984. Solar thermal central receiver power generation technology — Prospects for the developing world. Energy Research Group, Ottawa (Ont.), Canada.

Weisskopf, R. 1971. Demand elasticities for a developing country. Dans H.B. Chenery, S. Bowles, W. Falcon, C. Gotsch, D. Kendrick, A. MacEwan, C. Sims et R. Weisskapf, Studies in development planning. Harvard University Press, Cambridge, Mass., 322–358.

Wenman, C.M. 1985. The production and use of fuel alcohol in Zimbabwe. Dans W. Palz, J. Coombs et D.O. Hall, éd. 1985. Energy from biomass : 3rd European Community International Conference on Biomass, Venice, Italy, 1985. Elsevier, Londres, R.-U. 172–177.

Wilson, C.L., éd. 1977. Energy : global prospects 1985–2000. Rapport du Colloque sur les solutions de rechange. McGraw-Hill, New York, NY, É.-U.

Winston, G.C. 1982. The timing of economic activities : firms, households and markets in time-specific analysis. Cambridge University Press, Cambridge, Angleterre.

Wittmus, H., L. Olson et D. Lane. 1975. Energy requirements for conventional versus minimum tillage. Journal of Soil and Water Conservation. 30(2), 72–75.

Wold, H.O.A. 1982. Demand analysis : a study in econometrics. Greenwood, Londres, R.-U.

Woodwell, G.M. 1974. The carbon dioxide question. Dans Scientific American. 197. Energy and environment. W.H. Freeman and Co., San Francisco.

World Bank (Banque mondiale). 1980a. Energy in developing countries. Banque mondiale, Washington, DC, É.-U.

———— 1980b. Alcohol production from biomass in the developing countries. Banque mondiale, Washington, DC, É.-U.

———— 1981. Mobilizing renewable energy technology in developing countries : strengthening local capabilities and research. Banque mondiale, Washington, DC, É.-U.

———— 1982a. Emerging energy and chemical applications of methanol : opportunities for developing countries. Banque mondiale, Washington, DC, É.-U.

———— 1982b. World development report 1982. Oxford University Press, New York, NY, É.-U.

———— 1983a. The energy transition in developing countries. Banque mondiale, Washington, DC, É.-U.

———— 1983b. World development report 1983. Oxford University Press, New York, NY, É.-U.

———— 1984. World development report 1984. Oxford University Press, New York, NY, É.-U.

World Bank and Food and Agriculture Organization (Banque mondiale et Organisation pour l'alimentation et l'agriculture). 1981. Forestry research in developing countries — time for a reappraisal. Paper for the 17th IUFRO Congress, Kyoto, Japon, 6–17 septembre 1981. Banque mondiale, Washington, DC, É.-U. et FAO, Rome.

Yeager, K. 1984. R&D status report : coal combustion system division. EPRI Journal 9(1), 43–48.

Yucel, N.C. [1974]. Toll financing of highways : economic and financial considerations. World Bank Staff Working Paper, no 187. Banque mondiale, Washington, DC, É.-U.

Yulsman, T. 1985. Greenhouse earth revisited. Science Digest 93(4), 28.

Zimmerman, R.E. 1982. Advances in preparation. World Coal 8(6), 69–71.

Annexe 1 : Membres du Groupe de recherche sur l'énergie

M. Ashok V. Desai — Inde
Coordonnateur, Groupe de recherche sur l'énergie, Ottawa, Canada

M. Ashok Desai a été associé pendant de nombreuses années au Conseil national de la recherche économique appliquée à Delhi et en a été le directeur pendant quelque temps. De 1973 à 1976, il est professeur et chef du département d'économique de l'Université de South Pacific après avoir enseigné aux universités d'Oxford, de Bombay et de Delhi. Il possède un doctorat en sciences économiques de l'Université de Cambridge et il a publié un livre et de nombreux articles. Son domaine de spécialisation est l'économie industrielle, plus parti culièrement l'analyse économique du transfert technologique.

Professeur Djibril Fall — Sénégal
Directeur, Centre d'études et de recherches sur les énergies renouvelables et professeur à l'Université de Dakar au Sénégal

Le professeur Fall a reçu un doctorat en physique de l'Université de Toulouse en 1974 et dirige le CERER depuis cette date. Depuis 1976, il est également coordonnateur de projets à l'Institut de technologie nucléaire appliquée. Pendant sept ans, il a agi à titre de conseiller technique au Secrétariat d'État à la recherche scientifique et technique.

Professeur José Goldemberg — Brésil
Recteur, Université de São Paulo, Brésil

Le professeur Goldemberg a enseigné la physique à l'Université de São Paulo, à l'Université de Paris (Orsay) ainsi qu'à l'Université de Toronto. Il a été chef de la Division de physique nucléaire de l'Institut de l'énergie atomique (1971–1972), chef de la Commission de l'énergie dérivée de la biomasse au ministère de l'Agriculture, Brésil (1979) et président de Companhia Energética de São Paulo (1983–1986). Il est l'ancien président de la Société de physique du Brésil; il a publié quatre manuels et de nombreux articles techniques sur la physique nucléaire et sur l'énergie.

M. José Fernando Isaza — Colombie
Président, COLDEACEITES, et expert-conseil, Bogotá, Colombie

Jusqu'à tout récemment, M. Isaza était Ministre des Travaux publics et des Transports de la Colombie. Il a été président de la compagnie pétrolière nationale de Colombie, Ecopetrol (de 1980 à 1982) ainsi que de la Société financière nationale (de 1978 à 1980). Il a été directeur dans de nombreux ministères publics, notamment à la Division de l'énergie du ministère de la Planification nationale. Il a enseigné les sciences économiques à l'Universidad de Los Andes, Bogotá, et a publié un livre et plus de 20 articles.

Professeur Ali Kettani — Maroc
Directeur général, Fondation islamique de la science, de la technologie et du développement, Jeddah, Arabie saoudite

Le professeur Kettani est chargé à l'heure actuelle d'assurer la collaboration entre les 46 États membres de l'Organisation de la conférence islamique et de promouvoir la science et la technologie parmi ceux-ci. À titre de professeur de génie électrique à l'Université du pétrole et des minéraux située à Dhahran, Arabie saoudite (1969–1982), il a conçu et dirigé des travaux de recherche en énergie, plus particulièrement sur les nouvelles sources d'énergie, notamment l'énergie solaire. Le professeur Kettani a présidé de nombreux colloques internationaux et est vice-président de la Coopération méditerranéenne pour l'énergie solaire. Il a signé huit livres et plus de 100 articles techniques.

M. Ho Tak Kim — République de Corée
Professeur agrégé d'économie agricole, Université nationale de Séoul, Suweon, République de Corée

Monsieur Kim a été vice-président de l'Institut de recherche énergétique de Corée de 1979 à 1981. Il est présentement conseiller spécial de la Société de gestion de l'énergie de Corée et membre du Comité de la politique sur l'énergie et les ressources du ministère de l'Énergie de la Corée. Il a publié quatorze articles et rapports de fonds dans le domaine de l'énergie.

Professeur Mohan Munasinghe(président) — Sri Lanka
Conseiller principal en énergie du président de Sri Lanka

Le professeur Munasinghe possède six diplômes en physique, en génie et en économie de l'Université de Cambridge, du Massachusetts Institute of Technology et de l'Université McGill. Il a enseigné dans des universités à Sri Lanka, au Canada et aux États-Unis et a formé plus de 1 000 hauts-fonctionnaires dans le domaine de l'énergie, provenant de 65 pays en développement. Il est chef de la Energy Policy Development Unit (service des politiques énergétiques), Banque mondiale, Washington, D.C. Il a été président du Conseil de la technique informatique et de l'information de Sri Lanka et consultant auprès de nombreux organismes internationaux. Il est l'auteur de 15 livres et de plus de 100 articles techniques et siège au comité de rédaction de plusieurs revues internationales.

M. Fredrick Owino — Kenya
Professeur agrégé de foresterie et doyen de la Faculté de foresterie et des ressources fauniques, Université de Moi, Eldoret, Kenya

M. Owino a reçu son doctorat de génétique forestière du North Carolina State University en 1975 et enseigne depuis ce temps à l'Université de Nairobi. Il est membre du Conseil de rédaction de la revue internationale *Forest Ecology and Management* et membre de la Commission présidentielle permanente sur la préservation du sol et des plantations forestières au Kenya. Il compte quatorze publications à son crédit.

Professeur Amulya Reddy — Inde
Président, Département de gestion industrielle et professeur au Département de chimie inorganique et physique, Institut des sciences de l'Inde, Bangalore, Inde

Le professeur Reddy a été responsable du Centre pour l'application des sciences et de la technologie dans les régions rurales (ASTRA), Institut des sciences de l'Inde, de 1974 à 1983. À de nombreuses occasions, il a été invité au Centre des études environnementales et de l'énergie de l'Université Princeton à titre de scientifique principal de la recherche. Il siège au comité de rédaction de deux revues internationales, *Biomass* et *Current Science* et il a participé aux délibérations du

Groupe de travail de la politique énergétique de la Commission de planification, gouvernement de l'Inde, de 1978 à 1979. Il a rédigé plus de 85 publications.

M. Carlos E. Suarez — Argentine
Président, Instituto de Economía Energética, Río Negro, Argentine

M. Suarez est également vice-président de la Fundación Bariloche à laquelle est associé l'Instituto de Economía Energética. De 1963 à 1967, il a été directeur du Service de la planification de l'énergie de la Commission de planification nationale à Buenos Aires. Il est diplômé en génie chimique de l'Universidad de Littoral.

Professeur Zhu Yajie — Chine
Conseiller principal, Institut du pétrole de la Chine orientale, Beijing, Chine.

Le professeur Zhu est également membre du Scientific Council Academia Sinica et président de la Société de recherche en énergie de la Chine. Il a été professeur à l'Institut du pétrole de Beijing (1952 à 1966) et possède une vaste expérience dans l'architecture des chaudières ainsi que sur les usines d'ammoniac et d'éthylène. Il a publié quatre manuels et de nombreux articles.

Annexe 2 : Auteurs des rapports de synthèse commandés par le Groupe de recherche sur l'énergie

Integrated energy systems for rural development	**Abhat, A.**
Energy conservation in the industrial sector	**Anandalingam, G.**
Electricity's effect on rural life in developing nations	**Barnes, D.**
Information systems for energy planning and management	**Bernardini, O.**
Contribution of renewable energy sources to the solution of energy problems in some countries in Latin America	**Best, G.**
The developing world as a market for power plant technology	**Bharadwaj, T.**
Energy demand analysis in developing countries	**Bhatia, R.**
Energy research programmes in South Asia: a review of past activities and possible research themes	**Bhatia, R.**
Energy and agriculture in developing countries	**Bhatia, R. et R. Sharma**
Energy research and development programmes in India	**Bhushan, B.**
Energy policies and issues in Latin America	**Bianchi, A.**
Energy problems and policies in Central America	**Bogach, V.S.**
Human energetics	**Borrini, G. et S. Margen**
Markets for utility electricity with efficient application	**Brooks, D.**
Biomethanation	**Brown, N. et P. Tata**
Small- and medium-size hydroelectric power plants	**C.I. Power Services Inc.**
Current status and development of solid fuel mining and utilisation technologies in Asia	**Chari, K.S.R.**
Le bois de feu, source d'énergie renouvelable menacée	**De Lepeleire, G.**
Developing country fuel pricing policies — I: a discussion of issues associated with retail pricing policies	**deLucia, R. et M. Lasser**
Developing country fuel pricing policies — II: a discussion of issues associated with wholesale pricing policies	**deLucia, R.**
Rural energy utilization in China	**Deng Keyun et Wu Changlun**
Atoms for peace, atoms for war, atoms for profit	**Desai, N.**
Energy modelling in developing countries	**Devezeaux, J.G.**
Energy consumption patterns and their implications for energy planning	**Dunkerley, J.**
Problèmes politiques et énergetiques au Brésil	**Duquette, M.**
Is there a vicious cycle of low food energy intake and low human work output?	**Edmundson, W.**
The international transmission of economic growth, exhaustible resources and long waves: a review paper	**Elkan, P.G.**
Health and environmental impacts of energy systems	**El-Sayed, H.**
Application of alternative biomass energy technologies in developing countries	**Eusuf, M.**
Application of solar energy technologies in developing countries	**Eusuf, M.**

Petroleum exploration, development and production — **Foster J. et T.C. Foster**
Markets for technology equipment and services — **Foster, J. et L. Jackson**
Oil refining, transport and distribution — **Foster, J. et R. Tragatsch**
Geothermal energy exploration and utilization — **Fridleifsson, I.**
Transportation and energy in developing countries: a survey and discussion of research needs — **Geltner, D.**
Recent advances in solar energy utilization in China — **Gong Bao, Lu Weide et Tian Xiapong**
Energy policy in developing countries — **Gordon, A.**
Sociopolitical issues in rural energy development — **Hayes, P.**
Nuclear electric futures — **Hayes, P.**
Third World island futures — **Hayes, P.**
Human and animal energetics: a review of the role of metabolized energy in traditional agriculture — **Hurst, C.**
Human and animal energy in transition: the changing role of metabolized energy in economic development — **Hurst, C.**
Energy for small-scale engines: a review of potential energy sources — **Hurst, C.**
Oil and gas: exploration and production in developing countries — **Ion, D.C.**
Markets for renewable energy technology in developing countries — **Jhirad, D.**
Utilization of fuelwood and charcoal in East Africa — **Kaale, B.K.**
Energy in West Africa: a literature survey — **Kahane, A. et S. Lwakabamba**
Energy transitions and energy-related R&D needs and priority areas in Korea — **Kim, H.T.**
An overview of R&D in energy resources, uses and technology — **Lamptey, J., M. Moo-Young et H.F. Sullivan**
China's energy economy — **Lan Tianfang, Lu Yingzhong et Mao Yushi**
Modèles de demande d'énergie et modèles globaux — **Lapillonne, B., P. Criqui et J. Girod**
Industrial energy consumption and conservation in China — **Lu Qi et Liu Xueyi**
The development of electric power in China — **Lu Qinkan et Fu Zhesun**
The development of nuclear energy in China — **Lu Yingzhong**
Photovoltaic technology in developing countries — **Luque, A.**
China's transport and its energy use — **Mao Yushi et Hu Guangrong**
Energy-related issues in early economic literature — **Martinez-Alier, J.**
Science and technology of the renewable energy sources in Mexico — **Martinez-Negrete, M.A., F. Cepeda-Flores, J. Cervantes-Servin, O. Masera-Cerutti et O. Miramontes-Vidal**
Solar and wind technologies for developing countries: current status and anticipated developments — **McNelis, B. et P. Fraenkel**
Use of wind for electricity generation in developing countries — **Merriam, M.**
Status assessment of solar photovoltaic technology — **Mintzer, I.**
Alternative fuel — a Brazilian outlook — **Moreira, J.**
Issues in natural gas production and utilization — **Mortimer, G.**
Energy demand management and conservation — **Munasinghe, M.**
A framework for establishing energy research and development (R&D) policies and priorities in a developing country — **Munasinghe, M.**
Current state of biomass energy development and conservation technologies — **Ng'eny-Mengech, A.**

Comparative evaluation of nuclear power in the developing countries **Obermair, G.**
Energy and development in East Africa **O'Keefe, P.**
Trends in forestry/woodfuel resources and utilization **Owino, F.**
Energy problems and policies in developing countries: an analysis and review **Pachauri, R.K. et R. Pachauri**
Electrothermy in Brazil **Pimentel, O.M.**
Energy, urban transport and the city: a narrative of some recent Brazilian experience and its wider implications **Poole, A.**
Petroleum industry in China **Qin Tongluo**
Geothermal energy in China **Ren Xiang, Yang Qilong et Tang Ninghua**
Petroleum exploration and production in developing countries **Ross, R.J.P.**
Biomass potential and conversion in southwest Asia and northern Africa **Sandhu, G.R.**
Energy use in cities of developing countries **Sathaye, J. et S. Meyers**
Optimizing electrical distribution systems **Scott, W.**
Applications of solar thermal technologies **Selçuk, M.K.**
Electric transmission technology **Shah, K.R.**
Asia's adjustments to the changing energy picture: a summary **Siddayao, C.**
Hydroelectricity: evolution and perspectives **Siqueira, G.**
China's energy advances and limitations **Smil, V.**
Traditional fuels and health: social, economic, and technical links **Smith, K. et J. Ramakrishna**
Energy-intensive materials and the developing countries **Strout, A.**
Technology and market structure in equipment for the energy industries: coal, oil and electricity **Surrey, J. et J. Chesshire**
Recent research in electric power pricing and load management **Tabors, R.**
Technology in the petroleum industry **Tanzer Natural Resource Associates**
Domestic energy supply and demand in southwest Asia and northern Africa **Tasdemiroglu, E.**
The real rural energy crisis: women's time **Tinker, I.**
Biomass technology survey in Japan **Tokuyama, F.**
Alternative transport fuels: supply, consumption and conservation **Trindade, S.**
Energy technologies and policies: options for developing countries **Tsuchiya, H.**
Energy use in industry **Tunnah, B.G.**
Economics of energy and natural resources: review of an expanding field of transdisciplinary research **Umaña-Quesada, A.F.**
Solar thermal central receiver power generation technology: prospects for the developing world **Weingart, J.**
Electric power for industrialization in developing countries **Wereko-Brobby, C.**
Notes on the state of the future of energy research in Latin America **Wionczek, M.**
The coal industry in China **Wu Jing**
Biomass utilization in China **Wu Wen**
Energy policy study in China **Zhu Yajie et Wang Qingyi**
The prospects of hydrogen as an energy resource **Zhu Yajie et Wu Zhenxiao**
How small hydro power is helping China's rural electrification programme **Zhu Xiaozhang, Ding Guangquan et E. Chang**

Annexe 3 : Membres du comité de lecture du rapport final du Groupe de recherche sur l'énergie et des rapports spécialement commandés

M. J. Ramon Acosta
Prof. M.A. Adelman
Prof. S.M. Alam
M. A. Tajuddin Ali
Prof. S. Alvarado
M. M.H. Ang
M. E. Ardayfio-Schandorf
M. S. Baldwin
M. F.E. Banks
M. B. Baratz
M. G.H. Barrows
M. S.B. Baruch
Prof. G.H. Beaton
M. R.C. Bending
Prof. J. O'M. Bockris
M[me] S. Bogach
M. R. Boix Amat
M. C. Boonyubol
Prof. D.K. Bose
M. S.K. Bose
M. G. Bouchard
M. H. Broadman
M. D. Brooks
M. N.L. Brown
Prof. E. Campero
M. R. Canales-Ruiz
M. R.K. Cattell
M. M.F. Corrales V.
M. A. Davenport
M. J. Lizardo R.H. de Araujo
M. A. de Oliveira
M. R.J. deLucia
M[me] Deng Keyun
M. R. DiPippo
M. E. Dommen
Prof. J.A. Duffie
M. B. Duhamel
M. J.R. Egan
M. A.-M. E. El-Bassouoni
M. P. Elkan
Prof. B.J. Esposito
M. E. Fein
M. C. Feinstein
M. F. Fesharaki
Prof. G.B. Fettweiss
M. J.L. Fish
Prof. G. Fishelson
M. W. Floor
M. G. Foley
M. I.B. Fridleifsson
M. J.C. Frost
M. P.G. Gibbon
Prof. P.V. Gilli
M. M.L. Gupta
Prof. V. Gupta
Prof. D.O. Hall
Prof. B. Hannon
M. S.D. Hu
M. H. Inhaber
M. M.N. Islam
M. B.C. Jain
M. W.E. James
M. L. Jarass
M. K.G. Jechoutek
M. A. Jelich
Prof. G. Kadekodi
M. A. Kahane
M. W.K.H. Kinzelbach
M. L. Kristoferson
M. G. Leach
M. A. Leslie
M. C.T. Leung
M. C. Lewis
M. R. Lichtman
M. J.W. Lund
M. M.C. Lynch
Prof. S. Margen
M. M. Martinez
M[me] M.K. Mason
M. G. Matricali

M. M.C. Mattos
M. E. McAllister
Prof. G.D. McColl
Prof. R.L. Meier
Prof. R.F. Mikesell
M. M. Moo-Young
M. J.R. Moreira
M. T.K. Moulik
M. P. Moulin
Prof. A. Mustafa
M^me M.S. Mya
M. S.K. Nema
M. K. Newcombe
M. A. Ng'eny-Mengech
Prof. S.R. Nkonoki
Prof. P.R. Odell
Prof. T. Ohta
M. A. Oldfield
M. K. Openshaw
M. R.M. Ornstein
M. C. Ostrovski
M. P.F. Palmedo
M. J. Parikh
M. D.J. Passmore
Prof. R. Passmore
M. J. Pasztor
Prof. A. Pereira
M. R. Peters
M. O.M. Pimentel
M. L. Pinguelli Rosa
M. K. Prasad
M. V. Raghuraman
M. S. Raj
M^me J. Ramakrishna
Prof. R. Ramakumar
Prof. T.V.S. Ramamohan Rao
Prof. K.S. Rao
M. R.S. Rangi
M. S. Reutlinger
Prof. J.M. Rodriguez-Devis
Prof. P. Rogers
M. P. Romagnoli
M. R.M. Rotty
M. B. Salazar A.
M. L.E. Salcedo
M. N.A. Saleh
M. S.K. Sarkar
M. P.S. Satsangi
M. A. Sayigh
M. K. Scharmer
M. L. Schrattenholzer
M^me M. Serrato C.
Prof. R.T. Shand
M. K. Shankar
M. C.M. Siddayao
M. T.A. Siddiqi
Prof. M. Slesser
M. V. Smil
M. K.R. Smith
Prof. A.M. Sohlman
Prof. P.V. Sukhatme
M. P.B. Sukro
Prof. P.D. Sunavala
M. H. Tabor
M. B. Tahmazian
M. T.B. Tang
M. A. Taylor
M. J.B. Taylor
M. E. Tijerina Garza
M. B.S. Tolentino
M. J. Twidell
Prof. Gwo-Hshiung Tzeng
M. J.D. Vasquez
M^me P. Vasudevan
M. E.F.P. Vaz de Campos
M. R.B. Whyte
M. K.R. Williams
M. M.S. Wionczek
M. P.J. Wood
M^me K. Woodard
M. F.D. Yamba
Prof. J. Zapp
M. A.Y. Zarrug

Index des auteurs

Adelman : 13
Advisory Committee on Technology Innovation : 115
Agence internationale de l'énergie : 48, 73, 93, 95, 160, 161
Alam : 84
Alston : 74
Anderson : 163
Apte : 50
Aureille : 118

Backus : 145
Baldwin : 88, 89
Banque asiatique de développement : 41
Banque interaméricaine de développement : 25, 27, 74
Banque mondiale : 6, 37, 73, 100, 102, 108, 109
Barbalho : 48
Barnard : 118
Bass : 28
Baudequin : 117
Baumol : 60
Beale : 91
Behrens : 51
Bellin : 117
Ben Daniel : 88
Bergman : 158, 162
Berndt : 50
Berry : : 66
Bhagavan : 6
Bhatia : 67
Bhushan : 20
Binswanger : 66
Bialy : 80, 132
Bliss : 79, 152
Blitzer : 51
Bockris : 100, 119
Boocock : 54
Borrini : 152
Bos : 68
Boutette : 131
British Mining Consultants : 128
Brooks : 81, 140
Brown : 114
Bruggink : 129
Buchanan : 75
Bullard : 51

Caceres : 131
Campbell : 20
Campos : 119
Canada (Chambre des Communes) : 164
Carlman : 6
Carlstein : 152
Casimir : 28
Casler : 51
Cecelski : 47
Chamberlain : 165, 166
Charney : 158
Chateau : 51
Chesshire : 30, 105, 128
Chili : 48
Choucri : 51
Christensen : 50
Chung : 30
Clifford : 128
Cole : 90
Colitti : 113
Collier : 142
Collins : 137
Commission des communautés européennes : 6, 48, 52
Coombs : 132
Cooper : 7, 25
Costanza : 51
CRDI (Centre de recherches pour le développement international) : 2
Chiang : 125
Cline : 66

David : 88
De Lepeleire : 95
Deaton : 53
de Cabrera : 110
Demos : 54
Deolalikar : 54
Département de l'Énergie des États-Unis : 88
Desai : 30, 53, 83, 133
De Vallée : 113
Doniat : 118
Dorado : 106
Dowdy : 90, 91, 92
Dryden : 93
Duersten : 31
Du Toit : 134
Dumont : 64
Durnin : 152

Eckhaus : 51
Edmonds : 13, 160, 161
Egnéus : 109
El Salvador : 48
Ellegärd : 109
États-Unis d'Amérique : 156, 166

Fein : 119, 120
Fettweis : 127
Foley : 96, 118
Fonds monétaire international : 102
Foster : 106
Fraenkel : 138, 150
Freebairn : 66

Freeman : 14, 27
Fridleifsson : 136

Gaines : 119
Gallagher : 3, 123
Gelin : 119
Geltner : 72, 74
Georgescu-Roegen : 12
Gibbons : 50
Gibson : 129
Glantz : 158
Goblirsch : 93
Gold : 103
Goldberger : 52
Goldemberg : 6, 20, 52, 101, 110, 162
Gordon : 123
Goss : 116, 118
Govinda Raju : 151
Graça : 51
Grainger : 129
Greene : 3, 123
Gregory : 50
Griffin : 50, 94

Häfele : 160, 161
Haines : 164
Halbouty : 103
Hall : 133
Hamakawa : 146
Hansen : 162
Harris : 78
Harte : 164, 166
Hayami : 66
Herendeen : 51
Hignett : 71
Hill : 7, 87
Hossain : 105
Houthakker : 53
Howard : 94
Howes : 53, 82, 133,
Hubbert : 106
Hudson : 50
Hughart : 133, 134
Humphreys : 109
Hurst : 91

Institut pour l'intégration de l'Amérique latine : 25, 26
Instituto de Economía Energética : 48
Instituto de Pesquisas Technológicas : 110
Instituto Nacional de Energía : 52
Intermediate Technology Power Ltd. : 151
Isaza : 137

Jaeger : 152
Jenkins : 110
Jorgenson : 50
Julius : 113

Kahane : 110
Kamien : 28
Karch : 131
Kaupp : 116, 118
Kellog : 157, 158
Kettani : 145
Keynes : 152
Khatib : 144
Klass : 115
Koide : 110
Kristoferson : 148

Ladomatos : 88, 89
Lahiri : 51
Lapillonne : 51
Laslett : 54
Le Houérou : 157
Leach : 49, 53, 64, 80
Leibenstein : 152
Leigland : 54
Li : 119
Lluch : 54
Long : 123
Lovins : 58
Luque : 145

Mack : 54
Mahin : 118
Makhijani : 64
Maly : 89
Manibog : 96
Margen : 152
Martin : 49
Masters : 103
Mathur : 128
Mattos : 119
McCaslin : 104
McNelis : 138, 150
Mead : 128
Médée : 52
Meier, P.M. : 51
Meier, R.L. : 74
Ménard : 35
Mendeleev : 103
Merriam : 147
Meta Systems : 67, 95
Metals Society : 71
Meyers : 125
Moavenzadeh : 72, 74
Moles : 87
Moscoso : 48
Moss : 96
Mubayi : 51
Mudahar : 71
Muellbauer : 53
Müller : 94
Munasinghe : 19, 21, 27, 28, 38, 51, 53, 58, 83, 142, 143, 144
Mwandosya : 6

Narasimha : 151
Natarajan : 80
National Research Council : 116, 159
Nations Unies : 6, 104
Nema : 119
Neto : 52
Newbery : 55
North : 112
Nugteren : 68

Ocampo : 74, 76
Odell : 107
Odum : 78
Ohta : 119

Organisation de coopération et de développement économiques : 32, 75
Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture : 6, 62, 68, 131, 133
Organisation des Nations Unies pour le développement industriel : 71
Organización Latinoamericana de Energía : 48
Ostrovski : 109
Ozatalay : 50

Parra : 105
Passmore : 152
Pathak : 83
Patterson : 94
Pavitt : 28
Perry : 160
Peng : 125
Petit : 119
Piepers : 147
Pimentel : 64
Pindyck : 50
Pinto : 49
Poersch : 94
Poleman : 66
Pollak : 54
Poole : 64
Postel : 166
Prado : 52
Prasad : 96
Price : 28
Pryor : 54

Québec : 52
Quraeshi : 148

Ramanathan : 162
Ramaswamy : 66
Ramsay : 128
Rand : 153
Ray : 154
Reddy : 54, 57, 64, 67, 78, 79, 80, 84
Reed : 109
Reilly : 13, 160, 161
Robinson : 152
Rogers : 67
Rolz : 109
Rosa : 92
Ross : 106
Rotty : 159
Rouget : 118
Rowley : 136
Ruttan : 66

Sahlins : 78
Saida : 109
Sarkar : 128
Schilling : 124
Scharmer : 116, 117
Schneider : 157, 158
Schnell : 158
Schramm : 53
Schwartz : 28
Scott : 144
Scrimshaw : 153
Sen : 79
Sener : 54
Sexon : 148
Shaw : 165
Siddayao : 49
Siemens (Von) : 8
Simon : 54
Singer : 13
Smil : 64, 108, 155
Smil : 64
Smoot : 7, 87
Spence : 60
Srinivasan : 118
Stanley : 151
Stern : 55, 79, 152
Stewart : 25
Strout : 49, 69
Stuckey : 115
Subba Rao : 51, 124
Subramanian : 115
Sukhatme : 152
Surrey : 30, 105, 125, 128
Szalai : 152

Tabor : 147
Talty : 93
Tata Energy Research Institute : 94
Taylor, J.H. : 66
Taylor, L. : 51
Taylor, O.C. : 164
Thomas, R.B. : 152
Thomas, T.H. : 74
Thomson : 74
Tinker : 152
Tinker : 78, 152
Tissot : 113
Todaro : 152
Tokuyama : 110
Torres : 23, 25
Tunnah : 71
Turnham : 152
Turvey : 143

Umaña : 9
Université d'Oklahoma : 94
Université des Nations Unies : 2
Uri : 50

Vali : 158
Van Meurs : 105
Vanin : 51
Veziroglu : 100
Vijverberg : 54

Wachter : 54
Wales : 54
Ward : 66
Ware : 158
Warford : 142
Weinberg : 87
Weingart : 147
Weisskopf : 54
Welte : 113
Wenman : 110
Wilbur : 51
Wilson : 3, 123, 159, 161
Winston : 152
Wittmus : 66

Wold : 53
Wolsky : 119
Wood : 50
Woodwell : 159, 163
Yeager : 94
Yucel : 75
Yulsman : 162
Zabeschek : 94
Zimmerman : 129

Index thématique

abiogénique : 103
acheteur éclairé : 15, 23, 27, 122
acier : 69, 72
administration publique : 17
agriculture : 45, 48, 60, 149, 155, 156, 172
agroforesterie : 80, 131
aide internationale
  organismes : 15, 22, 38
alcool : 22, 25, 32, 39, 107
aliment : 10, 46, 71, 80, 85, 131
alimentaire :
  consommation : 81
  production : 64
  rendement : 61
alimentation : 60, 62, 152
aluminium : 72
analyse coût-bénéfice : 67
analyse d'entrées–sorties : 44, 47, 50
  matrice d'échanges : 50
  matrice technologique : 50
analyse factorielle : 64
anhydride carbonique : 116
anthracite (voir charbon) : 96
appareils de chauffage solaire : 22
  de distillation : 138
  à axe horizontal : 147
  à axe vertical : 147
  ménagers : 46, 81
  utilisateurs d'énergie : 5, 173
apport énergétique indirect : 64
autarcie : 11
autonomie : 11, 147

bagasse : 117
balance des paiements : 3, 9, 14, 17, 68, 109, 117, 121, 123, 172
battage : 66
batteries : 148, 151
besoins essentiels : 17, 55
bilan énergétique : 44, 47, 152
biogaz : 32, 40, 42, 80, 111, 114, 176
biomasse : 42, 60, 83, 95, 96, 97, 103, 108, 109, 112, 114, 116, 117, 123, 130, 132, 154, 156, 162, 166, 173, 174, 176
  humidité : 132
bois : 58, 99, 109, 111, 112, 117, 130, 132
bois de feu : 41, 46, 57, 74, 78, 82, 84, 85, 123
boisés : 28, 79
boissons : 71
butane : 114

capacité technologique : 25, 27, 28, 100
capital : 22, 67, 75, 76, 115, 128, 141, 174, 176
capital humain : 169
cellules à silicium cristallin : 146
  en couche mince : 146
  photovoltaïques : 140
cendre : 129, 132
centrale de production d'énergie : 17, 22, 94, 129, 159
  électrique : 39, 42, 87, 166
    immobilisations : 39
  (petite taille) : 144
  thermiques : 141
  hydro-électriques : 141
charbon : 4, 22, 27, 30, 32, 40, 42, 57, 58, 84, 93, 94, 95, 100, 111, 116, 117, 122, 123, 126, 140, 175
  préparation du : 129
  transport du : 128
charbon de bois : 28, 32, 39, 58, 74, 84, 111, 117, 122, 124, 129, 132, 138, 140, 154, 159, 161, 166, 171, 174, 176
  fonderie : 25
  humidité : 130
  techniques de fabrication du : 131
charbonnage : 176
chaudières : 3, 71, 92, 95, 98, 129, 144, 154, 166, 173
  à lit fluidisé : 86, 94
  conventionnelles : 86, 93
  aquatubulaires : 93
  ignitubulaires (ou à tubes de fumée) : 93
  sectionnelles : 93
chauffage : 130, 172
  domestique : 137
chauffe-eau : 137
chemin de fer (voir aussi intensité capitalistique) : 45, 75, 129
chercheur : 7, 23, 29, 38, 44, 53, 64, 146, 166, 167, 169
chômage : 152, 172
  taux de : 63
ciment : 69, 72
coefficient surface–volume : 96
cogénération : 142
coke (voir charbon) : 58, 116, 117, 124
combustibles ligneux : 32, 40, 44, 49, 54
  gazeux : 5, 67, 74, 88, 99
  liquides : 5, 67, 74, 88, 99
  solides : 5, 67, 108, 122
  variations : 133
concentrateur : 146
conflit d'intérêt : 18
consommateurs–acheteurs : 80
consommateurs–cueilleurs : 78
consommateurs–producteurs : 79

consommation : 112, 172
de bois de feu : 155
contrat : 105, 106, 113
contrôle physique : 21
conversion de l'énergie thermique des océans (CETO) : 9, 41
cornue : 131, 137
coûts marginaux : 58, 107
cueilleur : 46
activité de : 83
cuisinière : 137
solaire : 175
cuisson : 46, 80, 82, 84, 95, 116, 130, 132, 172
culture : 66
vivrière : 110
cycle Rankine : 90

déboisement : 5, 74, 85, 129, 154, 155, 156
délai de gestation : 17, 19
demande : 5
approvisionnement d'une : 143
de consommation : 52
de pointe : 145
dérivée : 81
gestion et analyse de la : 44
globale : 47
industrielle : 52, 156
mesures axées sur la : 54
micro-étude de la : 44
théorie de la : 82
urbaine : 156
densité énergétique : 8, 84, 107, 111, 112, 119, 123, 129, 132, 171
dépendance énergétique : 12
désertification : 5, 154, 155, 157
diesel : 57, 90, 123, 130, 139, 148
diffusion : 29, 34, 72, 83, 131, 135, 173
direction (de l'entreprise) : 28
dispositif énergivore : 8

eau : 68
approvisionnement en : 150
éclairage : 46, 57, 81, 116
économie : 71, 72, 102, 160, 171
d'échelle : 67, 109, 115, 141, 144, 147
économie d'énergie : 3, 5, 22, 39, 45, 47, 52, 68, 86, 173
investissement dans : 71
éducation et promotion : 22
effet de serre : 100, 121, 154, 155, 158
efficacité : 3, 12, 22, 28, 35, 45, 49, 52, 66, 68, 71, 72, 76, 81, 107, 108, 119, 120, 132, 140, 141, 143, 147, 172, 173
électricité : 4, 5, 16, 19, 22, 27, 39, 40, 42, 46, 49, 56, 58, 67, 77, 87, 88, 91, 92, 117, 119, 120, 123, 130, 136, 137, 138, 140, 149, 171, 175
hydro-électrique (voir aussi marché) : 174
nucléaire : 174
secteur de : 39
société : 30
thermique solaire : 147
thermique : 46, 176
transmission et distribution : 32, 144, 145
électrification rurale : 83, 85, 142
électrolyse : 120
emploi : 68
énergétique (intensité) : 68
efficacité : 66, 83, 160
gestion : 21
problèmes : 17
moyens techniques : 22–29
énergie : 49, 66
(importation d') : 17, 101, 102
(production d') : 123
(réglementation, gestion et organisation du secteur) : 140
(système) :
animale : 66, 67
animée : 172
de la biomasse : 40
dendrothermique : 176
éolienne : 5, 41, 67, 147, 150, 174, 176
facteur de production : 69
géothermique : 5, 39, 41, 135, 136, 176
gestion de la demande : 102
humaine : 5, 8, 67, 80, 149, 152, 171
utilisation du temps : 152
hydro-électrique : 4
imposition des sources : 56
mécanique : 67
motrice : 88, 149
nucléaire : 4, 13, 19, 160, 161
renouvelable : 25, 40, 58, 114, 160, 176
secteur de : 2
solaire : 5, 32, 41, 64, 67, 100, 120, 136, 174, 176
thermique : 4, 5, 135
transformation de : 37
vent : 149
vivante : 149
engrais : 45, 46, 60, 64, 66, 68, 118, 154, 165
entraînement à fréquence variable : 86, 89
entreposage (coût) : 111, 112
environnement : 72, 75, 118, 134
dégradation : 119
effets sur : 154
éolien (équipement) : 87
raccordement : 147
équipement : 37, 71, 171
essence : 22, 90, 114
États-nations : 11
éthanol : 40, 99, 107, 108, 109, 174, 176
exploitation : 112
minière : 87
par longues tailles : 122, 128
exploration : 136
pétrolière : 99, 103, 136
exportation : 32, 37

facteur de production (voir aussi énergie) : 69
facteurs de production non évalués : 64
substitution parmi les : 50, 64
mobiles : 64
indirects : 66
femme : 59, 78, 82, 133
financement (voir aussi recherche) : 26, 78, 167
de programme : 35
de projet : 35, 169

fonderie (voir aussi charbon de bois) : 25
forage : 104
force motrice : 5
foresterie : 133
forêt : 41, 95, 122
fourneau : 116, 130
fourrage : 60, 115
fours : 122, 129, 130, 131
foyers améliorés : 84
gaz : 4, 32, 42, 49, 57, 95, 96, 119, 132, 159, 171
gaz carbonique : 64, 103, 118, 154, 158, 160
gaz de gazogène : 111, 116, 117, 118, 123, 176
  débouchés : 116
  investir : 116
gaz naturel : 22, 40, 108, 109, 111, 112, 114, 119, 142, 161, 174, 175
gazéification : 114, 115, 123
gazoduc : 113, 116
génératrices à piles : 118
géothermique : 32
gestation (intervalle de) : 171
gestion (voir aussi énergie, recherche, ressource) : 37, 72, 74, 75, 122, 128
goudrons : 131
gouvernements : 15
Groupe de recherche sur l'énergie (mandat) : 1
  hypothèses normatives : 6, 9
  incertitudes 12
  points de départ : 7
houille tendre (voir charbon) : 124
huile végétale : 40
hydraulique : 86, 89
  (conversion à un entraînement) : 88
hydro-électricité : 32, 114, 121, 161, 171
hydrogène : 13, 91, 100, 111, 118
  transport : 120
  vecteur énergétique : 120
Hotelling (principe de) : 9
importations (voir énergie) : 17
impôt : 72, 75
industrie : 40, 48, 68, 90, 149, 155, 172
industrie de l'électricité : 118
industrie énergivore : 45, 69
inégalités : 10, 38
inégalités économiques : 10
infrastructures : 61
  rurale : 61
  technologique : 25
  urbaine : 61
innovation : 15, 27, 28, 29
  mise de fonds : 29
  technologique : 25
intensité capitalistique : 43, 45, 59
  énergétique (voir aussi P.I.B.) : 51, 69, 100, 152
investissement (voir aussi économies d'énergie) : 17, 38, 71, 75, 113, 114, 137, 141, 143, 147, 150
irrigation : 64, 66
  (échelle optimum) : 67
  (pompe) : 22, 57, 88
isolation : 71, 135
informatique : 37
  conservation de la chaleur : 135

kérosène : 49, 51, 81, 96, 116, 130, 132, 138

labour : 68
lignite : 40, 117, 126

magnétohydrodynamique (MHD) : 124
main-d'oeuvre : 35, 41, 63, 64, 82, 96, 115, 117, 118, 122, 128, 131, 133, 151
  effectif : 28
  formation : 23, 41, 118
  macro-économie : 41
marché : 9, 14, 27, 28, 29, 30, 45, 56, 58, 59, 67, 84, 99, 105, 108, 111, 113, 119, 120, 124, 130, 131, 138, 174, 175
  de la technique : 67
  des sociétés d'électricité : 30
  financier : 142
  gazier : 30
  pétrolifère : 30
matériel : 68, 86, 117, 144, 173
  (entretien) : 128
  (fabricants) : 30, 42, 118, 122, 128, 146
  de stockage : 69
  énergétique : 42, 87
  mécanique : 30
  minier : 129
matières incombustibles : 132
matières premières : 110
mazout : 95, 137, 140, 148
mécanisation : 66, 67, 128
ménages : 46, 48, 54, 78
  urbains : 83
  ruraux : 82
méthane (ou méthanol) : 99, 103, 107, 112, 114, 116, 117, 118, 119, 162
migration campagne-ville : 61
mines : 155
minoterie : 149
modèle : 20, 47, 48, 51, 52, 54, 64, 81, 83, 143, 152, 165, 172
  technique : 44
monopole : 18, 59, 72, 142
moteurs : 3, 71, 86, 108, 119, 173
  à combution externe : 89, 91, 92
  à combustion interne : 68, 72, 86, 88, 89, 91, 92, 117, 122, 123
  polluants : 89
  à courant continu : 88
  à cycle Brayton : 86, 92
  à réaction : 9
  électriques : 88
  Otto : 90, 116
  Sterling : 91
mouture : 66

nucléaire : 32, 136

octane : 107, 108
oligopole : 40, 105
ordre économique mondial : 11
oxyde d'azote : 154, 164
  de carbone : 116

pauvreté : 10, 55, 56
pays en développement importateurs de pétrole : 20, 106
pays producteurs : 105
pesticide : 45, 46, 64, 66, 68
petite industrie : 137
pétrole : 4, 16, 17, 27 32, 40, 42, 56, 58, 63, 74, 77, 84, 87, 93, 94, 100, 101, 108, 111, 112, 114, 117, 119, 122, 138, 146, 159, 161, 171, 174, 175
(coke de) : 130
(crise du) : 99, 100
(dépendance à l'égard du) : 100
(exploration) : 103
méthodes coûteuses de raffinage : 123
techniques d'exploration : 103
(exportateur de) : 101
(gaz de pétrole liquéfié GPL) : 130
(marché) : 106
(mise en valeur) : 103
(pays exportateurs) : 103
(raffinage) : 130
(réserves mondiales) : 103
(réserves) : 109, 159
photovoltaïque (voir cellules) : 28, 138
dispositifs photovoltaïques : 175
perspectives de progrès : 146
piles : 120
pipeline : 129
planificateur : 20, 72
planification : 72, 74, 75
plans : 20
plantations énergétiques : 131
forestières : 171
pluies acides : 12, 101, 121, 154, 155, 163
poêle : 166, 173, 175
à bois : 22, 28, 82
à combustion liquide : 96
à combustion solide : 95
de cuisson : 86
débouchés : 97
rendements : 175-176
politique : 67, 71, 76, 85, 144
contexte politique : 105
d'investissement : 22
énergétique : 18
liberté de manoeuvre : 24
risques : 106
macro-économique : 162
pollution (voir aussi moteurs à combustion interne) : 12, 58, 129, 138
de l'environnement : 136
mesures de lutte : 156
véhicules : 164
pompage : 66
pompe : 91, 116, 138
d'approvisionnement en eau : 150
d'irrigation : 150
éolienne : 149, 176
pouvoirs publics : 41
prêts : 39
bilatéraux bonifiés : 39
bonifiés et autres : 39
prêts multilatéraux : 39
prévision : 48, 51, 77
de base : 2
de la demande : 141
globales : 159
mondiales en matière d'énergie : 20
prix : 80, 141
d'achat : 81
du pétrole : 13, 17, 20, 66, 76, 99, 100, 106, 117, 118, 122, 123
établissement des prix : 58
procédé :
amélioration : 110
EX-FERM : 110
producteurs : 25, 46, 171
(petits) : 28
production d'énergie (voir aussi centrale) : 39
produits pétroliers : 172
volatiles : 132
propane : 114, 119
produit inférieur brut (P.I.B.) (voir intensité énergétique) :
qualification : 128
questions environnementales : 5
rapport surface/volume : 130, 132
réchauffement du globe : 5
recherche : 15, 165, 166, 167,
à caractère politique : 41
aide financière : 23-35
capacité de : 5, 12
centre de : 23
communication : 37
conditions extérieures : 27
(directeur) : 169
dissension : 24
(équipe de) : 87
établissements : 7, 15, 23, 26, 29, 33, 34, 87, 168, 171
fonds : 7
(gestion de la) : 36
installations : 169
moyens d'intervention : 167
priorité : 8, 23, 171
prise de décision : 7, 168
tâche : 15
et développement : 13, 15, 25, 26, 27, 29, 89, 92, 94, 117, 119, 145
et formation : 37
et politique : 22
(orientation de la) : 36
réglementation : 18
rendement : 80, 152, 176
réseau électrifié : 74
ferroviaire : 74, 77
photovoltaïque actuel : 145
photovoltaïque solaire : 145
résidus animaux (lisier) : 83, 95, 112, 134
de cultures : 83, 95, 132, 134
ressources : 174, 175
d'exploitation coûteuse : 176
épuisables : 9, 12
gestion des : 17
renouvelables : 9, 12

revenus : 11, 14, 56, 62, 80
route : 45, 72, 75, 76
schiste (huile) : 22
schlamm : 129
séchage : 66
séchoir : 137
  solaire : 66, 138, 175
sidérurgie : 116, 119
socio-économique : 173
social : 75
  pressions : 141
  limites socio-politiques : 143
solaire (équipement) : 87
  (technologie) : 42
souveraineté nationale : 12
stockage : 41, 120, 145, 176
subventions : 12, 22, 29, 44, 55, 68, 75, 80, 85, 110
substitution à l'importation : 17
substitutions interénergétiques : 14, 20, 47, 51, 52, 58, 64, 67, 68, 85, 107, 171, 172
suralimentation : 90
tarification :
  au coût moyen : 45, 58, 59, 67
  au prix de référence : 108, 109
  au prix marginal à long terme : 59
taxation : 85
taxe : 22, 44, 80
  directes et indirectes : 55
  remboursement de : 81
technique : 122, 175
  approche : 51
technologie : 34, 42, 72, 111
  appropriées : 67
  de production : 25, 116
  changements technologiques : 27, 28
  économisatrice d'énergie : 51
télécommunication : 142, 145
textile : 71
tourbe : 40, 117
tracteur : 66
traction animale : 74
traction humaine : 74
transfert de la technologie : 11, 151
transport : 40, 45, 46, 48, 68, 72, 74, 108, 111, 112, 119, 149, 155, 172, 173
  (coût) : 112, 123
  (intensité) : 73, 76
  (place) : 72
  ferroviaire : 121
  maritime : 88
  routier : 72, 74, 77, 82, 108
travail : 10, 12, 54, 80, 172
travailleur : 46, 61, 62, 84, 149, 152 (voir main-d'oeuvre)
turbines : 9, 94, 124, 144
turbines à gaz : 86
usines thermiques : 28
  (accroissement de l'utilisation de la capacité) : 110
utilisateurs éclairés : 168
  (formation) : 168
urbain : (voir aussi migration)
  agglomérations : 122, 123