

REVUE DE

L'ÉNERGIE

Jérémie et Noé Deux scénarios énergétiques mondiaux à long terme

par

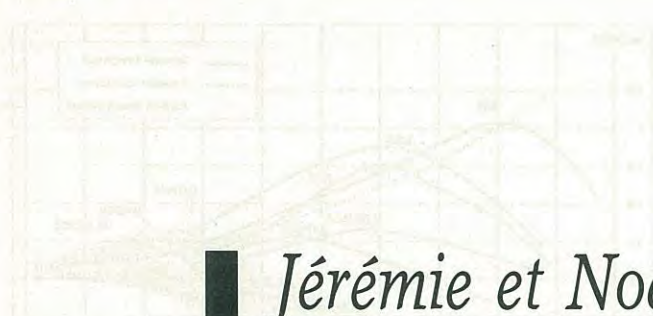
Benjamin DESSUS

Chargé de mission au PIRSEM, Centre National de la Recherche Scientifique

et

François PHARABOD

Chargé de mission au CPE, Ministère de la Recherche et de la Technologie



Jérémie et Noé Deux scénarios énergétiques mondiaux à long terme

par Benjamin DESSUS

Chargé de mission au PIRSEM*, Centre National de la Recherche Scientifique

François PHARABOD

Chargé de mission au CPE**, Ministère de la Recherche et de la Technologie

"Que vois-tu ? dit le Seigneur. Je vois, dit Jérémie, une chaudière bouillante dont la vapeur s'échappe du côté opposé au Nord. Et le Seigneur lui dit : C'est du Nord que va se déverser le malheur". Jérémie 1.2.

L'aube des années 1990 est propice aux rumeurs millénaristes ; parmi de nombreuses inquiétudes, l'épuisement des ressources naturelles, la généralisation de la pollution à la surface de la terre, la montée des eaux, l'engloutissement de nouvelles atlantides, la révolution climatique, occupent une place de choix.

Le développement espéré d'un Tiers Monde à la démographie encore longtemps galopante, les risques engendrés par une éventuelle dissémination de l'énergie nucléaire à l'ensemble des régions du

globe, les conséquences probables de l'augmentation de l'effet de serre dû aux émissions de gaz d'origine anthropique, autant de perspectives qui conduisent à se poser aujourd'hui trois questions pour le siècle prochain :

— Risquons-nous, à cet horizon, de manquer d'énergie ?

— Ne risquons-nous pas, pour éviter une éventuelle pénurie d'énergie, de tomber de Charybde en Scylla en adoptant des modes de production dangereux pour la nature et l'humanité ?

— Le développement des pays neufs ne risque-t-il pas de déséquilibrer totalement la planète, du point de vue énergétique et écologique ?

Tenter d'apporter quelque éclairage sur ces questions redoutables peut être considéré comme totalement irréaliste. L'incapacité dans laquelle nous sommes de prévoir correctement à dix ans dans le domaine économique et l'imprévisibilité des découvertes scientifiques et techniques viennent à l'appui d'une telle critique.

Pourtant la prospective relève d'un autre mode de pensée. La description de scénarios diversifiés et contrastés à un horizon quelconque, n'a pas pour but de dessiner les contours d'un avenir prévisi-

* B. Dessus, Centre National de la Recherche Scientifique/Programme Interdisciplinaire de Recherche sur les Sciences pour l'Énergie et les Matières Premières - 4 rue Las Cases 75007 Paris.

** F. Pharabod, Ministère de la Recherche et de la Technologie/Centre de Prospective et d'Études - 1 rue Descartes 75005 Paris.

ble et de préciser le degré de certitude qu'on peut affecter à cet avenir mais bien plus d'en faire ressortir les déséquilibres et les points de rupture principaux. Dès lors, l'horizon temporel auquel on se place, dégagé des impératifs de la prévision, peut se justifier par des critères autonomes.

C'est dans cet esprit que les participants au séminaire « Prospective des déséquilibres mondiaux » (1) ont retenu pour l'ensemble de leurs travaux l'horizon 2100. C'est en effet l'époque à laquelle les experts s'accordent à penser que la population mondiale se stabilisera à une valeur de l'ordre de 11 milliards d'habitants (2). Cette échéance et l'évolution régionale de la population mondiale ont servi de base à la prospective énergétique qui fait l'objet de cet article.

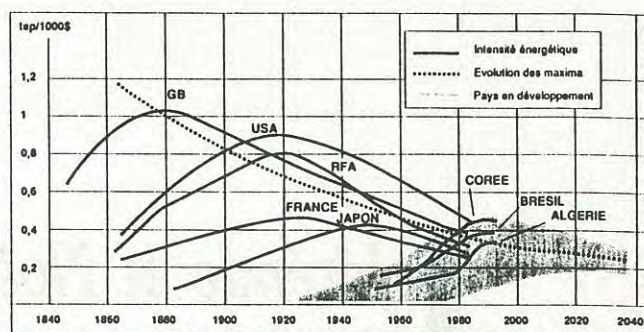
Les hypothèses technologiques

Avant de définir plus précisément la méthodologie et les hypothèses principales d'élaboration des scénarios proposés, il convient de donner quelques précisions sur l'évolution de l'environnement scientifique et technologique dans lequel nous les avons placés.

Sans entrer dans une discussion approfondie (3) des évolutions technologiques potentielles dans le domaine de l'offre énergétique mais aussi dans celui de son utilisation finale au vingt et unième siècle, nous voudrions souligner les quelques points suivants :

— Les potentialités d'amélioration continue de l'efficacité énergétique, non seulement dans les pays déjà industrialisés mais aussi et peut être surtout dans les pays du Sud actuellement en développement. L'histoire des pays industrialisés et aussi plus récemment celle de certains pays en voie d'industrialisation rapide montrent que productivité et réduction des consommations énergétiques, loin d'être antinomiques comme on le pense parfois, sont deux éléments d'un même progrès. La figure 1 en est l'illustration : elle représente l'évolution des intensités énergétiques du PIB (4) de dif-

Fig. 1 - Intensité énergétique et développement



férents pays au cours de leur développement. Chacun des pays cités, après une croissance initiale de son intensité énergétique liée à la mise en place d'infrastructures lourdes atteint un palier puis amorce une décroissance de son intensité énergétique. Ces paliers successifs se placent eux-mêmes sur une courbe décroissante (1,1 tep/1000 \$ en 1870 pour le Royaume Uni, 0,9 pour les USA en 1920, 0,4 pour le Japon en 1960, 0,3 pour le Brésil en 1985). Ce phénomène s'explique en grande part par le fait que le développement industriel d'un nouveau pays s'effectue avec un lot de technologies beaucoup plus efficaces que celles qui ont permis l'industrialisation des plus anciens. Les évolutions technologiques que l'on peut dès maintenant anticiper pour le début du siècle prochain vont toutes dans le même sens d'une gestion plus rigoureuse des flux d'énergie et de matières premières.

La pénétration du progrès technologique dans les pays du Sud aura d'autant plus de conséquences que ces pays ont une croissance rapide. Alors qu'en France par exemple la pénétration de technologies efficaces en énergie dépend tout d'abord de la rénovation ou du renouvellement des équipements existants, dans les pays en voie d'industrialisation, ce sont les équipements neufs constituant des capacités nouvelles qui sont l'enjeu principal de la pénétration de ces technologies.

— La tendance à la diversification des productions énergétiques dans deux directions :

D'abord la production simultanée de plusieurs biens énergétiques. L'exemple le plus typique de cette tendance est celui de la cogénération dont le développement est actuellement très rapide aux États-Unis et en Europe (à l'exception de la France). Dans ce cas, à partir d'un combustible unique, charbon ou gaz par exemple, on fournit à travers une unité de transformation plusieurs vecteurs énergétiques, par exemple de la chaleur et de l'électricité. L'intérêt d'une telle démarche est que le rendement de l'opération est considérablement augmenté (de 40 % en électricité à 80 % en cogénération chaleur électricité).

(1) Ministère de la Recherche et de la Technologie, 1989. (Actes du séminaire à paraître aux éditions de l'ORSTOM).

(2) Population Bulletin of the United Nations, n°14, 1982.

(3) B. Dessus, Energie-Développement-Environnement, un enjeu planétaire au 21^e siècle, Revue de l'énergie n° 415, nov. 1989.

(4) Intensité énergétique du PIB : Quantité d'énergie en tonne d'équivalent pétrole (tep) nécessaire pour obtenir une unité (1000 \$) de produit intérieur brut. Voir J.M. Martin, L'intensité énergétique de l'activité économique dans les pays industrialisés, Economie et Société. n°41, 1988.

Ensuite la diversification de la nature et de la qualité des sources d'approvisionnement primaire utilisées pour obtenir une énergie finale donnée : production d'électricité à partir du bois, des déchets, du soleil, du vent, fabrication de carburants à partir de biomasse, de charbon, de gaz naturel, d'électricité...

Dans ce contexte de diversification, les énergies renouvelables (soleil, hydraulique, vent, biomasse) représentent un potentiel important. Les études réalisées sur les réserves réellement mobilisables de chacune de ces énergies dans les différentes régions du monde (5) ont servi de base à l'estimation des possibilités de pénétration à terme de ces énergies dans les bilans régionaux.

Au cours des années 70 ces énergies ont fait l'objet de recherches et de développements qui ont conduit dans la plupart des cas à des démonstrations de faisabilité technique et économique en vraie grandeur. Le potentiel de ces énergies est considérable puisque les réserves effectivement mobilisables sont de l'ordre de cinq milliards de tep dont 80 % dans les pays du Sud, sans exploitation systématique à des fins énergétiques des zones inhabitées comme le Sahara ou le Groënland.

— L'apparition de nouveaux vecteurs énergétiques. On pense là en particulier à l'hydrogène fabriqué à partir d'électricité (nucléaire, solaire ou hydraulique) et aux carburants de substitution issus de la biomasse. Dans les deux cas il s'agit tout d'abord d'apporter des solutions nouvelles aux problèmes des transports dont on connaît la très forte croissance mondiale et qui restent encore prisonniers du seul pétrole. Les perspectives technologiques sont encourageantes. En ce qui concerne l'hydrogène, deux voies d'utilisation dans les transports se dégagent, la substitution aux carburants pétroliers dans les moteurs à explosion, actuellement en démonstration (6), et l'utilisation éventuelle de moteurs électriques alimentés par des piles à combustibles. Les carburants issus de la biomasse, quant à eux, sont déjà utilisés à grande échelle dans des pays comme le Brésil, ou comme additif dans de nombreux autres pays. L'un des enjeux technologiques majeurs du 21^e siècle réside dans la transformation biotechnologique de la lignocellulose et donc du bois en sucres directement transformables en alcools carburants.

Enfin nous avons pris le parti de considérer que quatre domaines de recherche encore très prospectifs n'auraient pas d'impact majeur en termes quantitatifs avant la fin du siècle prochain. Il s'agit :

— De la fusion thermonucléaire contrôlée dont les échéances de démonstration de faisabilité s'éloignent chaque année. Il nous a semblé en effet que même dans l'hypothèse relativement favorable d'une démonstration de faisabilité en laboratoire dans les premières décennies du 21^e siècle, le délai de mise en place d'une filière industrielle et les aléas liés à l'environnement repoussaient à la fin du siècle un impact significatif de cette filière dans le bilan énergétique mondial.

— Des satellites solaires de grande taille (plusieurs km²) placés en orbite géostationnaire qui transmettent l'énergie électrique sur la terre par microondes. On bénéficie alors d'un ensoleillement annuel 4 à 5 fois plus élevé qu'à terre. Si cette filière ne présente pas a priori d'impossibilité de nature scientifique, les problèmes économiques (prix de la mise en orbite des matériaux nécessaires) et peut-être plus encore écologiques (pollution de la très haute atmosphère par les gaz d'échappements des lanceurs) sont très loin d'avoir reçu des solutions. C'est pourquoi il n'est guère envisagé d'emploi de ces satellites avant la fin du siècle prochain.

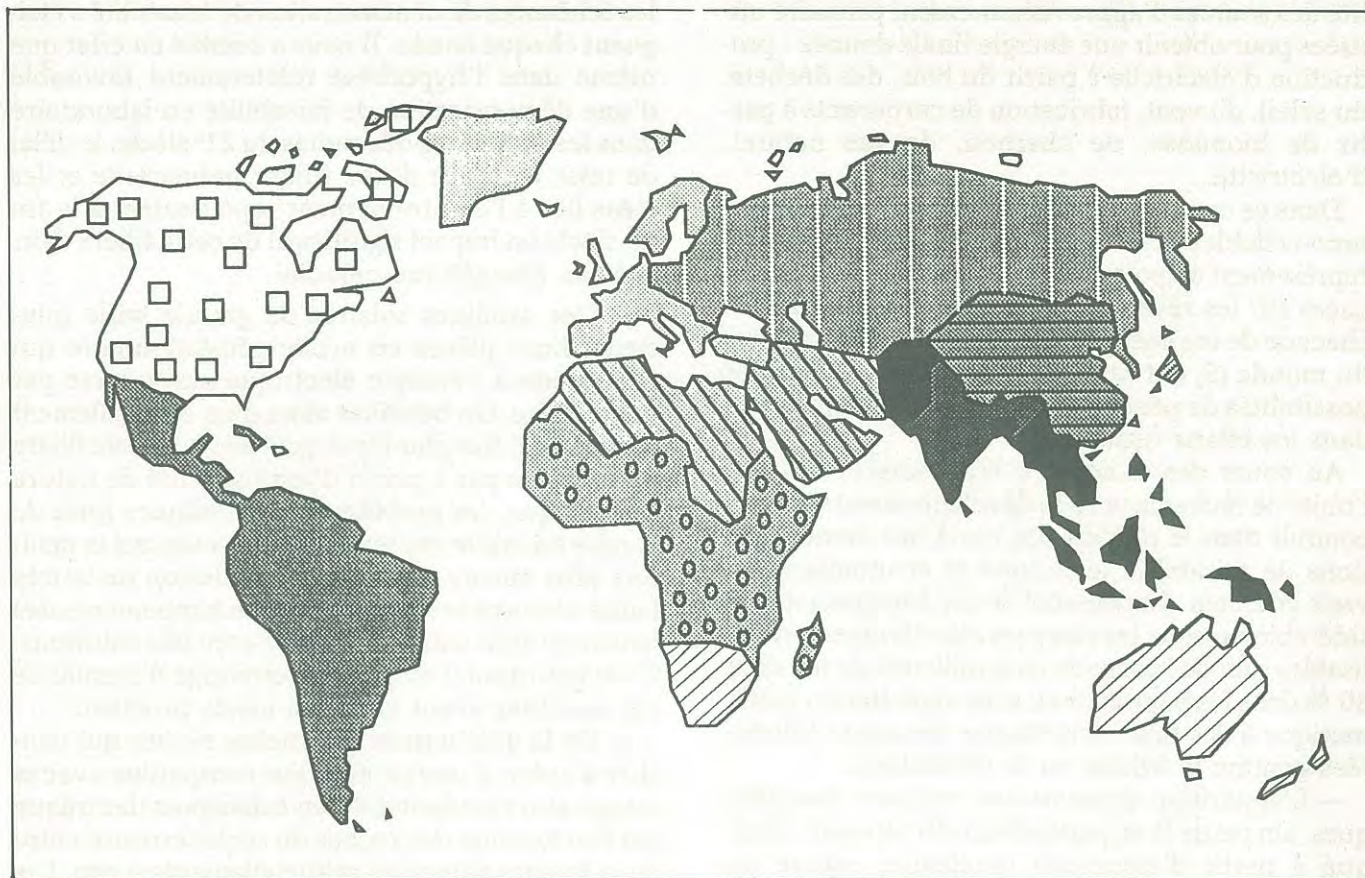
— De la géothermie des roches sèches qui consiste à créer, à une profondeur compatible avec la température souhaitable, un échangeur thermique par fracturation des roches du socle terrestre entre deux forages alimentés artificiellement en eau. Les rapides progrès des techniques de forage à grande profondeur permettent d'envisager à long terme le recours à ce type de géothermie. Mais compte-tenu des incertitudes techniques et du fait que les premières réalisations auront lieu dans des zones privilégiées (à fort gradient de température), on n'imagine pas non plus une forte contribution de cette filière au bilan mondial au cours du vingt-et-unième siècle.

— Enfin nous n'avons pas tenu compte de l'émergence éventuelle de techniques efficaces d'élimination du gaz carbonique produit par les combustibles fossiles, qui seraient de nature à relancer une exploitation massive des gisements de charbon. Ces techniques sont aujourd'hui dans une phase initiale d'étude. Parmi les solutions envisageables, la combustion du charbon sous oxygène en circuit fermé permettrait d'obtenir des fumées à haut contenu en gaz carbonique. Reste à régler le problème du stockage de ce gaz carbonique soit dans des couches géologiques terrestres soit au fond des océans avec tous les problèmes d'environnement à long terme que cela risque de poser. De même nous n'avons pas pris en compte l'émergence éventuelle de techniques de décontamination permettant d'éliminer les produits radioactifs à longue durée de vie contenus dans les déchets des centrales nucléaires, ou de mise au point de filières nouvelles qui ne conduisent à aucun cumul de déchets à longue durée de vie et à haute activité.

(5) B. Dessus, Les promesses des énergies renouvelables, La Recherche n° 214, octobre 1989.

(6) Chez BMW, Peugeot, Mercedes.

Fig. 2 - Le monde en 10 grandes régions



Dans l'ensemble on voit que les hypothèses d'évolution technologique que nous avons retenues sont volontairement assez conservatrices. Bien entendu, l'apparition plus tôt que prévu de nouvelles techniques ou de nouvelles filières peut contribuer de façon significative à desserrer les contraintes des scénarios que nous présentons ci-dessous.

Le scénario Jérémie

Jeu des Energies Renouvelables Et Maîtrise Intensive de l'Énergie.

Le scénario Jérémie (7) résulte d'une approche prospective globale et régionalisée, par avis d'experts, par opposition à une approche analytique par modélisation lourde (type Médée) (8). L'approche est globale en ce qu'elle s'intéresse aux bilans en consommation d'énergie primaire et n'analyse pas explicitement les consommations

finales par usage. Elle est régionale car elle s'appuie sur un découpage du monde en dix grandes régions, 4 pour le Nord, 6 pour le Sud, regroupant des pays de caractéristiques voisines (fig. 2). Ce découpage résulte de l'analyse de la situation énergétique mondiale présentée dans l'Atlas Mondial de l'Énergie (9).

Les hypothèses d'encadrement sont établies en termes physiques de préférence à des hypothèses économétriques de type taux de croissance économique et prix du pétrole qui semblent moins pertinentes à très long terme.

Le jeu d'hypothèses d'encadrement retenu concerne :

— l'évolution de la démographie par région jusqu'en 2100 suivant les estimations ONU (2), déterminant externe principal de la demande (tableau I) ;

— l'estimation des ressources fossiles et renouvelables telles que publiées par la Conférence Mondiale de l'Énergie (10), complétées pour les énergies renouvelables par nos analyses citées précédemment (5), conditionnant l'offre. Au titre des

(7) Par référence à un prophète mal compris de ses contemporains.

(8) J.R. Frisch, Evolution des méthodes de la prospective énergétique, Bulletin IEFP n°4, 1989.

(9) F. Pharabod, Atlas Mondial de l'Énergie/World Energy Atlas, éditions Aditech, 1989.

(10) World Energy Conference, 1989 Survey of Energy Resources.

TABLEAU 1 : Evolution de la population mondiale

POPULATION (millions)	1960	1985	2020	2060	2100
AMERIQUE DU NORD	200	265	330	380	400
EUROPE	360	430	450	450	450
JAPON. AUSTR. NOUV.ZEL	125	170	230	240	250
URSS. EUROPE CENTRALE	310	390	490	530	550
TOTAL PAYS DU NORD	995	1255	1500	1600	1650
AMERIQUE LATINE	215	410	710	1100	1250
AFRI.NORD MOYEN ORIENT	145	230	580	800	900
AFRIQUE	195	390	1140	1700	2000
INDE	420	760	1310	1700	1800
CHINE	660	1040	1360	1600	1600
ASIE OCEANIE	390	760	1400	1700	1800
TOTAL PAYS DU SUD	2025	3590	6500	8600	9350
TOTAL MONDE	3020	4845	8000	10200	11000

(source ONU)

énergies renouvelables, nous avons tenu compte d'une valorisation énergétique des déchets à hauteur de 0,03 tep par habitant à l'horizon 2100 ;

— la liaison forte du système énergétique avec l'environnement pouvant créer des contraintes externes sur la structure des approvisionnements énergétiques mondiaux.

Toute démarche prospective s'appuie sur une analyse de la situation actuelle et de sa dynamique récente. Pour cette analyse nous utilisons la base de donnée Enerdata (11) complétée par les données ONU, Banque Mondiale et CEPII pour les indicateurs non énergétiques (population, développement économique, modes de vie...). Les bilans énergétiques Enerdata établis par pays ou par regroupement de pays donnent en effet depuis 1960 pour chaque type d'énergie les consommations primaires et les consommations finales et pour certains pays leur ventilation par secteur et sous secteur d'activité. Le tableau II indique la structure des approvisionnements énergétiques mondiaux en 1960 et 1985. Les dynamiques sont analysées en fonction du contexte économique général en distinguant les évolutions 1960-1973, 1973-1985 et 1985-1989.

Le scénario Jérémie s'appuie de façon volontariste sur un effort soutenu de maîtrise de l'énergie et sur la diversification des sources énergétiques, avec en particulier un accent mis sur l'emploi des énergies renouvelables, en relais aux énergies fossiles. En effet l'extrapolation des tendances naturelles conduirait dès 2020 à des consommations d'énergies fossiles de l'ordre de 9000 Mtep (50 % de plus qu'en 1985) avec les conséquences que cela suppose en terme d'effet de serre et d'épuisement des réserves.

La première partie du raisonnement prospectif consiste alors à estimer l'évolution de la demande d'énergie dans chacune des dix régions retenues. J. Goldemberg, T. Johansson, A. Reddy et R. Williams ont montré (12) comment l'évolution technologique et la généralisation de dispositifs énergétiques efficaces pouvaient permettre de réduire de moitié la consommation par habitant des pays du Nord. Leur analyse montre également comment les pays du Sud peuvent parvenir à un développement durable donnant accès à des conditions de vie satisfaisantes sans que leurs besoins énergétiques s'accroissent démesurément au delà de leurs possibilités d'équipement et de financement.

(11) IEPE, Energie Internationale 1989-1990, Rapport annuel sur les évolutions énergétiques mondiales, Economica 1989.

(12) J. Goldemberg et Al., Energy for a Sustainable World, Wiley Eastern, 1988.

TABLEAU 2 : Approvisionnements énergétiques
1960

ENERGIE PRIMAIRE (Mtep)	CHARBON	PETROLE	GAZ	NUCLEAIRE	HYDRAUL.	BIOMASSE DECHETS	GEOETHER.	SOLAIRE EOLIEN	TOTAL	CONSUM. PAR HAB. (tep)
AMERIQUE DU NORD	270	500	300	0	70	50	1	0	1191	6,0
EUROPE	350	190	10	0	60	15	1	0	626	1,6
JAPON. AUSTR. NOUV.ZEL	90	44	1	0	21	4	0	0	160	1,6
URSS. EUROPE CENTRALE	418	135	51	0	13	19	0	0	636	2,0
TOTAL PAYS DU NORD	1128	869	362	0	164	88	2	0	2613	2,6
AMERIQUE LATINE	6	70	9	0	8	70	0	0	163	0,7
AFRI.NORD MOYEN ORIENT	1	25	2	0	1	2	0	0	31	0,2
AFRIQUE	1	4	0	0	1	90	0	0	96	0,3
INDE	30	7	0	0	2	50	0	0	89	0,2
CHINE	197	8	1	0	2	40	0	0	248	0,4
ASIE OCEANIE	8	2	0	0	3	60	0	0	73	0,2
TOTAL PAYS DU SUD	243	116	12	0	17	312	0	0	700	0,3
TOTAL MONDE	1371	985	374	0	181	400	2	0	3313	1,1

Approvisionnement énergétiques
1985

ENERGIE PRIMAIRE (Mtep)	CHARBON	PETROLE	GAZ	NUCLEAIRE	HYDRAUL.	BIOMASSE DECHETS	GEOETHER.	SOLAIRE EOLIEN	TOTAL	CONSUM. PAR HAB. (tep)
AMERIQUE DU NORD	480	790	470	104	134	52	4	0	2034	7,6
EUROPE	285	570	200	132	106	18	2	0	1313	3,0
JAPON. AUSTR. NOUV.ZEL	170	250	50	34	26	5	1	0	536	3,1
URSS. EUROPE CENTRALE	600	530	504	47	51	24	1	0	1757	4,5
TOTAL PAYS DU NORD	1535	2140	1224	317	317	99	8	0	5640	4,5
AMERIQUE LATINE	20	220	53	2	69	92	2	0	458	1,1
AFRI.NORD MOYEN ORIENT	3	165	40	0	5	3	0	0	216	0,9
AFRIQUE	3	30	4	0	9	127	0	0	173	0,4
INDE	90	45	3	1	11	74	0	0	224	0,3
CHINE	415	88	11	0	21	56	0	0	591	0,6
ASIE OCEANIE	76	130	21	10	18	119	2	0	376	0,5
TOTAL PAYS DU SUD	607	678	132	13	133	471	4	0	2038	0,6
TOTAL MONDE	2142	2818	1356	330	450	570	12	0	7678	1,6

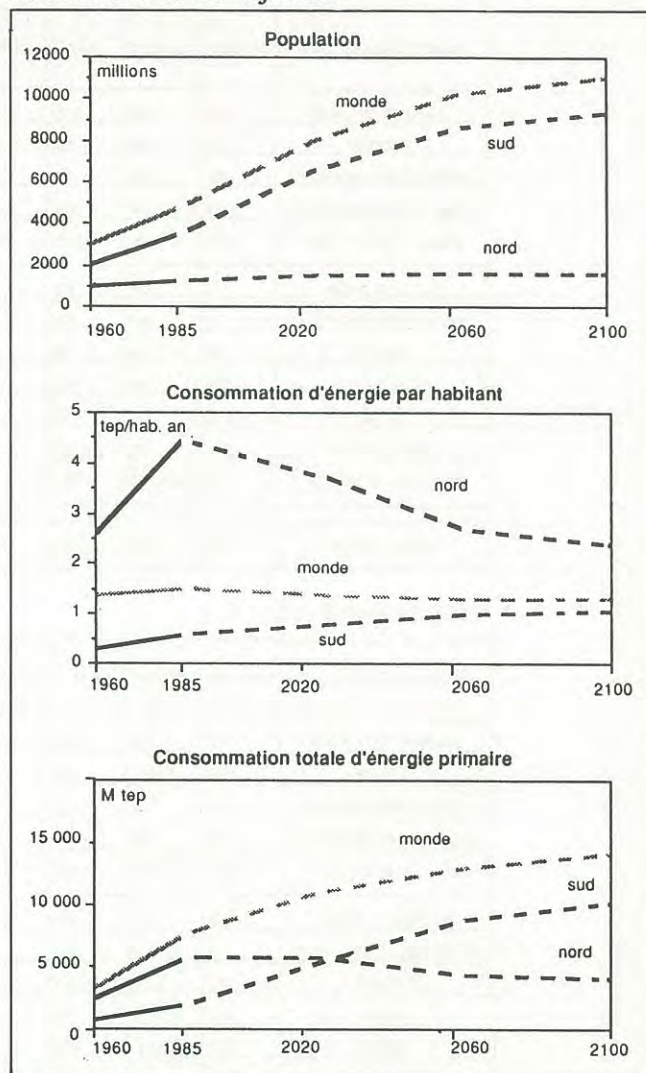
Nous retiendrons les résultats de cette étude, en repoussant toutefois l'échéance retenue par ses auteurs. En effet, si l'on peut techniquement mettre en oeuvre dès maintenant la stratégie qu'ils proposent, il ne nous paraît pas assuré que les acteurs économiques et politiques aient la volonté et le pouvoir de le faire avec une vigueur suffisante pour que les objectifs de l'étude soient atteints dès 2020 comme les auteurs le proposent, tant les inerties structurelles, institutionnelles et culturelles, ainsi que les contraintes économiques et financières sont importantes.

Dans Jérémie, nous avons reporté à l'horizon 2100 la réduction de moitié en moyenne de la consommation par habitant dans les pays industrialisés (2,4 tep/hab.an) et en 2060 la montée à 1 tep/hab. an en moyenne dans les pays du Sud (fig. 3). Cette croissance par habitant peut paraître très modeste quand on la compare à l'évolution constatée dans ces pays au cours des trente dernières années. Deux facteurs principaux expliquent cette modération. D'une part, dans de nombreuses régions à croissance démographique encore très forte au 21^e siècle, les efforts de développement ne peuvent se traduire que très lentement en termes d'indicateurs rapportés à l'individu. D'autre part l'utilisation systématique de techniques efficaces dans les pays neufs s'impose pour éviter des effets massifs qui conduiraient rapidement à des impasses à la fois physiques et économiques.

Les valeurs moyennes de consommation par habitant sont alors désagrégées en tenant compte des spécificités des dix régions considérées : spécificités géographiques et climatiques, qui induisent des besoins différents (nécessité de chauffage ou de climatisation, distances importantes etc...), rythmes démographiques et retard actuel de développement qui expliquent un décalage résiduel, même à long terme, des consommations par habitant. Ce sont ces spécificités et ces déséquilibres initiaux très profonds qui conduisent à ne pas envisager, malgré le caractère lointain de l'échéance, l'harmonisation des niveaux de consommation en 2100. Le raccordement aux valeurs actuelles de chaque région est établi pour les horizons intermédiaires 2020 et 2060. La demande totale d'énergie primaire par région s'en déduit compte-tenu de l'évolution des populations. Dans la deuxième partie de l'exploration prospective on s'efforce de faire évoluer la structure des approvisionnements de façon à satisfaire la demande ainsi définie. La démarche itérative adoptée procède en trois temps :

- estimation des approvisionnements en énergies fossiles à partir des évolutions tendanciennes, en tenant compte d'une auto-réduction des consommations d'énergies fossiles dans les pays industrialisés par crainte de l'effet de serre (réglementations et taxes), puis à terme en toute région par épuise-

Fig. 3 - Evolution des populations, des consommations d'énergie par habitant et des consommations totales d'énergie primaire dans le scénario Jérémie



ment progressif des ressources pétrolières et gazières ;

- mobilisation soutenue des énergies renouvelables en fonction de leur potentiel régional, avec une dynamique qui tient compte des valeurs observées dans le passé, sans transferts massifs entre régions ni exploitation systématique à des fins énergétiques des zones inhabitées (énergie solaire au Sahara, hydraulique dans l'Himalaya, éolienne au Groënland) ;

- bouclage du bilan par l'énergie nucléaire en s'assurant de la faisabilité de la dynamique résultante, avec itération éventuelle sur l'ensemble du processus.

Avec ces hypothèses et cette stratégie, les approvisionnements énergétiques mondiaux s'établissent comme indiqué dans le tableau III. Les valeurs numériques doivent être considérées comme des ordres de grandeur (certains chiffres d'une précision illusoire sont dus à la contrainte de bouclage du tableau sur des valeurs totales arrondies par zone géographique et par source primaire).

TABLEAU 3 : Approvisionnements énergétiques

SCENARIO JEREMIE : 2020

ENERGIE PRIMAIRE (Mtep)	CHARBON	PETROLE	GAZ	NUCLEAIRE	HYDRAUL	BIOMASSE DECHETS	GEOETHER.	SOLAIRE EOLIEN	TOTAL	CONSUM. PAR HAB. (tep)
AMERIQUE DU NORD	350	600	410	200	160	60	10	10	1800	5,4
EUROPE	200	400	250	203	110	30	2	5	1200	2,7
JAPON. AUSTR. NOUV.ZEL	190	200	90	124	30	5	6	5	650	2,8
URSS. EUROPE CENTRALE	660	400	650	173	100	55	2	10	2050	4,2
TOTAL PAYS DU NORD	1400	1600	1400	700	400	160	20	30	5700	3,8
AMERIQUE LATINE	55	300	100	10	185	300	10	40	1000	1,4
AFRI.NORD MOYEN ORIENT	5	350	245	0	5	5	0	40	650	1,1
AFRIQUE	40	100	30	0	80	220	0	30	500	0,4
INDE	200	130	95	10	30	85	0	20	570	0,4
CHINE	800	200	100	10	100	90	0	20	1320	1,0
ASIE OCEANIE	200	320	230	20	100	260	10	20	1160	0,9
TOTAL PAYS DU SUD	1300	1400	800	50	500	960	20	170	5200	0,8
TOTAL MONDE	2700	3000	2200	750	900	1110	40	200	10900	1,4

SCENARIO JEREMIE : 2060

ENERGIE PRIMAIRE (Mtep)	CHARBON	PETROLE	GAZ	NUCLEAIRE	HYDRAUL	BIOMASSE DECHETS	GEOETHER.	SOLAIRE EOLIEN	TOTAL	CONSUM. PAR HAB. (tep)
AMERIQUE DU NORD	200	230	200	240	180	100	20	30	1200	3,2
EUROPE	130	220	200	285	110	40	5	10	1000	2,2
JAPON. AUSTR. NOUV.ZEL	150	100	100	150	30	10	20	40	600	2,5
URSS. EUROPE CENTRALE	320	250	400	225	180	100	5	20	1500	2,8
TOTAL PAYS DU NORD	800	800	900	900	500	250	50	100	4300	2,7
AMERIQUE LATINE	80	250	250	60	270	470	20	100	1500	1,4
AFRI.NORD MOYEN ORIENT	5	400	395	35	5	10	0	200	1050	1,3
AFRIQUE	75	150	220	25	160	365	5	100	1100	0,6
INDE	400	290	255	90	35	100	0	30	1200	0,7
CHINE	940	250	250	70	180	125	5	30	1850	1,2
ASIE OCEANIE	300	350	430	120	150	480	20	40	1900	1,1
TOTAL PAYS DU SUD	1800	1700	1800	400	800	1650	50	500	8600	1,0
TOTAL MONDE	2600	2500	2700	1300	1300	1800	100	600	12900	1,3

SCENARIO JEREMIE : 2100

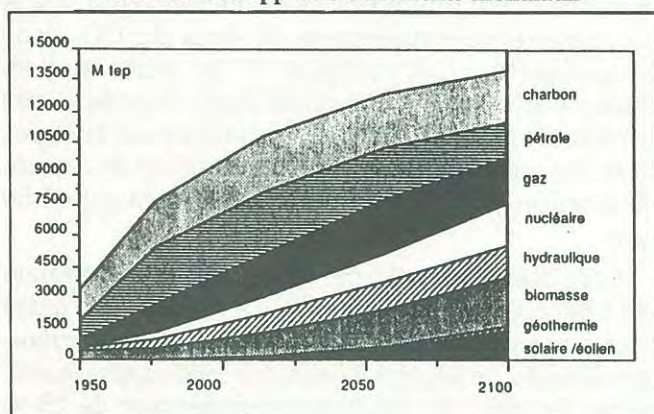
ENERGIE PRIMAIRE (Mtep)	CHARBON	PETROLE	GAZ	NUCLEAIRE	HYDRAUL	BIOMASSE DECHETS	GEOETHER.	SOLAIRE EOLIEN	TOTAL	CONSUM. PAR HAB. (tep)
AMERIQUE DU NORD	150	150	100	270	200	150	30	50	1100	2,7
EUROPE	100	140	130	380	110	50	10	30	950	2,1
JAPON. AUSTR. NOUV.ZEL	100	70	60	180	30	20	30	60	550	2,2
URSS. EUROPE CENTRALE	250	140	210	270	260	180	30	60	1400	2,6
TOTAL PAYS DU NORD	600	500	500	1100	600	400	100	200	4000	2,4
AMERIQUE LATINE	100	180	180	100	300	570	40	180	1650	1,3
AFRI.NORD MOYEN ORIENT	10	250	375	50	5	10	0	500	1200	1,3
AFRIQUE	90	70	150	40	200	500	10	490	1650	0,8
INDE	450	250	300	290	40	120	0	50	1600	0,9
CHINE	950	200	270	150	250	140	10	30	2000	1,3
ASIE OCEANIE	300	250	425	270	205	560	40	50	2100	1,2
TOTAL PAYS DU SUD	1900	1200	1700	900	1000	1900	100	1300	10000	1,1
TOTAL MONDE	2500	1700	2200	2000	1600	2300	200	1500	14000	1,3

Analyse des transitions difficiles

Les évolutions globales du scénario Jérémie sont relativement lisses en raison du pas de temps retenu (fig.4). Les dynamiques les plus marquées concernent la baisse des approvisionnements de pétrole dans les pays industrialisés, la montée du gaz naturel puis du solaire dans les pays du Sud. Cette continuité apparente des approvisionnements mondiaux masque en réalité de profonds déséquilibres régionaux.

L'évolution énergétique est particulièrement difficile en Afrique et en Inde. La consommation moyenne par habitant de ces pays a du mal à décoller malgré des efforts de développement importants, compte-tenu du retard accumulé et de l'explosion démographique. De plus cette valeur moyenne faible cache des inégalités fortes entre urbains et ruraux et entre une majorité en situation précaire et une minorité privilégiée.

Fig. 4 - Scénario Jérémie, évolution des approvisionnements mondiaux



La structure des approvisionnements reste très déséquilibrée dans ces deux grandes régions qui regroupent près de quatre milliards d'habitants à la fin du vingt-et-unième siècle. En Inde, les énergies fossiles continuent leur domination, passant de 62 à 86 % des approvisionnements de 1985 à 2100 ; le potentiel des énergies renouvelables n'est en effet pas à la hauteur des besoins (38 à 14 % du bilan sur cette même période). Cela représente un effort considérable de mobilisation du charbon (de 90 à 450 Mtep) et d'approvisionnement en hydrocarbures (de 45 à 550 Mtep) d'ici 2100. Le développement de l'Afrique est au contraire suspendu à l'exploitation de ses ressources renouvelables qui continuent d'assurer les trois quarts des approvisionnements, en se diversifiant de la biomasse (500 Mtep en 2100 contre 127 en 1985), à l'hydraulique (200 Mtep contre 9) et au solaire (490 Mtep contre zéro). Les énergies fossiles, rares sur la région, restent limitées à moins du quart des approvisionnements.

Des situations aussi contrastées et déséquilibrées induisent des dynamiques fortes : construction de plus de 400 centrales nucléaires de 500 MW en Inde et de l'équivalent de 2000 centrales solaires de 500 MW en Afrique d'ici la fin du vingt-et-unième siècle. Cet exemple illustre les besoins financiers considérables pour l'équipement du secteur énergétique des pays en développement, et en particulier du secteur électrique.

La Chine connaît un développement important de son secteur énergétique basé sur ses ressources fossiles, charbon en particulier (près de 1000 Mtep en 2100 contre 415 en 1985) et sur l'hydroélectricité. Sa population s'étant stabilisée plus vite que celle de l'Inde (hypothèses ONU), la consommation par habitant double. L'utilisation de techniques efficaces, la chasse aux pertes et l'adoption de systèmes de transport économes devraient permettre un développement économique soutenu.

En Amérique Latine, la mise en valeur du potentiel hydraulique et l'exploitation rationnelle d'une biomasse renouvelable (par opposition à la déforestation actuelle) conditionnent le développement énergétique. Ces deux sources renouvelables contribuent en effet à terme pour moitié aux approvisionnements énergétiques du sous-continent dans notre scénario (870 Mtep en 2100 contre 160 en 1985).

En Afrique du Nord et au Moyen-Orient, les approvisionnements, longtemps dominés par le pétrole et le gaz compte-tenu des gisements existants, font progressivement une place importante à l'énergie solaire (500 Mtep en 2100). La ressource le permet, mais cela représente un effort considérable d'équipement à entreprendre sans tarder.

Dans les pays du Nord, l'auto-réduction des consommations par un effort soutenu de maîtrise de l'énergie est certainement la principale caractéristique du scénario proposé. En effet, la consommation totale des pays industrialisés est ramenée de près de 6000 Mtep actuellement à 4000 Mtep en 2100 avec un effort particulier sur les énergies fossiles puisqu'elles ne représentent plus que 1600 Mtep en 2100 contre 4900 en 1985.

Ce sont des secteurs entiers de l'économie qui doivent être convertis, celui des transports constituant certainement l'enjeu principal. L'évolution doit se faire tant sur les modes de transports (attrait plus important de certains modes collectifs beaucoup plus efficaces que le véhicule individuel) que sur les techniques (carburants de substitution, véhicule électrique et véhicule à hydrogène).

L'économie d'énergie réalisée dans les pays du Nord (par rapport à leur niveau de consommation par habitant de 1985) représente environ 1000 Mtep en 2020, 2900 en 2060, 3500 en 2100. Sans cet effort ce sont 7500 Mtep au lieu de 4000 qu'il faudrait mobiliser en 2100.

Conséquences sur l'environnement

Parmi les problèmes d'environnement du long terme liés à l'énergie, l'accumulation de gaz carbonique dans l'atmosphère et l'accumulation de déchets nucléaires à longue durée de vie jouent un rôle particulier compte-tenu des dangers qu'elles présentent. L'accumulation de gaz carbonique dans l'atmosphère contribue en effet au réchauffement de la planète par effet de serre, avec les dérèglements climatiques qu'il peut induire. Modifiant les régimes hydrauliques, les conditions de l'agriculture et à terme le niveau des mers, ces changements peuvent avoir des conséquences graves sur les conditions de vie dans de nombreuses régions du monde. L'augmentation de la quantité de produits radioactifs résultant du fonctionnement des réacteurs électrogènes constitue aussi une menace sérieuse pour l'environnement : multiplication des transports dangereux de ces matières, risques de détournement de plutonium, et contamination du milieu naturel lors des opérations de stockage.

Malgré leurs profondes différences (nature des conséquences, nombre, qualité et comportement des acteurs) ces deux risques à long et très long terme présentent un point commun : on ne connaît à ce jour aucun moyen d'éliminer ni ces émissions ni ces déchets, alors qu'on connaît aujourd'hui des moyens techniques efficaces pour réduire par exemple les émissions d'oxydes de soufre ou d'azote dans l'atmosphère. L'accumulation de ces deux types de « déchets » risque fort de devenir au vingt-et-unième siècle un problème majeur.

Le gaz carbonique

Le scénario Jérémie conduit aux émissions de CO₂ indiquées dans le tableau IV.

TABLEAU 4 : JÉRÉMIE - Émissions annuelles et concentration de gaz carbonique dans l'atmosphère

JÉRÉMIE	ÉMISSIONS ANNUELLES DE CARBONE (Gtonnes)			CONCENTRATIONS EN CO ₂ DANS L'ATMOSPHERE (ppmv)
	FOSSILES	BOIS*	TOTAL	
1985	5,1	1,5	6,6	345
2020	6,4	1	7,4	409-410
2060	6,2	0,5	6,7	485-487
2100	5,2	0	5,2	548-553

* Déforestation

Pour l'établir nous avons tenu compte des ratios suivants d'émission des combustibles fossiles :

- 1 tonne de carbone par tep de charbon
- 0,8 tonne de carbone par tep de pétrole
- 0,6 tonne de carbone par tep de gaz naturel

D'autre part nous avons envisagé une décroissance linéaire de la déforestation mondiale sur la période, qui conduit à passer d'une émission de 1,5 gigatonne de carbone en 1985 à zéro en 2100. On ne peut en effet proposer un recours important à la biomasse-énergie sans l'accompagner d'une cessation progressive de la déforestation.

Le calcul de la teneur résultante en gaz carbonique dans l'atmosphère soulève encore des problèmes, dans la mesure où l'on connaît assez mal les mécanismes d'échange entre l'atmosphère et l'océan. Pour les uns (13), la capacité d'absorption des océans est proportionnelle à la quantité de gaz carbonique présent dans l'atmosphère. Pour d'autres la capacité d'absorption océanique est constante (14). Dans les conditions actuelles d'émission les deux calculs donnent des résultats très voisins qui apparaissent sur le tableau IV. La figure 5 illustre l'évolution de cette concentration. Dans ce scénario le doublement du taux de CO₂ dans l'atmosphère (par rapport à la période pré-industrielle) intervient après 2100. Comparé aux tendances actuelles de la consommation d'énergies fossiles qui impliquent un doublement de la concentration du CO₂ vers 2060, on a ainsi gagné 50 ans.

Le scénario proposé par la Conférence Mondiale de l'Énergie (15) conduit quant à lui dès 2020 à des émissions supérieures de 40 à 70 % selon les variantes (limitée, modérée) à celles de 1985. Dans le scénario Jérémie, les émissions augmentent de 25 % en 2020 avant de décroître pour revenir à la fin du siècle aux valeurs actuelles.

Les déchets nucléaires

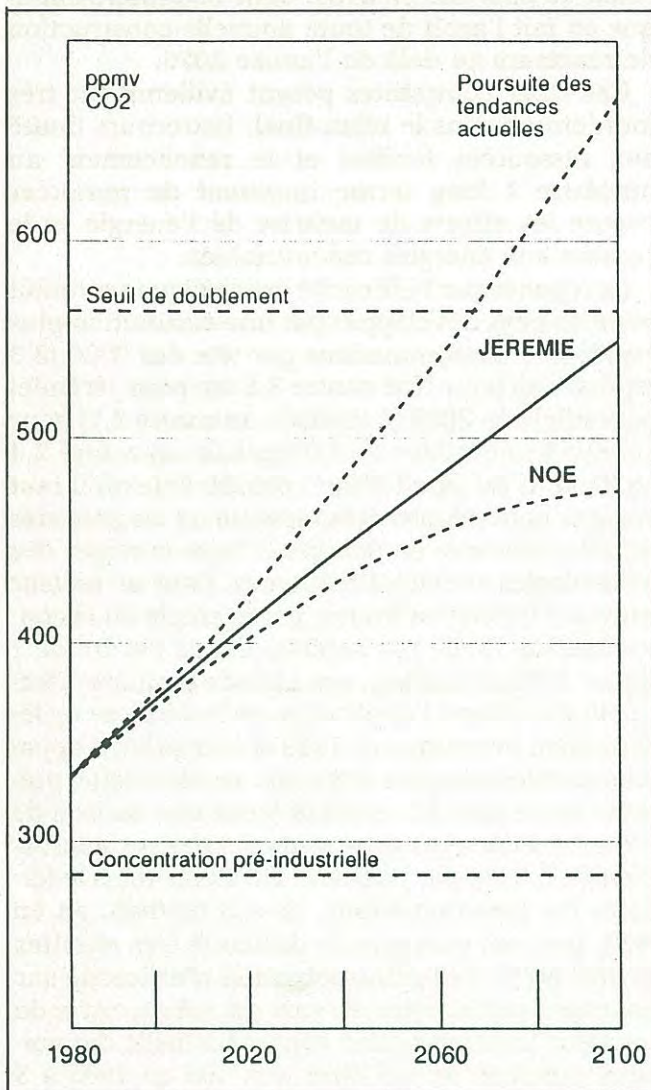
Les centrales nucléaires à uranium enrichi (PWR, BWR) produisent des déchets à longue durée de vie (de plusieurs dizaines à plusieurs milliers d'années). On estime cette quantité de déchets à 3,4 tonnes

(13) I. Mintzer, A matter of degrees : the potential for controlling the greenhouse effect, World Resource Institute 1987. $C(T) = C(T-1) + 0,58 \times 0,471 (E(T))$ avec $C(T)$: concentration du CO₂ l'année T (en ppmv), $E(T)$: niveau d'émission de CO₂ l'année T (en gigatonnes de carbone).

(14) $C(T) = C(T-1) + 0,471 (E(T)-3)$.

(15) Horizons énergétiques mondiaux 2000-2020, Technip 1989.

Fig. 5 - Evolution de la concentration de gaz carbonique dans l'atmosphère



par TWh produit soit environ 15 tonnes par Mtep (16). Le tableau V indique, pour le scénario Jérémie, l'évolution au cours du temps de la quantité de déchets nucléaires à la surface de la terre.

TABLEAU 5 : JÉRÉMIE - Cumul des déchets nucléaires à longue durée de vie

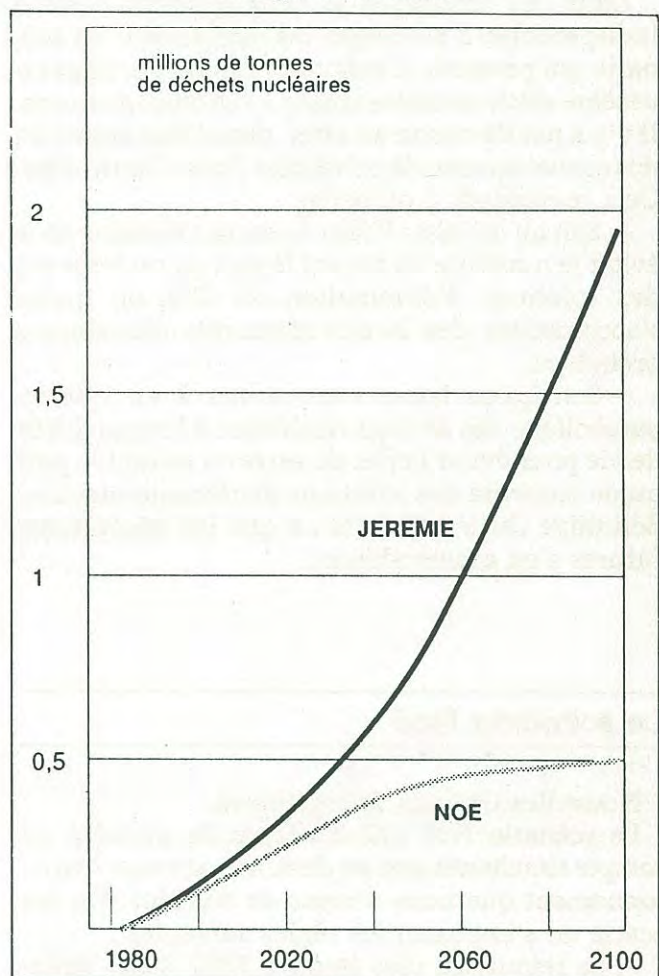
JÉRÉMIE	CUMUL ÉLECTRICITÉ NUCLEAIRE (Mtep)	CUMUL DÉCHETS (Mtonnes)
1985	2 000	0,03
2020	21 000	0,31
2060	62 000	0,9
2100	128 000	1,9

(16) Managing of nation's nuclear waste, Department of Energy - USA RW 0192 - novembre 1988.

L'évolution du cumul des déchets apparaît fig 6. En 2100 ces déchets cumulés atteignent 60 fois la valeur de 1985. La quantité de plutonium produit en cas de retraitement de ces déchets (200 kg par Mtep) atteint à cette époque environ 25 000 tonnes (17). Quant au nombre de sites démantelés et interdits pour de longues périodes il atteint 1000 à 5000 selon le nombre de tranches construites par site (18).

Restent les problèmes d'accidents plus ou moins graves dont l'éventualité n'est pas nulle avec 2000 tranches en service réparties dans de nombreux pays (19).

Fig. 6 - Evolution du cumul des déchets nucléaires à longue durée de vie



(17) Soit l'équivalent de 4 millions de bombes nucléaires. On voit apparaître là clairement l'ampleur des risques de prolifération des armes nucléaires.

(18) Exemple : 4 tranches de 1000 MW par site produisent 5 Mtep par an, soit en trente ans 150 Mtep.

(19) Le dernier rapport de sûreté établi par EDF pour 1989 sur le cas français en donne une idée. Son auteur écrit en effet : "Il faut considérer que dans l'état actuel de sûreté du parc EDF la probabilité de voir apparaître un accident de gravité 3 sur une des tranches du parc dans les 20 ans à venir peut être de quelques pour cent". (Energypresse, 5 avril 1990).

Le scénario Jérémie que nous avons construit, malgré l'effort de maîtrise de l'énergie et la diversification des sources qu'il sous-entend conduit cependant, dès la deuxième partie du siècle prochain à deux perturbations de l'environnement qui peuvent se révéler insupportables :

— Un doublement de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère avec les variations climatiques régionales considérables et la montée du niveau des mers que cela risque d'entraîner.

— Une multiplication par un facteur 60 des déchets nucléaires à longue durée de vie à stocker et à gérer pendant des milliers d'années avec les risques de contamination et de prolifération associés.

Dans ces conditions il nous apparaît comme indispensable d'envisager les modalités d'un scénario qui permette d'échapper à la fin du vingt-et-unième siècle simultanément à ces deux menaces. Il n'y a pas de raison en effet, dans l'état actuel de nos connaissances, de privilégier l'une d'entre elles. Cela reviendrait à admettre :

— Soit qu'on laisse l'effet de serre s'installer pour éviter le nucléaire en faisant le pari qu'on trouvera des solutions d'élimination du CO₂ ou qu'on s'accommodera des bouleversements climatiques probables.

— Soit qu'on laisse s'accumuler à un rythme parabolique des déchets nucléaires à longue durée de vie pour éviter l'effet de serre en faisant le pari qu'on trouvera des solutions de décontamination définitive de ces déchets ou que les générations futures s'en accommoderont.

Le scénario Noé

Nouvelles Options Energétiques.

Le scénario Noé (20) s'efforce de prendre en compte simultanément les deux menaces sur l'environnement que nous venons de signaler. On les écarte en s'imposant les règles suivantes :

— Le retour, au plus tard en 2100, à des émissions de CO₂ dues aux combustibles fossiles, inférieures ou égales à la capacité maximale d'absorption de la biosphère. On a pris comme limite annuelle d'émission en fin de période la valeur de trois gigatonnes de carbone, valeur provisoirement admise par de nombreux scientifiques comme celle au delà de laquelle les océans ne sont plus capables de résorber l'excès de CO₂ sous forme de carbonates.

— L'arrêt de toute production d'énergie nucléaire fissile au plus tard en 2100. Cette contrainte implique en fait l'arrêt de toute nouvelle construction de réacteurs au delà de l'année 2070.

Ces deux contraintes pèsent évidemment très lourdement dans le bilan final. Le recours limité aux ressources fossiles et le renoncement au nucléaire à long terme imposent de renforcer encore les efforts de maîtrise de l'énergie et le recours aux énergies renouvelables.

La réponse par l'efficacité énergétique se traduit pour les pays développés par une diminution plus rapide des consommations par tête dès 2020 (3,3 tep/hab. an pour Noé contre 3,8 tep pour Jérémie) poursuivie en 2060 (2 tep/hab. an contre 2,7) pour aboutir à une valeur de 1,6 tep/hab. an contre 2,4 en 2100. C'est dire l'effort considérable qu'il faut engager pour adopter très rapidement les procédés les plus efficaces en énergie et faire émerger des technologies nouvelles économes. Dans un secteur comme l'habitat en France par exemple où la consommation finale par habitant est de l'ordre de 1 tep en 1985 (chauffage, eau chaude sanitaire, électricité spécifique) l'application de la dernière réglementation thermique de 1989 et l'adoption d'appareils électroménagers économes en électricité, présents sur le marché, conduit (pour une maison de 110 m² occupée par 4 personnes) à des consommations de 0,3 tep par habitant. De même dans le tertiaire les consommations, de 0,3 tep/hab. an en 1985, peuvent sans grande difficulté être réduites de 40 à 50 %. Les gains potentiels d'efficacité sur les transports individuels sont du même ordre de grandeur (consommation conventionnelle des voitures ramenée de 6,6 litres aux 100 en 1985 à 3 litres aux 100 en fin de période, changements importants dans les modes de transport) et conduisent à des consommations par habitant de l'ordre de 0,3 tep à long terme. Reste l'industrie qui consomme 0,9 tep par habitant en 1985 mais qui possède un potentiel de réduction de consommation énergétique très important (25 % pour l'aluminium, 50 % pour le papier, 50 % pour le ciment etc...) (21). Par conséquent des consommations finales de l'ordre de 1,1 à 1,2 tep/hab.an paraissent des objectifs raisonnables à terme, même avec les technologies d'aujourd'hui.

Pour les pays du Sud cet effort accru de maîtrise de l'énergie n'apparaît que marginalement dans la deuxième moitié du siècle prochain quand le niveau de développement atteint permet à ces

(20) Par référence au déluge et à l'Arche.

(21) Voir par exemple B. Aebischer, D. Pain et B. Giovannini, Centre Universitaire d'Etudes des Problèmes de l'Énergie - Université de Genève, Perspectives de la demande d'énergie en Suisse, 1985-2025.

pays de nouveaux progrès de productivité énergétique.

La contrainte d'approvisionnement sur les énergies fossiles conduit à un recours accru aux énergies renouvelables. Dans le scénario Jérémie, le recours aux énergies renouvelables, bien qu'important, était cependant borné par deux conditions restrictives :

— L'absence de commerce international important des énergies renouvelables ou des produits qui en découlent.

— L'absence d'exploitation significative des zones inhabitées à des fins énergétiques.

On admet au contraire dans Noé un équipement partiel des zones inhabitées (Sahara, déserts du Moyen-Orient, Australie, Himalaya, Sibérie, Groënland, etc.) en systèmes divers (solaire, hydraulique, éolien) capables de fournir l'énergie nécessaire à la fabrication de matériaux ou de nouveaux vecteurs énergétiques stockables et transportables. Cette perspective conduit à envisager un commerce international des énergies renouvelables à travers les nouveaux vecteurs énergétiques qu'elles permettent d'élaborer. On pense tout d'abord aux carburants issus de la biomasse et à l'hydrogène.

Enfin on fait apparaître dans Noé une contribution encore marginale de nouvelles technologies (satellites solaires, géothermie profonde, fusion ou autres). Vue l'incertitude qui pèse sur leur émergence, sans faire de choix prématuré, nous admettons simplement qu'une ou plusieurs d'entre elles commencent à émerger à la fin du siècle prochain pour arriver à maturité aux cours du siècle suivant.

Avec un tel jeu d'hypothèses et de contraintes on aboutit aux approvisionnements décrits dans le tableau VI et illustrés sur la figure 7. On y voit apparaître les principaux éléments suivants :

— Pour les pays du Nord :

- Le très gros effort de maîtrise de l'énergie réa-

lisé dans le scénario Noé par rapport au scénario Jérémie : 4900 Mtep contre 5700 en 2020, 3100 contre 4300 en 2060, 2600 contre 4000 en 2100.

- La chute très rapide du recours aux énergies fossiles, réservées le plus possible aux pays du Sud qui en ont un urgent besoin pour construire l'infrastructure de leur développement : de 5000 Mtep en 85 à 3400 en 2020, 1500 en 2060, 500 en 2060.

- Une croissance modérée (30 %) du nucléaire jusqu'en 2020 suivie d'une décroissance continue jusqu'à la fin du siècle.

- La montée en puissance à partir du début du siècle de la contribution de la biomasse aux approvisionnements, en particulier sous forme de carburant, parfois importé d'autres zones de production.

- L'équipement progressif dès le début du siècle des très importantes réserves hydrauliques d'URSS.

- La montée en puissance de l'énergie solaire et de l'énergie éolienne qui atteignent des valeurs significatives dès 2060.

— Pour les pays du Sud :

- Une augmentation initiale importante du recours aux énergies fossiles, de 1400 Mtep en 1985 à 3100 en 2020, 4000 en 2060. Il faut attendre la deuxième partie du siècle pour voir s'amorcer la décline et la stabilisation vers 3000 Mtep en 2100.

- Un nucléaire qui reste cantonné aux quelques pays dans lesquels il est déjà présent (Corée du Sud, Taïwan, Inde, Argentine, Brésil, Chine).

- Un considérable effort, de portée internationale, pour équiper les nombreux sites hydrauliques d'Amérique Latine, d'Asie et d'Afrique.

Cependant ce sont la biomasse et l'énergie solaire qui jouent à long terme le rôle dominant dans ces pays puisqu'elles représentent près de la moitié de l'approvisionnement final. En fin de période ce sont de 8 à 10 millions de km² de forêts et de plantations énergétiques (en supposant des rendements moyens de 2,5 à 3 tep/hectare) qui sont consacrés à des usages énergétiques, soit un tiers de la superficie forestière actuelle de ces pays.

Quant aux installations solaires elles couvrent en fin de période environ cent mille km² de surfaces arides ou désertiques. En Afrique par exemple elles occupent un pour cent des zones arides chaudes.

L'impact du scénario Noé sur l'environnement apparaît sur les figures 5 et 6. La concentration de gaz carbonique dans l'atmosphère se stabilise à 470 ppmv sans atteindre le doublement. Le stock de déchets nucléaires plafonne à 0,5 millions de tonnes avant la fin du siècle alors qu'il continue à croître dans le scénario Jérémie de façon parabolique jusqu'à 2100 où il atteint 2 millions de tonnes, et linéaire ensuite à raison de 30 000 tonnes par an.

Fig. 7 - Scénario Noé, évolution des approvisionnements mondiaux

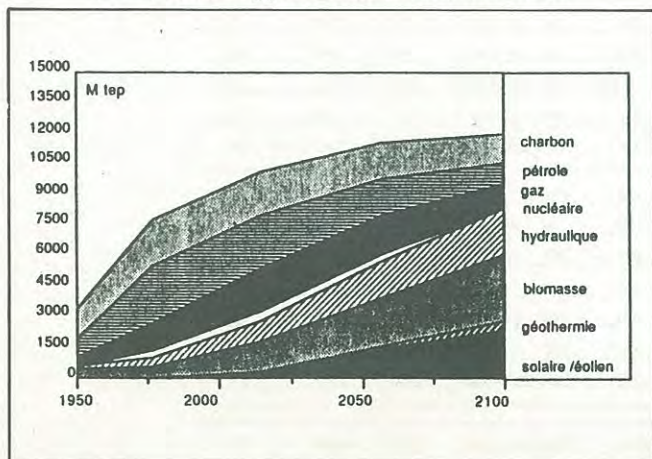


TABLEAU 6 : Approvisionnements énergétiques

SCENARIO NOE : 2020

ENERGIE PRIMAIRE (Mtep)	CHARBON	PETROLE	GAZ	NUCLEAIRE	HYDRAUL	BIOMASSE DECHETS	GEOTHER.	SOLAIRE EOLIEN	TOTAL	CONSUM. PAR HAB. (tep)
AMERIQUE DU NORD	250	500	410	120	160	80	10	20	1550	4,7
EUROPE	173	370	250	160	120	65	2	10	1150	2,5
JAPON. AUSTR. NOUV.ZEL	144	220	110	70	30	10	6	10	600	2,6
URSS. EUROPE CENTRALE	433	300	600	60	140	55	2	10	1600	3,3
TOTAL PAYS DU NORD	1000	1390	1370	410	460	210	20	60	4900	3,3
AMERIQUE LATINE	35	265	100	5	185	350	10	50	1000	1,4
AFRIQ.NORD MOYEN ORIENT	5	310	245	0	5	5	0	80	650	1,1
AFRIQUE	10	80	30	0	80	250	0	50	500	0,4
INDE	180	120	125	10	30	85	0	20	570	0,4
CHINE	700	195	100	5	150	130	0	40	1320	1,0
ASIE OCEANIE	170	240	230	20	100	330	10	60	1160	0,9
TOTAL PAYS DU SUD	1100	1210	830	40	550	1160	20	300	5200	0,8
TOTAL MONDE	2100	2600	2200	450	1000	1360	40	350	10100	1,3

SCENARIO NOE : 2060

ENERGIE PRIMAIRE (Mtep)	CHARBON	PETROLE	GAZ	NUCLEAIRE	HYDRAUL	BIOMASSE DECHETS	GEOTHER.	SOLAIRE EOLIEN	TOTAL	CONSUM. PAR HAB. (tep)
AMERIQUE DU NORD	100	200	140	70	200	110	20	60	900	2,5
EUROPE	80	110	85	90	160	120	5	50	700	1,5
JAPON. AUSTR. NOUV.ZEL	75	70	45	60	40	40	20	60	400	1,6
URSS. EUROPE CENTRALE	245	110	230	20	250	180	5	60	1100	2,1
TOTAL PAYS DU NORD	500	490	500	230	650	450	50	230	3100	1,9
AMERIQUE LATINE	40	160	100	0	340	550	20	200	1400	1,3
AFRIQ.NORD MOYEN ORIENT	10	310	300	0	10	30	0	390	1050	1,3
AFRIQUE	20	100	105	0	190	480	5	200	1100	0,6
INDE	300	195	350	5	100	150	0	100	1200	0,7
CHINE	570	205	300	5	320	250	5	145	1800	1,2
ASIE OCEANIE	360	250	345	10	190	490	20	185	1850	1,1
TOTAL PAYS DU SUD	1300	1210	1500	20	1150	1950	50	1220	8400	1,0
TOTAL MONDE	1800	1700	2000	250	1800	2400	100	1450	11500	1,1

SCENARIO NOE : 2100

ENERGIE PRIMAIRE (Mtep)	CHARBON	PETROLE	GAZ	NUCLEAIRE	HYDRAUL	BIOMASSE DECHETS	GEOTHER. NILES TECH	SOLAIRE EOLIEN	TOTAL	CONSUM. PAR HAB. (tep)
AMERIQUE DU NORD	40	40	40	0	210	200	30 + 40	100	700	1,7
EUROPE	40	40	30	0	200	170	10 + 40	70	600	1,3
JAPON. AUSTR. NOUV.ZEL	60	30	20	0	50	50	30 + 30	80	350	1,4
URSS. EUROPE CENTRALE	60	40	60	0	340	280	30 + 40	100	950	1,7
TOTAL PAYS DU NORD	200	150	150	0	800	700	100 + 150	350	2600	1,6
AMERIQUE LATINE	40	50	50	0	450	600	40 + 20	250	1500	1,2
AFRIQ.NORD MOYEN ORIENT	10	150	200	0	10	80	0 + 0	650	1100	1,2
AFRIQUE	20	70	80	0	270	600	10 + 0	500	1550	0,8
INDE	300	270	300	0	150	300	0 + 30	150	1500	0,9
CHINE	570	150	200	0	400	300	10 + 20	200	1850	1,1
ASIE OCEANIE	360	160	220	0	220	620	40 + 30	250	1900	1,1
TOTAL PAYS DU SUD	1300	850	1050	0	1500	2500	100 + 100	2000	9400	1,0
TOTAL MONDE	1500	1000	1200	0	2300	3200	200 + 250	2350	12000	1,1

Conclusion

A l'issue de cette description des scénarios Jérémie et Noé, reportons-nous aux questions principales qui motivaient cette étude : pénurie éventuelle d'énergie, effet de serre, cumul des déchets nucléaires et prolifération, déséquilibre Nord-Sud.

Le scénario Jérémie ne répond que partiellement à ces questions. Si l'approvisionnement global est assuré grâce à la contribution des énergies renouvelables et à l'appoint du nucléaire, les énergies fossiles atteignent pour certaines leurs limites. La consommation cumulée de charbon (290 Gtep) reste très inférieure aux réserves prouvées, mais il n'en est pas de même pour le pétrole et le gaz : 300 Gtep de pétrole consommés en 2100 contre 110 de réserves prouvées, 250 Gtep de gaz consommé contre 100 de réserves prouvées (mais 250 de réserves probables). C'est dire qu'il faudra faire appel dès la deuxième moitié du siècle, non seulement à la récupération assistée du pétrole mais aussi à des pétroles non conventionnels beaucoup plus chers. Notons cependant que dans les scénarios développés par la Conférence Mondiale de l'Energie, les consommations de pétrole déjà supérieures de 30 % en 2020 à celles de notre scénario conduisent à un épuisement des mêmes réserves dès 2040 ou 2050.

En ce qui concerne l'effet de serre, la courbe de la figure 5 montre que la stratégie retenue ne résoud pas définitivement le problème puisque la concentration de CO₂ dans l'atmosphère continue de croître jusqu'à 2100 et au delà, de façon linéaire. L'effet de retardement des échéances de doublement du taux de CO₂ dans l'atmosphère est cependant très appréciable ; par rapport aux tendances actuelles et aux prévisions les plus courantes qui conduisent à une augmentation parabolique de ce taux et à un doublement vers 2050, le gain d'une cinquantaine d'années reste un atout considérable. Gagner du temps apparaît en effet comme la stratégie la plus raisonnable à la fois pour mieux comprendre les phénomènes, pour s'adapter aux variations potentielles du climat mais aussi pour permettre l'émergence de nouvelles technologies susceptibles de contribuer significativement à détendre ces contraintes (22).

Pour l'énergie nucléaire, ce ne sont pas tant les réserves d'uranium qui posent problème (dans la mesure où les ressources probables sont importan-

tes), mais bien plutôt l'accumulation des déchets à très longue durée de vie qu'entraîne le recours accru à cette filière, avec les risques qui y sont associés sans parler de l'accroissement des risques d'accidents de centrales.

Enfin du point de vue des déséquilibres que risque d'entraîner le développement des pays du Sud sur le système énergétique mondial, le scénario Jérémie suppose un rééquilibrage important entre Nord et Sud (économie d'énergie dans le Nord et transferts massifs de technologies dans le Sud) qui se traduit par le renversement des ratios observés jusqu'ici ; de 26 % du total mondial la consommation des pays du Sud passe à 48 % en 2020, 67 % en 2060, 71 % en 2100. Le rapport des consommations moyennes par habitant entre les régions les plus riches et les plus pauvres passe de 25 en 1985 à 4 en 2100.

Le scénario Jérémie apparaît donc comme une première tentative pour retarder, au prix d'un effort de solidarité, de diversification et de maîtrise de l'énergie, les échéances des bouleversements planétaires potentiels, dans les domaines économiques, écologiques et politiques.

Le scénario Noé est plus ambitieux puisqu'il se fixe pour objectif de répondre à l'ensemble des questions que nous nous sommes posées. Ses contraintes radicales (zéro nucléaire et stabilisation de la concentration de CO₂) lui confèrent un caractère éminemment exploratoire.

En ce qui concerne les problèmes d'environnement, les niveaux atteints par le taux de CO₂ dans l'atmosphère et le stock de déchets nucléaires, bien qu'élevés, se stabilisent en fin de période.

Le cumul des consommations de pétrole (230 Gtep) et de gaz (210 Gtep) bien qu'inférieur à celui du scénario Jérémie suppose cependant le recours à des pétroles non conventionnels. Mais la chute des consommations de ces produits au cours de la deuxième moitié du vingt et unième siècle (un facteur 2 entre 2050 et 2100) laisse présager leur disparition dans la consommation au début du siècle suivant.

L'effort de maîtrise de l'énergie des pays du Nord est plus intense. Celui de diversification vers les énergies renouvelables exige la mobilisation internationale de capitaux importants pour la réalisation de grands projets à vocation interrégionale si ce n'est mondiaux (aménagements hydrauliques, solaires au Sahara, satellites etc...).

Le scénario Noé apparaît donc comme une tentative pour aboutir, à l'horizon de la stabilisation de la population mondiale, à un système énergétique en équilibre avec la nature qui n'obère pas définitivement l'avenir lointain, mais qui ne requiert pas de pari technologique ou scientifique important. Il montre qu'à trois conditions, certes contraignantes, de rationalisation systématique des con-

(22) J.C. Hourcade, G. Mégie, J. Theys, D. Crimé, Modifications climatiques et réorientation des politiques énergétiques : comment gérer l'incertitude ? XIV Congrès de la Conférence Mondiale de l'Energie, Montréal 17-22 Sept. 1989.

sommations énergétiques, de diversification et de solidarité Nord-Sud, on peut physiquement échapper simultanément aux menaces majeures qui se dessinent.

Il est bien évident que ces projections sont très sensibles aux hypothèses retenues et en particulier à celles qui concernent les modes de vie et les modes de développement qu'impliquent les consommations énergétiques affichées. Par exemple un développement des pays du Nord à « l'Américaine » et non à la « Japonaise », une organisation des transports en Chine fondée sur la voiture individuelle, induiraient très rapidement des divergences considérables avec les scénarios décrits.

Reste, bien évidemment à vérifier la vraisemblance de la faisabilité économique de tels scénarios. Il serait illusoire à notre sens de vouloir les chiffrer avec précision. Par contre, on peut donner les quelques éléments suivants :

— A court terme, d'ici 2010 par exemple, l'effort de maîtrise de l'énergie demandé ressort essentiellement de considérations du type "cost effective" et repose sur des choix politiques parfaitement justifiables d'un simple point de vue économique et financier (23).

La diversification et le transfert massif aux pays du Sud de technologies efficaces relève quant à eux d'une logique à plus long terme d'internalisation des coûts écologiques et de solidarité Nord-Sud.

Pour aborder le problème du long terme, nous envisageons d'apporter prochainement quelques éléments de comparaison économiques entre nos scénarios et ceux de la Conférence Mondiale de l'Énergie pour atteindre une première estimation des « surcoûts » éventuels des stratégies proposées. On obtiendra ainsi une première indication du prix qu'il faudrait consentir pour se libérer des différentes contraintes signalées précédemment.

Que faire dès maintenant ?

Quelle que soit l'évolution future du système énergétique mondial, des mesures doivent être prises d'urgence pour préserver les chances d'adaptation technologiques et éviter des modifications irréversibles de l'environnement.

En premier lieu il s'agit d'augmenter l'efficacité énergétique à tous les stades, de la production à la consommation, de façon à réduire aussi rapide-

ment que possible la consommation des pays industrialisés (en particulier Amérique du Nord et URSS) et à améliorer les services énergétiques des pays du Sud. L'enjeu est considérable et conditionne non seulement la réalisation de scénarios de type Jérémie ou Noé, mais également la plupart des scénarios actuels, y compris celui de la Conférence Mondiale de l'Énergie. Cela nécessite des moyens institutionnels et politiques de nature à harmoniser la dynamique des acteurs énergétiques. Tout dérapage par rapport à cet effort peut conduire à une explosion de la demande (scénario de type IIASA à 34 Gtep en 2060 par exemple) avec une crise majeure sur l'offre et sur l'environnement.

Il s'agit ensuite de réaliser une auto-réduction des consommations d'énergies fossiles, sans attendre l'épuisement des réserves, pour limiter les émissions de CO₂. Dans un premier temps la montée des usages du gaz naturel à la place du charbon et du pétrole pour la production d'électricité doit être encouragée. Les éléments économiques et techniques vont d'ailleurs dans ce sens (flexibilité des installations gaz, rapidité de la construction de centrales à turbine à gaz, modularité de l'équipement...). Il faut toutefois veiller à développer les infrastructures d'approvisionnement. Au delà des tendances naturelles de substitution entre énergies fossiles, des mesures fiscales et réglementaires doivent être prises pour faire évoluer le système énergétique vers moins de fossiles et un contrôle strict du développement de l'énergie nucléaire. Une taxe modérée mais affichée progressivement croissante pourrait alimenter un dispositif incitatif d'économies d'énergies et d'encouragement des énergies renouvelables. Une réglementation internationale sur les émissions du CO₂ limitée au pays du Nord, responsables à 80 % des émissions, pourrait encourager une réorientation du marché des combustibles fossiles vers les pays du Sud qui en ont grand besoin.

Le développement des énergies renouvelables est à mettre au rang des mesures d'urgence pour deux raisons. D'une part, ces énergies constituent à terme la source principale d'approvisionnement de nombreux pays du Sud, et leur développement massif doit être initialisé par un effort de démonstration important. A terme il s'agit de mettre en place des grands travaux d'intérêt mondial multi-objectifs. C'est la responsabilité des organismes de financement internationaux de les encourager. D'autre part, ces énergies peuvent apporter dès maintenant une amélioration sensible des conditions de vie à un grand nombre d'habitants des zones rurales du Sud qui ne disposent pas d'une alimentation par réseau. Il s'agit là de développer une pré-électrification rurale faisant appel aux énergies renouvelables locales (petite hydraulique, solaire photovoltaïque, biogaz, éoliennes...).

(23) Voir par exemple : B. Keeping and G. Kats, *Energy Policy*, 537, december 1988, et A.B. Lowins et al, *Least-cost energy : solving to CO₂ problem*, Brik House, Andover, mars 1981.

Enfin le transfert technologique Nord-Sud doit être renforcé. Il ne s'agit pas d'en rester au transfert des techniques de production centralisées mais bien d'assurer l'équipement de nombreux pays neufs en matériels utilisant efficacement l'énergie, de transférer les approches institutionnelles et politiques, de former les hommes et les entreprises à la gestion de l'énergie. A ce titre le développement de la recherche-développement et des opérations de démonstration sur les nouvelles sources d'énergie est indispensable.

Mais l'énergie n'est pas seule à contribuer à l'effet de serre. Un scénario énergétique visant à limiter celui-ci ne peut se concevoir qu'accompagné de mesures fortes pour arrêter la déforestation et reboiser de nombreuses régions (reconstitution des capacités d'épuration de la biosphère), appliquer la réglementation anti CFC, lutter contre les émis-

sions d'autres gaz à effet de serre (halons, méthane...).

C'est donc bien une stratégie globale et mondiale qu'il s'agit de mettre en oeuvre pour réduire les inégalités, limiter le réchauffement de la planète et contribuer de façon majeure à un mode de développement durable (24). Plus que de miracles technologiques c'est d'une prise de conscience et d'une volonté politique mondiale que nous avons un urgent besoin.

(24) G.H. Brundtland, Notre avenir à tous, Rapport de la Commission Mondiale sur l'Environnement et le Développement, Editions du Fleuve, Montréal, 1988.